2026
21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026

Editors
Álvaro Rocha, Carlos Ferrás,
Francisco Peñalvo, Ramiro Gonçalves

itma
INFORMATION AND TECHNOLOGY
MANAGEMENT ASSOCIATION

ISBN: 978-989-36481-2-4

WEB: http://www.cisti.eu/

Copyright 2026: Information and Technology Management Association (ITMA)

INFORMATION AND TECHNOLOGY
MANAGEMENT ASSOCIATION

2026
21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026

Editors
Álvaro Rocha, Carlos Ferrás,
Francisco Peñalvo, Ramiro Gonçalves

INFORMATION AND TECHNOLOGY
MANAGEMENT ASSOCIATION

INTRODUCTION

This book brings together a selection of papers, written in Portuguese and Spanish, that were presented at CISTI'2026 – the 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies, held from June 17 to 20, 2026, at University of Santiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain.

Organized jointly by University of Santiago de Compostela (USC) and the Information and Technology Management Association (ITMA), CISTI'2026 provided an international platform for researchers and industry practitioners to share and discuss recent advancements, emerging trends, experiences, and future concerns across the diverse domain of Information Systems and Technologies.

The Scientific Committee comprised 321 international experts from multiple disciplines within Information Systems and Technologies, who rigorously evaluated submissions using a double-blind peer-review process. This meticulous procedure ensured the high quality and relevance of contributions selected for presentation in the conference's key thematic areas:

A) Organizational Models and Information Systems
B) Knowledge Management and Decision Support Systems
C) Software Systems, Architectures, Applications, and Tools
D) Computer Networks, Mobility, and Pervasive Systems
E) Human-Centered Computing
F) Health Informatics
G) Information Technologies in Education
H) Architecture and Engineering of Construction

CISTI'2026 attracted nearly 500 paper submissions from 41 countries worldwide, demonstrating the conference's global reach and academic significance. Accepted papers presented at the conference are published by Springer Nature, as well as by ITMA with this book, and will be submitted for potential indexing in renowned databases such as Scopus, WoS, EI-Compendex, DBLP, and Google Scholar.

We extend our sincere gratitude to all contributors whose dedication and effort made CISTI'2026 possible, including authors, committee members, workshop organizers, and sponsors. Their valuable support has significantly contributed to the continued success and prestige of the conference.

ORGANIZATION

Coordinating Committee
Álvaro Rocha, Lusófona University, PT (General Chair)
Francisco Peñalvo, University of Salamanca, ES (Doctoral Symposium)
Ramiro Gonçalves, University of Trás-os-Montes and Alto Douro, PT (Workshops)
Carlos Ferrás Sexto, University of Santiago de Compostela, ES
Adolfo Lozano Tello, University of Extremadura, ES
Miguel de Castro Neto, NOVA Information Management School (NOVA IMS), Nova University of Lisbon, PT
Gonçalo Paiva Dias, University of Aveiro, PT
David Fonseca, La Salle, Ramon Llull University, ES
Mário PiattiniUniversity of Castilla-La Mancha, ES
Paulo Belfo, Coimbra Business School | ISCAC, Polytechnic Institute of Coimbra, PT
Borja Bordel, Universidad Politécnica de Madrid, ES

Local Organizing Committee
Carlos Ferrás Sexto, University of Santiago de Compostela, ES
Xosé Pereira Fariña, University of Santiago de Compostela, ES
Carlos Toural Bran, University of Santiago de Compostela, ES
Alba Silva Rodríguez, University of Santiago de Compostela, ES
Antonio Doval Adán, University of Santiago de Compostela, ES
Alejandro Otero Varela, University of Santiago de Compostela, ES
Nerea Otero Vale, University of Santiago de Compostela, ES
Yolanda García Vázquez, University of Vigo, ES
Rosana Martínez Román, University of Vigo, ES
Evelia Murcia Álvarez, University of Vigo, ES
Francisco Xabier Aguiar Fernández, University of Vigo, ES

Scientific Committee
A. Augusto Sousa, FEUP/INESCTEC, Portugal
Abel Suing, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
Adérito Fernandes-Marcos, University of Saint Joseph in Macau, Macao
Agostinho Sousa Pinto, CEOS.PP/ISCAP/IPP, Portugal
Albert Espinal Santana, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
Alcides Alvear, Universidad Ana G. Méndez, Puerto Rico
Alcinia Zita Sampaio, University of Lisbon, IST, Portugal
Aleardo Manacero, São Paulo State University - UNESP, Brazil
Alexandre L'Erario, UTFPR, Brazil
Alexandre Silva, Coimbra Business School | ISCAC, Portugal
Alexandre Valle de Carvalho, FEUP, Universidade do Porto, Portugal
Alicia García-Holgado, Universidad de Salamanca, Spain

Alma Gómez-Rodríguez, Universidade de Vigo, Spain
Alma Gómez-Rodríguez, Unversidade de Vigo, Spain
Altino J Mentzingen Moraes, Brazilian Ministry of Management and Public Services Innovation, Brazil
Amélia Cristina Ferreira da Silva, Instituto Politécnico do Porto, Portugal
Ana Amaro, CBS-ISCAC/ IPC, Portugal
Ana Balula, University of Aveiro, Portugal
Ana Bastos, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal
Ana Carla Amaro, Universidade de Aveiro, Portugal
Ana Dinis, Research Centre on Accounting and Taxation (CICF), IPCA, Portugal
Ana Grasielle Corrêa, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brazil
Ana Isabel Azevedo, CEOS.PP, ISCAP, Politécnico do Porto, Portugal
Ana Patricia Oliveira, University of Aveiro, Portugal
Ana Paula Silva, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal
Ana Rita Calvão, ESTGA, Universidade de Aveiro, Portugal
Ana Velhinho, DigiMedia - University of Aveiro, Portugal
Anabela Mesquita, Polytechnic of Porto, Portugal
Anabela Moreira Bernardino, Polytechnic University of Leiria, Portugal
André Mendes, Portalegre Polythecnic University, Portugal
Andrea Vázquez-Ingelmo, USAL, Spain
Ângela Oliveira, Politecnico de Castelo Branco, Portugal
Ania Cravero, Universidad de La Frontera, Chile
Antoni-Lluís Mesquida Calafat, Universitat de les Illes Baleares, Spain
António Andrade, Universidade Católica Portuguesa, Portugal
António Godinho, Instituto Politécnico de Santarém, Portugal
Antonio Goncalves, Portuguese Naval Academy / CINAV, Portugal
Antonio Jiménez-Martín, Universidad Politécnica de Madrid, Spain
António Jorge Gouveia, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal
António José Gonçalves Fernandes, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal
Apuena Gomes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brazil
Aracelly Núñez-Naranjo, Universidad Indoamérica, Ecuador
Arlindo Silva, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal
Arnulfo Alanis, Tecnológico Nacional de México, Mexico
Arsénio Reis, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal
Arturo José Méndez Penín, Universidade de Vigo, Spain
Aurea Soriano-Vargas, UTEC, Peru
Baltasar García Perez-Schofield, University of Vigo, Spain
Beatriz Sainz de Abajo, Universidad de Valladolid, Spain
Benedita Malheiro, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal
Bertil P. Marques, ISEP/PPORTO, Portugal
Bistra Mizova, Sofia University "St. Kliment Ohridski", Bulgaria
Boris Almonacid, Independent Researcher, Chile
Brenda L. Flores-Rios, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico
Bruno F Gonçalves, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal

Bruno Galasso, Universidade Federal de São Paulo, Brazil
Brunno Souza, Universidade de Pernambuco, Brazil
Carla Santos Pereira, University of Aveiro, Portugal
Carlos Afonso, UAlg - Universidade do Algarve, Portugal
Carlos Alexandre Silva, IFMG - Sabará, Brazil
Carlos Balsa, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal
Carlos Carreto, Polytechnic Institute of Guarda, Portugal
Carlos Costa, Aveiro University, Portugal
Carlos J. Costa, ISEG, Universidade de Lisboa, Portugal
Carlos Juiz, University of Islas Baleares, Spain
Carlos Rompante Cunha, CeDRI & Bragança Polytechnic University, Portugal
Carlos Serrao, Iscte - Instituto Universitário de Lisboa, Portugal
Carlos Vaz de Carvalho, GILT R&D / Instituto Superior de Engenharia do Porto, Portugal
Cecília Carmo, Universidade de Aveiro (ISCA-UA), Portugal
Célio Gonçalo Marques, Polytechnic University of Tomar, Portugal
Cesar Collazos, Universidad del Cauca, Colombia
Chinyere Okechukwu, University of Hradec Kralove, Czechia
Cidália Alves das Neves, CBS|ISCAC-Polytechnic University of Coimbra, Portugal
Ciro Martins, Universidade de Aveiro, Portugal
Clara Silveira, Instituto Politécnico da Guarda, Portugal
Claudia Berra Barona, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico
Cristina Caridade, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal
Daniel Polónia, Universidade de Aveiro, Portugal
Daniela Borissova, Bulgarian Academy of Sciences, Bulgaria
Danilo Eler, São Paulo State University, Brazil
Dewar Rico Bautista, Universidad Francisco de Paula Santander seccional Ocaña, Colombia
Diana Lancheros-Cuesta, Universidad de La Salle, Colombia
Diana Yacchirema, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Dimas Cassimiro do Nascimento, Federal University of Agreste de Pernambuco, Brazil
Dora Simões, University of Aveiro - ISCA-UA, Portugal
Eduardo Marques, Universidade da Madeira, Portugal
Edson Barbosa de Souza, Military Institute of Engineering, Brazil
Eduardo Amadeu Dutra Moresi, Universidade Católica de Brasília, Brazil
Edwin Juvenal Cedeño Herrera, Universidad de Panamá, Panama
Edwin Juvenal Cedeño Herrera, Universidad de Panamá, Panama
Elisabete Paulo Morais, UNIAG | Instituti Politécnico de Bragança, Portugal
Elisabete Vieira, University of Aveiro, Portugal
Elsa Cardoso, Iscte - Instituto Universitário de Lisboa, Portugal
Erika Upegui Cardona, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
Eugénia Bernardino, Polytechnic of Leiria, Portugal
Evelio Gonzalez, Universidad deLa Laguna, Spain
Fábio Marques, Universidade de Aveiro, Portugal
Fernando Batista, Iscte / INESC-ID, Portugal
Fernando Bobillo, University of Zaragoza, Spain

Fernando Cruz Bandeira, University Fernando Pessoa, Portugal
Fernando De la Prieta, University of Salamanca, Spain
Fernando Moreira, Universidade Portucalense, Portugal
Fernando Paulo Belfo, ISCAC, Polytechnic Institute of Coimbra, Portugal
Fernando Ribeiro, Polytechnic Institute of Castelo Branco, Portugal
Fernando Silva, Polytechnic Institute of Leiria, Portugal
Fernando Suárez, CPEIG - Colexio Profesional de Enxeñaría en Informática de Galicia, Spain
Filipe Caetano, Instituto Politécnico da Guarda, Portugal
Filipe Caldeira, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal
Filipe Cardoso, Instituto Politécnico de Santarém, Portugal
Filipe Fidalgo, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal
Filipe Montargil, ESCS - Esc Sup. de Com. Social, Portugal
Francisca Rosique Contreras, Universidad Politécnica de Cartagena, Spain
Francisco Antunes, University of Beira Interior and INESC Coimbra, Portugal
Francisco José García Tartera, Universidad Complutense de Madrid, Spain
Francisco Medeiros, IFPB, Brazil
Frank Aguilar Hernández, Investigador Independiente, Mexico
Frank José Affonso, Universidade Estadual Paulista (Unesp), Brazil
Frederico Branco, University of Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal
Frederico Dinis, Institute for Research in Design, Media and Culture ID +, Portugal
Gabriel Alberto García-Mireles, University of Sonora, Mexico
Gabriel Gomes de Oliveira, UNICAMP, Brazil
Gabriel Guerrero-Contreras, University of Cadiz, Spain
Gerardo González Filgueira, Universidade da Coruña, Spain
Giedre Valunaite Oleskeviciene, Mykolas Romeris University, Lithuania
Gisela Canelhas, ISTEC, Portugal
Gloria Maritza Valencia Vivas, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador
Graça Azevedo, University of Aveiro (ISCA-UA), Portugal
Gustavo Alves, Polytechnic of Porto - School of Engineering, Portugal
Hélder Gomes, Universidade de Aveiro, Portugal
Helena Luz, University of Coimbra, Portugal
Hélia Guerra, University of the Azores, Portugal
Henrique Gil, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal
Hlaing Htake Khaung Tin, University of Information Technology, Myanmar (Burma)
Hugo Arnoldo Mitre Hernández, Centro de Investigación en Matemáticas (CIMAT), Mexico
Hugo Sanjurjo-González, University of Deusto, Spain
Igor Aguilar Alonso, Universidad Nacional Tecnologica de Lima Sur, Peru
Igor Medeiros Vanderlei, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco, Brazil
Inês Domingues, CI-IPOP, Portugal
Ines Lopez-Baldominos, Universidad de Alcalá, Spain
Inês Messias, Instituto Politécnico de Santarém, Portugal
Isabel de la Torre, Universidad de Valladolid, Spain
Isabel Lopes, Instituto Politécnico de Bragança/UNIAG, Portugal
Isabel Sofia Brito, Instituto Politécnico de Beja, Portugal

Isidro Calvo, University of the Basque Country (UPV/EHU), Spain
Isidro Navarro, UPC-ETSAB, Spain
Ismael Etxeberria-Agiriano, University of the Basque Country (UPV/EHU), Spain
Issa Atoum, Philadelphia University, Jordan
Iva Kostadinova, University of Library Studies and Information Technologies, Bulgaria
Ivaldir de Farias Junior, Universidade de Pernambuco - UPE, Brazil
Iván Armuelles Voinov, Universidad de Panamá, Panama
Ivo Pereira, ISEP, Portugal
Javier Medina, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
Jeferson Vieira, Universidade Federal do Ceará, Brazil
Jeimy Cano, U. Andes, Colombia
Jesualdo Fernandes, ISEG, University of Lisbon, Portugal
Jezreel Mejia, CIMAT A.C., Mexico
Joana Leite, ISCAC, Polytechnic University of Coimbra, Portugal
João Carlos Gonçalves dos Reis, Lusofona University, Portugal
João Carlos Silva, IPCA, Portugal
Joao Ferreira, University of Coimbra, Portugal
João Gondim, Universidade de Brasília, Brazil
Joao Miranda, ESTGD and VALORIZA/IPPortalegre, CERENA/IST, Portugal
João Nunes, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal
João Pascoal Faria, Faculty of Engineering of the University of Porto, Portugal
João Paulo Costa, Faculty of Economics of the University of Coimbra, Portugal
João Paulo Ferreira, ISEC/IPC, Portugal
Joao Quadros, CEFET/RJ, Brazil
João Tavares, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal
Joaquim Leite, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal
Joaquim P. Silva, IPCA, Portugal
Joaquim Reis, ISCTE-IUL, Portugal
Jorge Barreiros, Polytechnic University of Coimbra - ISEC, Portugal
Jorge da Silva Correia-Neto, UFRPE, Brazil
Jorge Eduardo Ibarra-Esquer, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico
Jorge Gomes, Universidade Lusófona, Portugal
Jorge Gomez, Universidad de Cordoba, Colombia
Jose Barata, FCT-UNL, Portugal
José Braga de Vasconcelos, Universidade Lusófona, Portugal
Jose Carlos Metrôlho, Polytechnic Institute of Castelo Branco, Portugal
José Luis Pardo Díaz, GSoBEE, Spain
Jose Luis Ximenez de Sandoval, Les Roches Marbella, Spain
Jose M. Molina, Universidad Carlos III de Madrid, Spain
Jose Manuel Torres, Universidade Fernando Pessoa, Portugal
José Manuel Villegas Izaguirre, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico
José Miguel Cornelio Ramos, Universidad Tecnológica del Perú, Peru
Jose Paulo Lousado, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal
José Ribeiro, Polytechnic University of Leiria, Portugal

José Ribeiro, Polytechnic University of Leiria, Portugal
José Rosado, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, Portugal
Jose Salgado, Instituto Politécnico da Guarda, Portugal
Jose Salvado, University of Beira Interior, Portugal
José Simão, ISEL/IPL, Portugal
Juan Ángel Contreras Vas, Universidad de Extremadura, Spain
Juan M. Santos-Gago, atlanTTic - University of Vigo, Spain
Juan Pablo D'Amato, CONICET, Argentina
Kadna Vale, Universidade Federal do Agreste de Pernambuco (UFAPE), Brazil
Leila Weitzel, Fluminense Federal University, Brazil
Leonardo Bermon Angarita, Universidad Nacional de Colombia, Colombia
Leonel Santos, Polytechnic University of Leiria, Portugal
Leonilde Reis, Instituto Politécnico de Setúbal, Portugal
Leonor Teixeira, University of Aveiro, Portugal
Lilia Muñoz, Universidad Tecnológica de Panamá, Panama
Liliana Enciso, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
Lucila Ishitani, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Brazil
Lucila Romero, Universidad Nacional del Litoral, Argentina
Luis Alvarez Sabucedo, Univeristy of Vigo, Spain
Luís Barbosa, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro, Portugal
Luis Bruno, Instituto Politécnico de Beja, Portugal
Luis Camarinha-Matos, NOVA University Lisbon, Portugal
Luis Frazao, Polytechnic University of Leiria, Portugal
Luis Marques, ISEC-IPC, Portugal
Luis Serpa Andrade, Universidad Politecnica Salesiana, Ecuador
Maicon Herverton Lino Ferreira da Silva Barros, Universidade de Pernambuco, Brazil
Manuel de la Villa, Universidad de Huelva, Spain
Manuel Sanchez Chero, Universidad Nacional Frontera, Peru
Manuel Sousa Pereira, IPVC, Portugal
Manuela Aparicio, NOVA IMS, Universidade Nova de Lisboa, Portugal, Portugal
Maria Manuela Larguinho, IPC- Coimbra Business School | ISCAC, Portugal
Marcelo Mendonça Teixeira, Universidade de Pernambuco, Brazil
Marcelo Zambrano Vizuete, Instituto Tecnológico Superior Rumiñahui, Ecuador
Margarita Ramirez Ramirez, Universidad Autónoma de Baja California, Mexico
Maria Beatriz Guerra Piedade, Instituto Politécnico de Leiria, Portugal
Maria Cecília Rosa, Politécnico da Guarda, Portugal
Maria Cristina Marcelino Bento, UNIFATEA, Brazil
Maria de Fátima Rodrigues, ISEP, Politécnico do Porto, Portugal
María Dolores Acuña Garrido, University of Seville, Spain
María Dolores De Acuña Garrido, University of Seville, Spain
Maria Elisabete Neves, Coimbra Business School | ISCAC, Portugal
Maria Isabel Barreiro Ribeiro, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal
María J Lado, University of Vigo, Spain
Maria João Ferreira, Universidade Portucalense, Portugal

Maria José Angélico Gonçalves, IPP /ISCAP, Portugal
Maria José Sousa, ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa, Portugal
María Teresa García-Álvarez, University of A Coruna, Spain
María Visitación Hurtado Torres, University of Granada, Spain
Mariana Carvalho, ESTG, Polytechnic of Porto, Portugal
Mário Antunes, Polytechnic University of Leiria, Portugal
Marisol B. Correia, Algarve University & CiTUR, Portugal
Maristela Holanda, Universidade de Brasília, Brazil
Marla Teresinha Barbosa Geller, Centro Universitário Luterano de Santarém , Brazil
Martin Llamas Nistal, atlanTTic - Universidade de Vigo, Spain
Martín López Nores, University of Vigo, Spain
Maria Manuela Larguinho, IPC- Coimbra Business School | ISCAC, Portugal
Mauro Oddo Nogueira, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada - Ipea, Brazil
Mercedes Ruiz, University of Cadiz, Spain
Miguel A. Brito, University of Minho, Portugal
Miguel Casquilho, University of Lisbon, Portugal
Miguel Negrão, IPLeiria, Portugal
Miguel Ramón González Castro, Centro Tecnológico Aimen, Spain
Milagros Gutiérrez, UTN - FRSF, Argentina
Mirna Muñoz, Centro de Investigación en Matemáticas A.C., Mexico
Mohamed Eddabbah, Cadi Ayyad University, Morocco
Mohamed Yasin Noor Mohamed, Sultan Qaboos University, Oman
Nelson Rocha, Universidade de Aveiro, Portugal
Nídia Salomé Morais, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal
Nilton Canto, Universidade Mackenzie, Brazil
Nilton Canto, Universidade Presbiteriana Mackenzie, Brazil
Norma Velasquez, Universidad Católica Sedes Sapientiae, Peru
Nuno Costa, IPLeiria, Portugal
Nuno Magalhães Ribeiro, Universidade Fernando Pessoa, Portugal
Nuno Melão, Instituto Politécnico de Viseu, Portugal
Nuno Rodrigues, CIIC, ESTG, Polytechnic Institute of Leiria, Portugal
Odette Pantoja Diaz, Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
Olger Gutiérrez Aguilar, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Peru
Orlando Duran, Pontifícia Universidad Católica de Valparaíso, Chile
Óscar Mealha, University of Aveiro, Portugal
Osvaldo Santos, Instituto Politécnico de Castelo Branco, Portugal
Pablo Chamoso, University of Salamanca, Spain
Patrícia Leite, IPCA - EST, Portugal
Patricia Tedesco, Centro de Informática - UFPE, Brazil
Patricio Domingues, Polytechnic of Leiria, Portugal
Paula Peres, Politécnico do Porto / ISCAP, Portugal
Paula Prata, Universidade da Beira Interior, Portugal
Paulo Martins, Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro & INESC TEC, Portugal
Paulo Matos, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal

Paulo Rurato, Universidade Fernando Pessoa, Portugal
Paulo Urbano, FC, University of Lisbon, Portugal
Pedro Araújo, Universidade da Beira Interior, Portugal
Pedro Manuel do Espírito Santo, Polytechnic University of Leiria, Portugal, Portugal
Pedro Martins, Polytechnic of Viseu, Portugal
Pedro Martins, ISCAC, Polytechnic Institute of Coimbra, Portugal
Pedro Martins, Polytechnic of Viseu, Portugal
Pedro Mauricio Acosta-Castellanos, Universidad Santo Tomás, Colombia
Pedro Oliveira, Polytechnic of Bragança, Portugal
Pedro Sousa, University of Minho, Portugal
Pedro Teixeira, University of Aveiro, Portugal
Rafael Caldeirinha, Instituto de Telecomunicações and Polytechnic of Leiria, Portugal
Raul Laureano, Iscte-Instituto Universitário de Lisboa, Portugal
Rafael Nobre Orsi, Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, Brazil
Renata Spolon Lobato, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Brazil
René Faruk Garzozi-Pincay, Universidad Estatal Península de Santa Elena, Ecuador
Ricardo Alejandro Chung Ching, Universidad Nacional de Ingeniería, Peru
Ricardo Garcia León, Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Colombia
Ricardo Linden, Cepel, Brazil
Ricardo Marcão, ISLA Santarém, Portugal
Ricardo Simoes, Polytechnic Institute of Cavado and Ave, Portugal
Rita Margarida Teixeira Ascenso, ESTG, IPLeiria, Portugal
Rita Oliveira, DigiMedia, University of Aveiro, Portugal
Roberto Marichal, Universidad La Laguna, Spain
Roberto Theron, University of Salamanca, Spain
Rocío González-Sánchez, Universidad Rey Juan Carlos, Spain
Rodolfo Miranda de Barros, Universidade Estadual de Londrina, Brazil
Rodrigo Rocha, UFAPE, Brazil
Rodrigo Tocantins da Silva, Military Institute of Engineering, Brazil
Rogéria Cristiane Gratão de Souza, UNESP - São Paulo State University, Brazil
Rogerio Garcia, São Paulo State University, Brazil
Ronaldo Salles, IPP, Portugal
Rosa Maria Reis, ISEP/GILT, Portugal
Rui Araújo, University of Coimbra, Portugal
Rui Cruz, Universidade de Lisboa, Instituto Superior Técnico, Portugal
Rui Humberto Pereira, ISCAP/IPP, Portugal
Rui Moreira, UFP; LIACC, Portugal
Rui Pedro Lourenco, CeBER; FEUC, Portugal
Rui Pedro Marques, University of Aveiro, Portugal
Rui Pitarma, 117960462, Portugal
Rui Quaresma, Universidade de Évora, Portugal
Rui Rodrigues, ESMAD, Politécnico do Porto, Portugal
Rui Santos Cruz, INESC-ID/IST - Univ. Lisboa, Portugal
Rute Abreu, Instituto Politécnico da Guarda, Portugal

Sadouanouan Malo, Université Nazi Boni, Burkina Faso
Sandra Filipe, University of Aveiro, Portugal
Sandra Riascos-Erazo, Universidad del Valle, Colombia
Sandro Carvalho, Instituto Politécnico do Porto, Portugal
Santiago Gonzales Sanchez, Universidad César Vallejo, Peru
Sara Balderas-Díaz, University of Cadiz, Spain
Sara Paiva, Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal
Saulo Rocha, Universidade Federal Fluminense, Brazil
Sergio Araya Guzmán, Universidad del Bío-Bío, Chile
Sergio Correia, Portalegre Polytechnic University, Portugal
Sérgio Lopes, University of Minho, Portugal
Sergio Luján Mora, University of Alicante, Spain
Sergio Moro, ISCTE, Portugal
Sergio Nunes, ISEG, Portugal
Silvia García-Méndez, University of Vigo, Spain
Simone Martins, UFF, Brazil
Sofia Ribeiro, University of Aveiro, Portugal
Sónia P. Nogueira, Bragança Polytechnic University, Portugal
Sónia Rolland Sobral, UPT, Portugal
Sussy Bayoan Oré, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Peru
Tales Paiva Nogueira, Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira, Brazil
Tamara Silvana Márquez Lemp, Universidad Autónoma de Chile, Chile
Telmo Silva, DigiMedia, University of Aveiro. Portugal, Portugal
Thiago Dias, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Brazil
Thiago Pontes, Universidade Federal do Cariri, Brazil
Tiago Trancoso, IPVC, Portugal
Valderi Leithardt, Iscte - Instituto Universitário de Lisboa, Portugal
Valério Rosset, Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA, Brazil
Veronica Martinez Lazcano, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Mexico
Verónica Vasconcelos, Polytechnic University of Coimbra, Portugal
Victor Diogho Heuer de Carvalho, Universidade Federal de Alagoas, Brazil
Víctor Flores, Universidad Católica del Norte, Chile
Víctor H. Castillo, University of Colima, Mexico
Victor Hugo Medina Garcia, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia
Víctor Mondelo, Universidade de Vigo, Spain
Vinícius Gabriel Santos Bezerra, Universidade de Pernambuco, Brazil
Virginia Araujo, Atlantica University, Portugal
Virginia de Melo Trinks, Universidade de Brasília , Brazil
Vitor Gonçalves, CITeD, Instituto Politécnico de Bragança, Portugal
Vladimir Villarreal, Universidad Tecnológica de Panamá, Panama
Wagner Tanaka Botelho, Universidade Federal do ABC (UFABC), Brazil
Widad Hassina Belkadi, LRIA, USTHB, Algiers, Algeria
Zenaide Silva, Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, Brazil

INDEX

Segmentación y estimación de volumen hepático en imágenes CT 1
Liver Segmentation and Volume Assessment from CT images
Joaquín Olivares

¿Quién es responsable de los efectos de la Inteligencia Artificial? 8
Who is responsible for the effects of Artificial Intelligence?
Ariana Y. Gallardo-Guevara, Segundo E. Cieza-Mostacero, Claudia E. Mori-Ugarte, Raul Y. Lozano-Peralta

La responsabilidad civil por difusión de noticias falsas en internet: Una revisión sistemática 20
Civil liability for the dissemination of false news on the internet: A systematic review
Nathaly G. Amaya-García, Angie F. Fernández-Silva, Segundo E. Cieza-Mostacero, Claudia E. Mori-Ugarte, Raul Y. Lozano-Peralta

Plan de calidad de datos para el proceso de facturación en las Corporaciones Autónomas Regionales de Colombia – Caso: Corpocesar 29
Data quality plan to billing process for Colombia's Regional Autonomous Corporations - Case: Corpocesar
Mauricio Garcés Ordóñez, Mayda Patricia González Zabala

O Contributo das TIC para a Resiliência Organizacional 35
The Contribution of ICT to Organizational Resilience
Nelson Russo, Leonilde Reis, Ana Almeida, Pedro Pardal, Luísa Cagica Carvalho

CADUNE-PGFN: Uma Arquitetura para Curadoria e Automação de Documentos Jurídicos Não Estruturados no Setor Público 42
CADUNE-PGFN: An Architecture for the Curation and Automation of Unstructured Legal Documents in the Public Sector
Pedro Davi Moreira da Cruz, Jonatas do Vale Nunes, Flávio Garcia Praciano, Geraldo Pereira Rocha Filho, Georges Daniel Amvame Nze, Fábio Lúcio Lopes de Mendonça

Patrones de Diseño en el Desarrollo Low-Code: Una Revisión Sistemática 48
Design Patterns in Low-Code Development: A Systematic Review
Segundo E. Cieza-Mostacero, Milagros J. Rodríguez-Peña, Juan F. Pacheco-Torres, Claudia E. Mori-Ugarte

Sistema de Tutor Inteligente Basado en Machine Learning y Deep Learning con Enfoque Cuantitativo. 58
Intelligent Tutoring System Based on Machine Learning and Deep Learning with a Quantitative Reasoning.
Darienzo Alberto Valencia Álvarez, Elkin Nicolás Canaría Martínez, Iván Andrés Calderón Suarez, Diana Janeth Lancheros Cuesta

Integração de Funcionalidades de Otimização e Previsão de Demandas em Sistemas de Apoio à Decisão para a Gestão da Atenção Primária à Saúde no SUS do Brasil 64
Integration of Optimization and Demand Forecasting Functionalities into Decision Support Systems for the Management of Primary Health Care in Brazil's Unified Health System (SUS)
Dimas Cassimiro Nascimento, Daliton da Silva, Igor Medeiros Vanderlei, Luis Filipe Alves Pereira, Rian Gabriel Santos Pinheiro

Caracterização de Doenças Cardíacas por Integração de Sinais Fisiológicos e Dados Clínicos 70
Characterization of Heart Diseases through the Integration of Physiological Signals and Clinical Data
Eduardo Roldão Nonato Perondini, André Luis Debiaso Rossi, Danilo Medeiros Eler

Modelo Probabilístico del Deshielo a partir de la Cobertura de Nieve y LST con Imágenes Landsat 8 en la Sierra Nevada de Santa Marta. 77
Probabilistic Melt Model Based on Snow Cover and LST Using Landsat 8 Images in the Sierra Nevada de Santa Marta.
Andrés Hernández, Javier Medina

Comparación e implementación en Matlab de la fusion de imágenes satelitales Ikonos usando redes neuronales y ACP 83
Comparison and implementation in Matlab of the fusion of Ikonos satellite images using neural networks and PCA
Javier Medina, Erika Upegui

Estimación de Parámetros para la Evaluación del Índice de Calidad de Agua Mediante el uso de Imágenes Sentinel-2 y Machine Learning. 89
Parameter Estimation to Evaluate the Water Quality Index using Sentinel-2 images and Machine Learning.
Andrés Patiño-Montoya, Javier Medina

Integración de ECSS e ISO/IEC 25000 para la evaluación del software espacial 96
Integration of ECSS and ISO/IEC 25000 for Space Software Evaluation
Ana Díaz-Muñoz, Javier Verdugo Lara, Jose A. Barba, Jose Pumarega, Moisés Rodríguez Monje

Jornalismo digital 106
Do espectador ao interator, com interatividade e agência narrativa para o envolvimento dos jovens adultos
Digital journalism
From Spectator to Interactor — Interactivity and Narrative Agency for Young Adult Engagement
Carlos Queirós , Hélder Caixinha

Kung Fu Tag: Jogo Educacional como Ferramenta de Aprendizado na Programação Web 112
Kung Fu Tag: An Educational Game as a Learning Tool in Web Programming
Larissa Nicolau Alexandre, Pedro Lucas Angelo Evangelista, Fábio Paschoal Júnior, Gustavo Guedes, Almir Silva da Silveira, Carlos Otávio Schocair Mendes

Soluciones de Software para la Transformación Digital en una Universidad 118
Caso Universidad del Magdalena, Colombia
Software Solution for Digital Transformation in a University
A Case Study of the Universidad del Magdalena, Colombia
Mayda P. González-Zabala, Cesar E. Polo- Castro, Ernesto A. Galvis-Lista

Arbomonitor: Uma abordagem orientada por dados para vigilância de arboviroses baseada em sistemas de informação 124
Arbomonitor: A data-driven approach to arbovirus surveillance based on information systems.
João Pedro Pereira Frutuoso, Mikael Johnatan da Silva Azevedo, Amanda Gondim de Oliveira, Angélica Félix de Castro, Paulo Gabriel Gadelha Queiroz

Reconceptualizando la madurez digital 131
Un enfoque centrado en la confianza para una transformación sostenible
Reconceptualizing Digital Maturity
A Trust-Centered Approach to Sustainable Digital Transformation
Ivan Alexis Ontibon Rojas

Evaluación de la Arquitectura de un Sistema Recomendador Basado en Ontologías para Objetos de Aprendizaje en Carreras de Ingeniería
Evaluation of the Architecture of an Ontology-Based Recommender System for Learning Objects in Engineering Courses
Valeria Bertossi and Milagros Gutiérrez, Lucila Romero

Uso de Inteligência Artificial no Apoio à Classificação de Grupo Etário em Conteúdos Netflix 146
Use of Artificial Intelligence to Support Netflix Age-Group Classification
Denis Cicau, Diogo Vidazinha, Isabel Sofia Brito

Limitações da verificação automática de conformidade com WCAG: um experimento com barreiras intencionais de acessibilidade 152
Limitations of automated WCAG conformance verification: an experimental study with intentional accessibility barriers
Reinaldo Ferraz, Jeniffer Deus

Avances en la Auditoría de Privacidad Basada en Ontologías para la Salud Móvil (*mHealth*) 158
Advances in Ontology-Driven Privacy Auditing for mHealth
Alejandro Pérez-Fuente, M. Mercedes Martínez-González

Análise Comparativa entre Regressão Logística e Random Forest na Previsão de Níveis Críticos de PM 2.5 em Beijing 163
Uma abordagem baseada no processo KDD com análise de dependências temporais e variáveis de atraso
Comparative Analysis between Logistic Regression and Random Forest in Predicting Critical Levels of PM 2.5 in Beijing
A KDD-based approach focusing on temporal dependency and lag variables
João Silva, Rui Pereira, Isabel Sofia Brito

Caracterización de vegetación de páramo a partir de imágenes UAV hiperespectrales y algoritmos de aprendizaje automático 168
Estudio de caso parque ecológico Matarredonda, Cundinamarca, Colombia
Characterization of páramo vegetation from hyperspectral UAV images and machine learning algorithms
Case study of the Matarredonda ecological park, Cundinamarca, Colombia
Erika Upegui, Fabian Molano, Javier Medina

Defesa de Borda Orientada a SDN: Desafios de Sincronização e Persistência de Regras na Mitigação de Ameaças Mirai-like 174
SDN-Oriented Edge Defense: Synchronization and Rule Persistence Challenges in Mirai-like Threat Mitigation
Clayton Menezes Silva, Victor Lima dos Santos, Georges Daniel Amvame Nze, João José Costa Gondim, Francisco Lopes de Caldas Filho, Fábio Lúcio Lopes de Mendonça

¿Puede la inteligencia artificial corregir como un profesor? 180
Comparación en la evaluación de respuestas abiertas
Can Artificial Intelligence Grade Like a Professor?
A Comparison in the Evaluation of Open-Ended Responses
José Luis Ximénez de Sandoval, Marius Vlad, Ekaterina Vlad

Um Mapeamento Sistemática da Literatura Cinza sobre Transferência de Tecnologia 185
A Systematic Mapping of Grey Literature on Technology Transfer
José Carlos Felix Barbosa, Ivaldir Honóriode Farias Júnior, Emanoel Francisco S.Barreiros

OcuLex: Taxonomia Oculomotora Orientada a Comportamento para Suporte Clínico na Avaliação da Afasia Baseado em Machine Learning 191
OcuLex: Behavior-Oriented Oculomotor Taxonomy for Clinical Support in Machine Learning-Based Aphasia Assessment
Jonas Cesconetto, Alejandro Rafael Garcia Ramirez

Competencias docentes digitales: Análisis comparativo entre dos universidades latinoamericanas 199
Digital teaching competencies: A comparative analysis between two Latin American universities
Marisela Giraldo de López, Xiomara Bastardo Contreras, Nayade Domenech Polo, Rolando Villavicencio Santillán

XAI aplicada ao processamento de linguagem natural: uma perspectiva do usuário 205
XAI in Natural Language Processing: A User Perspective
Jaqueline B. M. Teixeira, Danilo Medeiros Eler

Uma Arquitetura para Gerenciamento Automatizado de Eventos de TI em Governos Municipais: Integrando ITIL 4, Zabbix, um Mecanismo de Inferência Fuzzy e GLPI 211
An Architecture for Automated IT Event Management in Municipal Government: Integrating ITIL4, Zabbix, a Fuzzy Inference Engine, and GLPI
Luiz Carlos Garanhani Junior, Felipe Dias Abrahão, Vanessa Tavares de Oliveira Barros, Rodolfo Miranda de Barros

YACHAY-SIG: Plataforma Geográfica Inteligente para el Fortalecimiento de la Vigilancia Epidemiológica del Cáncer 217
YACHAY-SIG: A Smart Geographic Platform for Strengthening Cancer Epidemiological Surveillance
Ricardo Timarán Pereira, Arsenio Hidalgo Troya, Luisa Bravo Goyes, Anivar Torres Chaves, Fredy Vidal Alegría, Ginna Leyton Yela

Competencias Tecnológicas Docentes en Contextos Rurales: Estrategias para Promover la Equidad Digital 224
Technological Competencies for Teachers in Rural Contexts: Strategies to Promote Digital Equity
Nayade Vanessa Domenech Polo, Jefferson Xavier Gualoto Garcia, Marisela Giraldo De López

Balanceamento Incremental de Distribuição de Classes 232
Incremental Class Distribution Balancing
Rafael Nink de Carvalho, Simone de Lima Martins, Alexandre Plastino de Carvalho

TIC y Educación de Calidad: Evaluación de su Impacto en el Proceso de Enseñanza-Aprendizaje en el Contexto Preuniversitario 239
ICT and Quality Education: Evaluating Their Impact on the Teaching-Learning Process in the Pre-University Context
Nayade Vanessa Domenech Polo, Santiago Fernando Pineda Rosales, Xiomara Josefina Bastardo Contreras

Detecção de Escravidão Moderna em Cadeias de Suprimentos via Conexões Societárias Ocultas com uso de OSINT e Graph Databases 245
Modern Slavery Detection in Supply Chains via Hidden Corporate Links using OSINT and Graph Databases
Lucas Afonso da Silva, José Alberto Sousa Torres, Elena Javidi da Costa, João Paulo Javidi da Costa, Robson de Oliveira Albuquerque e Fábio Lúcio Lopes de Mendonça

Classificação de Imagética Motora para Controle de Órtese de Mão com EEG de Baixa Densidade e Aprendizado Profundo 251
Motor Imagery Classification for Hand Orthosis Control Using Low-Density EEG and Deep Learning
Matheus Henrique Kovalski, Alejandro Rafael Garcia Ramirez

Desafíos y etapas en el diseño y clasificación de un conjunto de datos de caliza utilizando métodos inteligentes 257
Actividades experimentales en la industria de la piedra caliza.
Challenges and stages in the design and classification of a limestone dataset using intelligent methods
Experimental activities in the limestone industry
Marco Tereso, Ricardo Vardasca, Fernando Bento, António Pratas, Luís Rato, Teresa Gonçalves

Efetividade Operacional do Monitoramento de Radiofrequência na Detecção de VANTs Estudo Comparativo Brasil – Malásia 263
Operational Effectiveness of Radio Frequency Monitoring in UAV Detection A Comparative Brazil – Malaysia Study
Fausto Henrique Oliveira Pinto Nadiceo Cecílio Dalledone, Daniel Alves da Silva, Fábio Lúcio Lopes de Mendonça, Georges Daniel Amvame Nze, Marilia Cristina Sassim Jesus, Mauri Sudário Ferreira Dantas

Modelo de coproducción de conocimiento de apoyo a la gestión del conocimiento 269
Knowledge co-production model to support knowledge management
Víctor Hugo Medina García, Tatiana González Urrego, Karen Adriana Ramirez Amortegui

Chegou a hora do Marketing AI 275
Aplica*ção da* Inteligência Artificial no Marketing
The time of Marketing AI is arrived
Application of Artificial Intelligence in Marketing
Fábio João Simões Mendes, Marco Filipe Martins Rodrigues, Anabela Maria Bello de Figueiredo Marcos

Como alcançar o sucesso digital nas empresas através das métricas de marketing 280
How to achieve digital success in companies through marketing metrics
Micaela Cardoso, *Britney Lalgi, Leandra Ribeiro, Mónica Tavares, Anabela de Figueiredo Marcos*

Segmentación y estimación de volumen hepático en imágenes CT
Liver Segmentation and Volume Assessment from CT images

Joaquín Olivares
Instituto Maimónides de Investigación
Biomédica de Córdoba (IMIBIC)
Universidad de Córdoba
Córdoba, Spain
olivares@uco.es

Juan Gómez-Luna
NVIDIA
Zurich, Switzerland
jgomezluna@nvidia.com

***Resumen* — Proponemos una técnica optimizada en GPU para la segmentación y estimación del volumen del hígado en imágenes de Tomografía Computerizada (CT). La propuesta resuelve dos cuellos de botella habituales en los flujos de trabajo clínicos: el gran volumen de datos irrelevantes fuera del órgano de interés y el elevado coste computacional de los algoritmos de segmentación, especialmente los basados en Deep Learning (DL). El método recorta la información irrelevante en imágenes 3D a nivel de vóxel, el algoritmo paralelizado calcula automáticamente un cubo mínimo que contiene el hígado mediante operaciones atómicas sobre las coordenadas de los vóxeles candidatos. Sobre el volumen recortado se aplican tanto métodos clásicos (Chan-Vese, *seeded region growing* 3D) como una arquitectura U-net, reduciendo el espacio de búsqueda y la carga de memoria. Los experimentos se han realizado sobre el conjunto LiTS, muestran que el recorte basado en vóxeles elimina de media un 90 % de los datos y acelera los cálculos en torno a 1,4×. Se consigue estimar el volumen de un órgano en menos de 1s en GPUs de gama media. En segmentación, se alcanzan valores de *Dice* ≈0,96, comparables o superiores al estado del arte, manteniendo una mayor interpretabilidad que las soluciones basadas en DL. La técnica es extensible a otros órganos.**

Palabras **Clave – segmentación; volumen; hígado; imagen médica; computación de altas prestaciones, GPU.**

***Abstract* — We propose a GPU-resident voxel-level ROI cropping method for liver Computed Tomography (CT) that reduces irrelevant data by about 90% before downstream segmentation and volumetric analysis. The contribution is not a new liver segmentation model per se, but an efficient parallel cropping stage that reduces memory movement and computational load while preserving segmentation quality. Integrated with Chan–Vese, U-net, and 3D seeded region growing, the method enables competitive Dice scores (up to ≈0.96), approximately 1.4× faster segmentation, and sub-second liver volume estimation on a mid-range GPU. Chan-Vese, seeded region growing 3D methods and a U-net architecture are applied to the cropped volume, reducing search space and memory load. Results are comparable to or better than the state of the art, while maintaining greater explainability than DL-based solutions. The technique is extensible to other organs.**

Keywords – segmentation, volume assessment; liver; medical imaging, high performance computing, GPU.

I. Introducción

La segmentación automática del hígado y la estimación precisa de su volumen a partir de tomografía computarizada (CT) son pasos clave en la planificación de resecciones hepáticas, la evaluación de la respuesta al tratamiento y la selección de donantes para trasplante. Las enfermedades hepáticas están en aumento a escala global [1] y el cáncer de hígado ocupa aproximadamente el sexto lugar en incidencia y el cuarto en mortalidad entre todos los tumores [2], de modo que disponer de medidas volumétricas fiables y reproducibles resulta esencial para apoyar la decisión clínica.

La CT sigue siendo una de las modalidades de imagen de referencia para el estudio del hígado y sus lesiones [3], siendo también un referente la modalidad cruzada a partir de CT y resonancia magnética (MR)[4]. Sin embargo, la segmentación hepática continúa siendo una tarea compleja. La variabilidad anatómica del órgano, las alteraciones morfológicas asociadas a la enfermedad y el bajo contraste con estructuras adyacentes dificultan la definición de contornos precisos [5]. Además, los volúmenes CT incluyen grandes regiones que no pertenecen al órgano de interés, lo que incrementa de forma innecesaria el coste computacional y puede degradar la precisión de los algoritmos de segmentación cuando operan sobre el volumen completo.

Los métodos de segmentación hepática se agrupan habitualmente en enfoques "tradicionales" y métodos basados en aprendizaje profundo. Entre los primeros, el crecimiento de regiones (*Seeded Region Growing – SRG*) se ha utilizado ampliamente tanto para segmentación como para estimación volumétrica en 3D [6–9]. También se han utilizado algoritmos clásicos de visión por computador, como el cálculo de *b-splines* [10], contornos [13] o biometría [38]. En paralelo, las redes neuronales convolucionales han ganado un protagonismo notable; la arquitectura U-net es ya un estándar de facto en segmentación biomédica [11,12]. No obstante, en el contexto hepático, U-net puede llegar a segmentar tejido fuera de los límites reales del órgano [11], mientras que enfoques clásicos como Chan–Vese resultan computacionalmente costosos cuando se aplican sobre

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

volúmenes completos con abundante información irrelevante [14]. Recientemente se han popularizo los modelos basados en DL [39–41], aunque cabe considerar, que no son interpretables, lo cual es especialmente importante en entornos clínicos.

Los métodos de aprendizaje profundo requieren, además, grandes conjuntos de datos anotados, normalmente sobre volúmenes CT completos [15]. En segmentación hepática, la disponibilidad de bases de datos etiquetadas sigue siendo limitada: el conjunto LiTS es uno de los más utilizados y solo proporciona 131 hígados con anotación de referencia [16]. Muchas propuestas recientes de alto rendimiento se apoyan en LiTS [17,18] y alcanzan métricas muy competitivas, pero su elevada demanda de cómputo y de datos anotados limita su adopción en entornos con recursos restringidos o que requieren respuesta en tiempo real.

Diversos trabajos han señalado que centrarse explícitamente en una región de interés (RoI) puede reducir el coste computacional sin degradar la calidad de la segmentación [19]. El procesamiento de imágenes médicas implica manejar grandes cantidades de datos, con una carga significativa sobre la jerarquía de memoria [20], y en ejecución sobre GPU la memoria disponible puede no ser suficiente para manejar volúmenes completos con algoritmos complejos [21]. Reducir la cantidad de datos a procesar antes de la segmentación resulta, por tanto, especialmente atractivo.

Los trabajos previos sobre recorte y selección de una RoI en imagen médica muestran que esta etapa puede ser tan crítica como el propio algoritmo de segmentación. El recorte permite concentrar el procesamiento en el órgano objetivo y reducir tanto el volumen de datos como las transferencias de memoria, pero encontrar automáticamente una RoI fiable no es trivial: en las CT hepáticas la calidad de imagen puede ser baja y los bordes del hígado aparecer difuminados, lo que dificulta una detección robusta del contorno [24]. En este contexto, se han propuesto distintas estrategias para mejorar la segmentación global del hígado y sus lesiones sin abordar de forma específica la eficiencia del recorte. Por ejemplo, en [25] plantean un modelo robusto capaz de mantener una alta precisión incluso cuando existe un solapamiento incompleto de las lesiones hepáticas entre distintas fases de adquisición, mientras que en [26] combinan bloques *Transformer* y CNN en una red 3D con aprendizaje multiescala de características para mejorar la segmentación volumétrica. Otros trabajos recientes exploran variantes de U-net con convoluciones dilatadas y estructuras densas [28], métodos de segmentación basados en k-means que mejoran el rendimiento frente al crecimiento de regiones [29], arquitecturas Attention UNet++ y conexiones densas [30] o redes con atención multiescala que integran de forma adaptativa dependencias locales y globales [31]. Gul et al. ofrecen una revisión amplia de las técnicas de DL para segmentación de hígado y detección de tumores hepáticos, incluyendo sus métricas de evaluación más habituales [19]. Dichos trabajos demuestran un avance significativo en la precisión de la segmentación, pero procesan abundante información irrelevante y elevadas cargas en transferencias de memoria CPU–GPU. Además, la mayoría no son interpretables.

Smistad et al. abordan el problema del recorte paralelo como paso previo a la segmentación, proponiendo un algoritmo de recorte que se ejecuta de forma paralela sobre GPU [23,27]. En su enfoque, las imágenes médicas se recortan primero en CPU, que reserva memoria del tamaño del volumen recortado y copia los datos a la GPU; a continuación, se aplica un crecimiento de regiones para la segmentación [23]. Esta estrategia, aunque reduce parcialmente el volumen de datos a procesar, sigue dependiendo de transferencias intermedias entre CPU y GPU y de un esquema de recorte por cortes (*slice-based parallel cropping*). El algoritmo en 3D requiere varias invocaciones de kernel: tres para estimar los puntos de recorte y una adicional para generar el volumen recortado dentro de dichos límites, lo que introduce sobrecoste y complejidad en la gestión de memoria [23]. Además, se trata de un enfoque no basado en hilos persistentes (non-PT), de modo que la asignación de trabajo a los hilos no explota plenamente la persistencia y el patrón de bucle grid-stride que permiten reutilizar bloques de cómputo sobre grandes volúmenes de datos. Estas limitaciones motivan la necesidad de un esquema de cropping plenamente paralelo, a nivel de vóxel y residente en GPU, que reduzca tanto el número de llamadas a kernel como las transferencias de memoria, y que pueda integrarse de forma eficiente en un flujo de trabajo completo de segmentación y estimación volumétrica hepática.

La contribución principal del trabajo no es sólo proponer un nuevo algoritmo de segmentación hepática, sino proponer un esquema de recorte 3D a nivel de vóxel que reduce de forma drástica la información irrelevante antes de la segmentación y de la estimación volumétrica. En particular, las contribuciones son: (i) un método de localización y recorte de la RoI basado en *persistent threads*, bucles *grid-stride* y operaciones atómicas [22]; (ii) la integración de dicho recorte con técnicas clásicas e interpretables, como Chan–Vese y SRG-3D [14], y con una arquitectura U-net [17], evaluando su impacto sobre precisión y coste computacional; y (iii) una validación experimental sobre el conjunto LiTS [16] que muestra que el recorte reduce en torno al 90% de los datos irrelevantes y acelera el flujo de trabajo sin degradar la calidad de la segmentación. Nuestra propuesta es una alternativa eficiente e interpretable en entornos clínicos con restricciones de tiempo y recursos.

El resto del documento está estructurado de la siguiente manera. La sección II explica el algoritmo de recorte, la evaluación del rendimiento basada en la calidad de la segmentación hepática y la aceleración se analiza en la sección III. La sección IV se dedica a la estimación volumétrica del órgano. Finalmente, en la sección V resume los resultados y las principales conclusiones del artículo, así como introduce los retos y trabajos futuros.

II. Algoritmo de recorte

El objetivo de la etapa de recorte es reducir de forma drástica la cantidad de datos que deben procesarse en GPU, manteniendo intacta la RoI correspondiente al hígado. La memoria disponible en GPU es limitada, y las operaciones matriciales son computacionalmente exigentes [32]; los volúmenes CT hepáticos contienen una gran proporción de vóxeles que no pertenecen al órgano de interés. Procesar el volumen completo implica un coste innecesario en memoria, transferencia de datos y tiempo de cómputo [19,23].

Frente al enfoque clásico de Smistad et al., basado en un recorte paralelo por cortes (slice-based parallel cropping) con

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

múltiples invocaciones de *kernels* y transferencias intermedias CPU–GPU [23,27], en este trabajo se propone un algoritmo de recorte plenamente paralelo a nivel de vóxel, residente en GPU, y diseñado siguiendo el modelo de *Persistent Threads* (PT) [22]. En este esquema, un conjunto de hilos de procesamiento se mantiene activo y recorre el volumen mediante bucles *grid-stride*, de forma que cada hilo procesa varios vóxeles de manera iterativa, maximizando la ocupación de la GPU, reduciendo la sobrecarga de planificación y el uso de memoria.

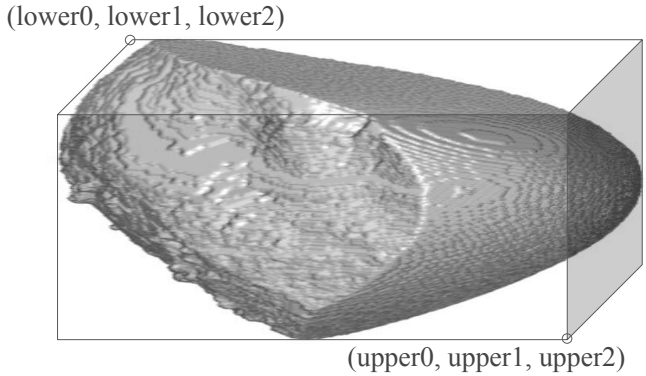


Figura 1. Volumen hepático dentro de un *Cuboid*

El algoritmo realiza los siguientes pasos:

1) Selección de puntos de corte: En la Fig. 1 se muestra como el hígado se confina en un espacio rectangular *(Cuboid)* alineado con los ejes de la imagen, definido por dos puntos diagonalmente opuestos: un punto inferior *(lower)* y otro superior *(upper)*. En función de la calidad de la fuente, los puntos se seleccionan de forma automática o semiautomática.

a) Modo semiautomático: En las CT hepáticas de baja calidad, el hígado puede presentar bordes poco definidos, artefactos o contraste insuficiente, lo que dificulta localizar automáticamente la RoI. El clínico experto se limita a marcar en el visor *DICOM* los dos puntos que contienen el hígado, sin necesidad de una delineación manual del contorno hepático. El recorte se realiza de forma automática en los casos en que se cuenta con un volumen binarizado.

b) Modo automático: Se lanza un kernel PT de localización de la RoI que recorre todos los vóxeles en paralelo. Para cada vóxel, si el valor de intensidad se encuentra dentro del rango de interés se actualizan los extremos del cubo usando operaciones atómicas *(atomicMin y atomicMax)*. Gracias a estas operaciones atómicas, múltiples hilos pueden contribuir concurrentemente a determinar las coordenadas mínimas y máximas de la RoI, incluso cuando procesan vóxeles vecinos.

2) Cálculo del tamaño del recorte a partir de los puntos inferior y superior, y se reserva de memoria en la GPU un búfer lineal para almacenar los vóxeles del volumen recortado.

3) Kernel de copia paralela: La CPU lanza un kernel PT en GPU que recorre en paralelo las coordenadas del volumen recortado copiándolo en el búfer lineal reservado en la GPU.

Con este diseño no es preciso realizar recortes previos en CPU ni transferencias intermedias de subvolúmenes, lo que contrasta con las cuatro invocaciones de kernel y los pasos CPU–GPU del enfoque slice-based de Smistad et al. [23,27]. El resultado es un recorte 3D a nivel de vóxel más eficiente, que se integra de forma natural en el flujo de trabajo posterior de segmentación y crecimiento de regiones 3D para la evaluación del volumen hepático.

La elección de un esquema basado en *persistent threads* y bucles *grid-stride*, en lugar de una secuencia de kernels convencionales más especializados, responde a dos razones principales. En primer lugar, permite recorrer volúmenes 3D de gran tamaño con un conjunto fijo de hilos, reutilizando los mismos bloques de cómputo y reduciendo la sobrecarga de planificación. En segundo lugar, este patrón se adapta especialmente bien a la localización de la RoI y a la copia del subvolumen recortado, donde la carga útil efectiva es irregular y sólo una fracción del volumen original debe materializarse en memoria. La supresión de datos irrelevantes se traduce en menos datos procesados y en una disminución efectiva del tráfico de memoria y del número de invocaciones de kernel.

III. Segmentación hepática

En esta sección describimos cómo se integra el recorte en la cadena de segmentación hepática y los dos modelos empleados: un método clásico basado en Chan–Vese y una red convolucional tipo U-net. El objetivo es analizar de forma controlada el impacto del recorte paralelo sobre la precisión y el coste computacional de la segmentación.

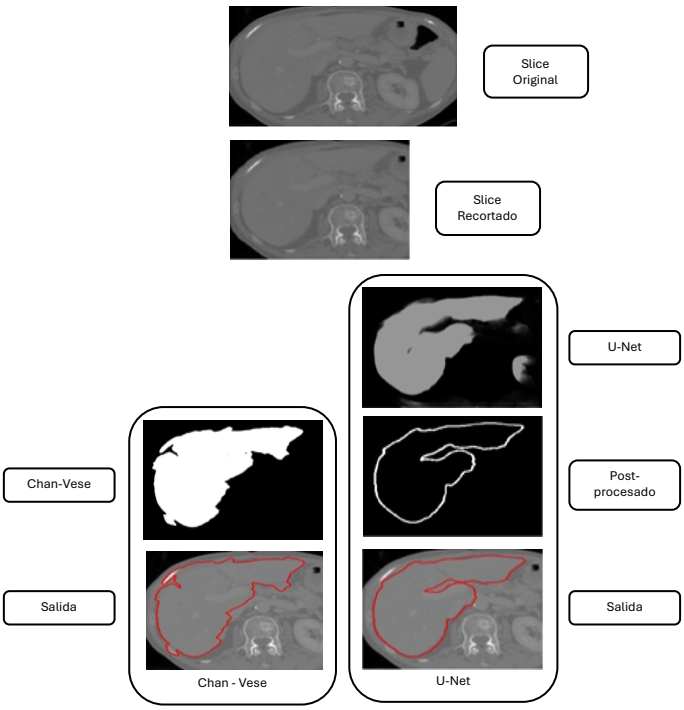


Figura 2. Flujo de procesamiento para la segmentación.

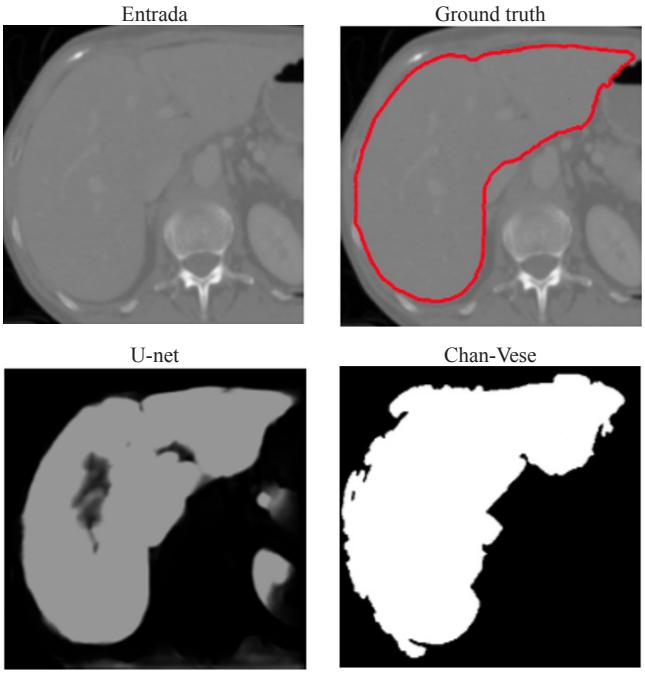
2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

El flujo de segmentación parte de volúmenes de CT abdominal con anotaciones manuales de hígado realizadas por expertos. Cada volumen se descompone en cortes axiales de tamaño 512×512 denominados *Slices*. Se muestra en la Fig. 2.

1) Chan–Vese es un esquema de segmentación por contornos activos sin borde explícito. Empleamos una implementación optimizada para GPU y validada clínicamente de forma previa [14]. El método representa el contorno como una función nivel-set y evoluciona dicha función minimizando una energía que penaliza la discrepancia entre la intensidad de la región interior y exterior al contorno, junto con términos de regularización de la longitud de frontera y, cuando procede aplica un suavizado.

2) U-net es una red convolucional ampliamente utilizada en segmentación biomédica [11]. Se emplea una arquitectura 2D con ramas de codificación y decodificación simétricas y conexiones de salto, entrenada sobre 131 volúmenes de hígado (58638 cortes) procedentes del conjunto de datos LiTS (Liver Tumor Segmentation Challenge) [16]. El entrenamiento se realiza sobre cortes originales de tamaño fijo, utilizando las máscaras hepáticas de LiTS como referencia. En fase de inferencia, el modelo se evalúa sobre cortes *(slices)* originales de CT, y cortes con información innecesaria recortada.

Dado que la U-net exige un tamaño de entrada fijo, las imágenes recortadas se redimensionan al tamaño de entrenamiento antes de ser introducidas en la red. Aunque este reescalado puede afectar a la precisión, permite evaluar de forma clara el efecto del recorte manteniendo inalterado el modelo [11,16]. En la Fig. 3 se muestra un ejemplo.



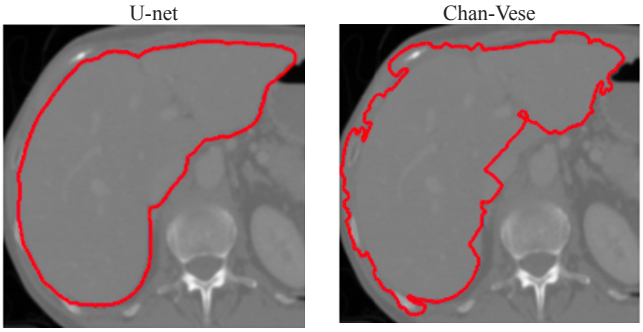


Figura 3. Resultados utilizando U-net y Chan-Vese.

Un problema conocido de U-net en este contexto es la segmentación espuria fuera del hígado cuando se procesan imágenes completas del abdomen [11,33]. Para mitigar este efecto, tras la inferencia aplicamos un postprocesado morfológico que: a) Calcula las componentes conexas de la máscara binaria producida por la red. b) Selecciona de forma supervisada la componente de mayor tamaño (hígado) c) Descarta el resto de componentes menores, típicamente correspondientes a falsos positivos dispersos.

Los experimentos se han realizado sobre una NVIDIA GPU GeForce GTX 1050 con 4GB RAM 4GB. Los resultados se presentan en las Tablas I y II.

TABELA I. Resultados de segmentación para Chan-Vese

Chan-Vese	**Dice Score**		**Time (ms)**		**Speed-up**
Volume (512x512)	**Original**	**Recortado**	**Original**	**Recortado**	
Average	0.938	0.960	791	571	x1.4
Std. Dev.	0.006	0.005	58	38	0.1

Tabela II. Resultados de segmentación para U-net

U-net	**Dice Score**		**Dice Score Postprocesado**	
Volume	**Original**	**Recortado**	**Original**	**Recortado**
Promedio	0.521	0.431	0.940	0.956
Desv. Est.	0.025	0.040	0.006	0.006

IV. Medida del volumen hepático

El segundo gran bloque de la metodología se centra en la evaluación tridimensional del volumen hepático a partir de los volúmenes segmentados. El objetivo es obtener una estimación de volumen lo más precisa y eficiente posible. Para ello, se combina el algoritmo de recorte con otro de crecimiento de regiones 3D (*Seeded Region Growing*, SRG-3D) implementado en GPU mediante hilos persistentes (*Persistent Threads* – PT) y la técnica de *kernel termination & relaunch* (KTRL) [34].

En primer lugar, la CPU transfiere el volumen CT completo a la GPU. A continuación, se aplica el algoritmo de recorte automático basado en vóxeles descrito en la Sección 3, en una única pasada se determinan las coordenadas de los puntos diagonalmente opuestos del cubo mínimo que contiene todos

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

los vóxeles de interés (máscara binaria de hígado). A partir de estos puntos se genera un volumen recortado compacto, que constituye la región de interés (RoI) sobre la que se realizará el crecimiento de regiones 3D. Este preprocesado elimina una fracción muy elevada de vóxeles irrelevantes y reduce tanto el coste de memoria como el número de accesos a memoria global durante la etapa de segmentación volumétrica.

Sobre la RoI recortada se ejecuta el algoritmo de SRG en paralelo. Partiendo de la máscara binaria del hígado, el sistema determina automáticamente un punto semilla situado en el interior del órgano. El SRG explora entonces el vecindario 3D de la semilla (conectividad 6, 18 o 26, según configuración) y va agregando de forma iterativa todos los vóxeles conectados que cumplen el criterio de a la máscara binaria del hígado. Esta exploración se implementa con PT y KTRL:

Se lanza un *kernel* que procesa en paralelo frentes de crecimiento almacenados en memoria compartida. Cuando un *kernel* agota su conjunto actual de vóxeles frontera, se termina y se relanza un nuevo *kernel* si aún quedan elementos pendientes, reutilizando los mismos bloques de cómputo. Este esquema KTRL permite recorrer de forma eficiente vecindarios 3D extensos sin desbordar la memoria de la GPU y manteniendo una alta ocupación de hilos [34]. Una vez completado el crecimiento de región, se obtiene una máscara 3D etiquetada en la que todos los vóxeles del hígado dentro de la RoI recortada comparten un mismo identificador de componente. La estimación de volumen se realiza entonces de forma directa multiplicando el número de vóxeles etiquetados por el tamaño físico de vóxel según los metadatos DICOM.

El pipeline completo de evaluación de volumen 3D puede resumirse en los siguientes pasos:

a) Transferencia del volumen CT desde la CPU a la GPU.

b) Recorte y obtención de la RoI hepática.

c) SRG-3D basado en PT y KTRL sobre la RoI.

d) Cálculo del volumen hepático.

e) Transferencia a CPU del resultado y el órgano en 3D.

TABELA III. Resultados volumétricos

Tamaño (vóxeles)	**Tamaño recortado (vóxeles)**	**Vóxeles de hígado en el Cuboid**	**% Datos no necesarios**	**Tiempo de cálculo (s)**
512x512x816	285x229x190	3097775	91.47	0.55
512x512x629	264x242x227	3681197	89.19	0.63
512x512x671	326x290x233	4588020	84.83	1.08
512x512x722	305x257x300	5710514	84.89	1.28
512x512x841	344x203x264	4068110	87.63	0.98
512x512x771	290x228x249	3140419	89.95	0.96
512x512x836	308x271x180	3373371	91.97	0.68
512x512x751	253x262x190	2781767	92.30	0.55
512x512x756	284x220x195	3120233	92.67	0.61
512x512x856	186x252x203	1092424	95.18	0.49
Promedio			90.01	0.78
Desviación estándar			3.40	0.27

En la Tabla 3 se muestran los resultados experimentales tras evaluar 10 volúmenes hepáticos. La primera columna muestra el tamaño original en vóxeles, entendiéndose 512x512 el tamaño del *Slice*, mientras que el tercer componente corresponde al número de *Slices* que componen ese órgano. El porcentaje de datos innecesarios (90%) se refiere a la diferencia porcentual entre el volumen original y el recortado.

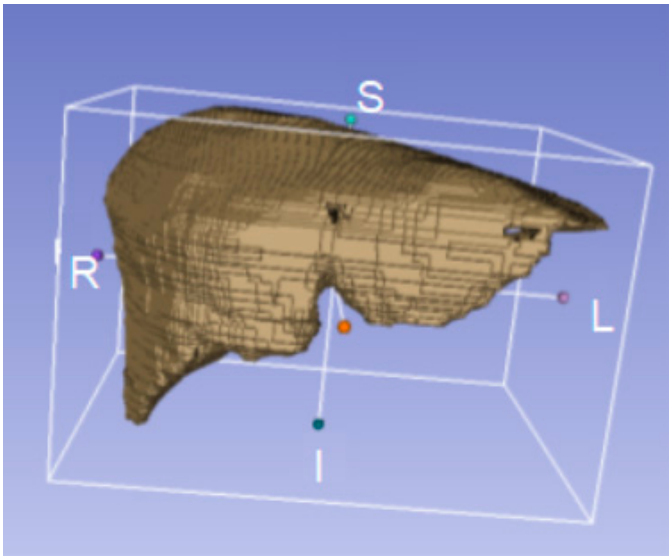


Figura 4. Reconstrucción 3D de un hígado dentro del Cuboid.

V. Conclusión y trabajos futuros

En este trabajo hemos presentado un esquema de *recorte optimizado en* GPU, diseñado para reducir drásticamente los datos irrelevantes en CT hepáticas y mejorar, tanto en precisión como en tiempo de cómputo, la segmentación del hígado y la evaluación tridimensional de su volumen. Se ha probado con técnicas interpretables (Chan-Vese) y basadas en DL (U-net).

Los resultados en segmentación hepática son mejores en calidad aplicando el recorte. Entre U-net y Chan-Vese son muy similares, sin embargo, U-net no es interpretable y requiere supervisión, pues se asume que la mayor sección detectada es el hígado, y esto puede ser falso en los extremos. Chan-Vese mejora la robustez frente al ruido, pero es altamente demandante de cómputo, especialmente cuando se trata de grandes imágenes médicas, por lo que se beneficia del recorte. La segmentación obtenida se puede mejorar si existen imágenes de CT y RM, que permitirán realzar el contraste del hígado [14].

Los resultados del cálculo del volumen hepático demuestran que el recorte seguido de SRG-3D son una técnica clave para eliminar elementos irrelevantes de las imágenes reduciendo en un 90 ± 3,4 % el cómputo de datos innecesarios. Esto conlleva evitar la necesidad de evitar transferencias intermedias CPU–GPU debidas al tamaño de la memoria en GPU. Los resultados muestran que el modelo U-net produce segmentaciones espurias fuera del hígado, requiriendo un filtrado posterior supervisado para eliminar estas regiones no deseadas.

Los algoritmos de procesamiento de imágenes se caracterizan por realizar operaciones sencillas de forma altamente paralelizable, siendo especialmente susceptibles de implementar

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

en arquitecturas GPU [32] y FPGA [35] especializadas en operaciones basadas en matrices. A futuro, sería muy interesante evaluar estos algoritmos en arquitecturas de Procesamiento en Memoria (PIM) [36] y también aplicando aritméticas bit-serial en PIM [37].

El esquema de evaluación volumétrica no se limita al hígado, pudiendo aplicarse en otros tipos de órganos blandos, como vasos, piel y pulmón. Un estudio experimental sobre la base de datos 3DIRCADb [42] demuestra que las técnicas presentadas aceleran de forma consistente las etapas de preprocesado y estimación de volumen frente a los enfoques clásicos basados en recorte por cortes, lo que confirma la generalización del método a otras anatomías más allá del hígado [33].

Agradecimientos

El trabajo cuenta con el apoyo de los proyectos: *"(DESIDERIO-2) DEsarrollo de SIstemas DEep-learning, Robótica e IOt"*, PPIT_2025_2_103282, y PP-RC-OPI-HIPERNAV. *"IoT Next Generation: Towards 2030 Horizon"* de la Universidad de Córdoba. Agradecemos a *The Intervention Centre, Oslo University Hospital,* las imágenes médicas y la validación clínica (*Ground truth)* para la segmentación hepática.

Referencias Bibliográficas

[1] C. Cassinotto, et al., Radiofrequency ablation of liver tumors: no difference in the ablation zone volume between cirrhotic and healthy liver, Cardiovascular and Interventional Radiology 41 (6) (2018) 905–911.

[2] F. Bray, et al., Global cancer statistics 2018: Globocan estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries, CA: A Cancer Journal for Clinicians 68 (6) (2018) 394–424.

[3] D. Wei, et al., A review of advancements and challenges in liver segmentation, Journal of Imaging 10 (8) (2024).

[4] R. Naseem, et al. "Cross-modality guided contrast enhancement for improved liver tumor image segmentation" IEEE Access vol. 9, (2021) pp. 118154 – 118167.

[5] J.-J. Chen, et al., Liver hydatid CT image segmentation based on localizing region active contours and modified parametric active contours (2014) 217–221. doi:10.1109/BMEI.2014.7002773.

[6] N. Satpute, et al., GPU acceleration of liver enhancement for tumor segmentation, Computer Methods and Programs in Biomedicine 184 (2020) 105285. doi:https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2019.105285.

[7] N. Satpute, et al., Fast parallel vessel segmentation, Computer Methods and Programs in Biomedicine 192 (2020) 105430. doi:https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2020.105430.

[8] R. Palomar, et al., A novel method for planning liver resections using deformable Bézier surfaces and distance maps, Computer Methods and Programs in Biomedicine 144 (2017) 135–145.

[9] Y. Zhou, et al., D-UNet: A dimension-fusion U shape network for chronic stroke lesion segmentation, IEEE/ACM Transactions on Computational Biology and Bioinformatics 18 (3) (2021) 940–950. doi:10.1109/TCBB.2019.2939522.

[10] O. Zachariadis, et al. Accelerating B-spline interpolation on GPUs: Application to medical image registration, Computer Methods and Programs in Biomedicine 193 (2020) 105431.

[11] O. Ronneberger, et al., U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, in: Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI), Vol. 9351 of LNCS, 2015, pp. 234–241.

[12] H. Abdel-Nabi, et al., A multi-scale 3-stacked-layer coned U-net framework for tumor segmentation in whole slide images, Biomedical Signal Processing and Control, 86 (2023) 105273.

[13] R Palomar, et al., Parallelizing and Optimizing LIP-Canny Using NVIDIA CUDA, Trends in Applied Intelligent Systems. IEA/AIE 2010. Lecture Notes in Computer Science, vol 6098. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-13033-5_40

[14] N. Satpute, et al., Accelerating Chan–Vese model with cross-modality guided contrast enhancement for liver segmentation, Computers in Biology and Medicine 124 (2020) 103930. doi:https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2020.103930.

[15] P. V. Nayantara, et al., Computer-aided diagnosis of liver lesions using CT images: A systematic review, Computers in Biology and Medicine 127 (2020). doi:10.1016/j.compbiomed.2020.104035.

[16] P. Christ, et al., LiTS – Liver Tumor Segmentation Challenge, ISBI and MICCAI (2017). URL: https://competitions.codalab.org/competitions/17094

[17] L. Jiang, et al., RMAU-net: Residual multi-scale attention U-net for liver and tumor segmentation in CT images, Computers in Biology and Medicine 158 (2023) 106838.

[18] Y. Chen, et al., A deep residual attention-based U-net with a biplane joint method for liver segmentation from CT scans, Computers in Biology and Medicine 152 (2023) 106421.

[19] S. Gul, et al., Deep learning techniques for liver and liver tumor segmentation: A review, Computers in Biology and Medicine 147 (2022) 105620.

[20] Palomar et al. High-performance computation of Bézier surfaces on parallel and heterogeneous platforms. *International Journal of Parallel Programming*, 46 (2018), 1035–1062. https://doi.org/10.1007/s10766-017-0506-1

[21] Liu et al. CVCL: Context-aware voxel-wise contrastive learning for label-efficient multi-organ segmentation. *Computers in Biology and Medicine*, 160 (2023), 106995.

[22] Gupta et al. A study of persistent threads style GPU programming for GPGPU workloads. In: *Innovative Parallel Computing – Foundations & Applications of GPU, Manycore, and Heterogeneous Systems (INPAR 2012)*. IEEE, 2012, pp. 1–14.

[23] Smistad et al. GPU accelerated segmentation and centerline extraction of tubular structures from medical images. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 9(4) (2014), 561–575.

[24] Lin et al. CFANet: Context fusing attentional network for preoperative CT image segmentation in robotic surgery. *Computers in Biology and Medicine*, 171 (2024), 108115.

[25] Yu et al. Reciprocal cross-modal guidance for liver lesion segmentation from multiple phases under incomplete overlap. *Biomedical Signal Processing and Control*, 88 (2024), 105561.

[26] Ao et al. Ms-tcnet: An effective transformer–cnn combined network using multi-scale feature learning for 3d medical image segmentation, Computers in Biology and Medicine 170 (2024) 108057.

[27] Smistad et al. Seeded region growing, https://github.com/smistad/FAST/tree/master/source/FAST/Algorithms/ (2015).

[28] Tran et al. A multiple layer U-net, UN-net, for liver and liver tumor segmentation in CT, IEEE Access 9 (2021) 3752–3764. doi:10.1109/ACCESS.2020.3047861.

[29] Liu et al. CT image segmentation method of liver tumor based on artificial intelligence enabled medical imaging, Mathematical Problems in Engineering (2021).

[30] Li et al. Attention U-net++: A nested attention-aware U-net for liver CF image segmentation, in: 2020 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 2020, pp. 345–349.

[31] Fan et al. Ma-net: A multi-scale attention network for liver and tumor segmentation, IEEE Access 8 (2020) 179656–179665.

[32] O. Zachariadis, et al., Accelerating Sparse Matrix-Matrix Multiplication with GPU Tensor Cores. Computers Methods and Programs in Biomedicine, 193, (2020) 105431.

[33] Satpute, N, et al.. Explainable Liver Segmentation and Volume Assessment Using Parallel Cropping. Applied Sciences 15 (14), 7807 (2025)

[34] Huang et al. Robust extraction for low-contrast liver tumors using modified adaptive likelihood estimation, International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery 13 (10) (2018) 1565–1578.

[35] J. Olivares, et al. Minimum Sum of Absolute Differences Implementation in a Single FPGA Device. Field Programmable Logic and Application. Lecture Notes in Computer Science, vol 3203 (2004).

[36] H. Martínez et al. In-Memory Operators for Medical Image Processing. Future Generation Computer Systems. Vol 174, (2026) 107939.

[37] G.F. Oliveira et al., Proteus: Enabling High-Performance Processing-Using-DRAM with Dynamic Bit-Precision, Adaptive Data Representation, and Flexible Arithmetic, in: Proceedings of the 39th ACM International Conference on Supercomputing, 2025, pp. 473 – 494.

[38] FJ. Rodriguez-Lozano, et al., Non-Invasive Forehead Segmentation in Thermographic Imaging. Sensors vol. 19, 4096 (2019).

[39] Z. Chen, et al., Enhanced Liver and Tumor Segmentation Using a Self-Supervised Swin-Transformer-Based Framework with Multitask Learning and Attention Mechanisms. Applied Sciences 2025, 15.
[40] WM. Idress, et al., DRDA-Net: Deep Residual Dual-Attention Network with Multi-Scale Approach for Enhancing Liver and Tumor Segmentation from CT Images. Applied Sciences 2025, 15.
[41] Muhammad, S.; Zhang, J. Segmentation of Liver Tumors by Monai and PyTorch in CT Images with Deep Learning Techniques. Applied Sciences 2024, 14. https://doi.org/10.3390/app14125144.
[42] L. Soler, et al., 3D ImageReconstruction for Comparison of Algorithm Database. 2010. Available online: https://www.Ircad.Fr/Research/Data-Sets/Liver-Segmentation-3d-Ircadb-01

ISBN: 978-989-36481-2-4

¿Quién es responsable de los efectos de la Inteligencia Artificial? Who is responsible for the effects of Artificial Intelligence?

Ariana Y. Gallardo-Guevara [1], Segundo E. Cieza-Mostacero [1], Claudia E. Mori-Ugarte [1], Raul Y. Lozano-Peralta [1]
[1] Semillero de Investigación Human Right Warrios, Universidad Privada Antenor Orrego
Trujillo, Perú
agallardog1@upao.edu.pe, sciezam1@upao.edu.pe, cmoriu1@upao.edu.pe, rlozanop@upao.edu.pe

***Resumen* —La investigación tuvo por objeto examinar los dilemas éticos que surgen con la implementación de Inteligencia Artificial en los delitos, tanto como su impacto en el derecho; bajo un enfoque cualitativo y deductivo y, siguiendo parámetros del marco de diseño no experimental – descriptivo, se recopiló información analizada de 35 artículos científicos. Sus principales resultados se enfocan en los riesgos que trae la Inteligencia Artificial dentro del derecho, seguido de una recopilación de delitos que se llevan a cabo con el uso indebido de estas herramientas, las jurisdicciones que abordan la responsabilidad penal, los obstáculos que genera al utilizarla al momento de administrar justicia y los usos de estas herramientas que se pueden llevar a cabo en beneficio de la justicia penal. Concluyendo que es evidente que la Inteligencia Artificial con su capacidad de operar de forma autónoma y aprender patrones complejos, plantea interrogantes sobre la atribución de culpa, como la protección de los derechos de los ciudadanos; integrando el concepto de atribuir responsabilidad penal a los desarrolladores o usuarios de esta no solo implica reestructurar el marco normativo, sino también crear principios éticos solidos que resguarden la dignidad humana, en esta encrucijada, el verdadero reto será equilibrar el progreso tecnológico con el compromiso de proteger los derechos y justicia en la era digital.**

Palabras **Clave - Responsabilidad penal; Derecho Penal; Inteligencia Artificial; Ciberseguridad; Cibercrimen.**

***Abstract* —The research aimed to examine the ethical dilemmas that arise with the implementation of Artificial Intelligence in criminal cases, as well as its impact on the law. Using a qualitative and deductive approach, and following the parameters of a non-experimental, descriptive design framework, information was compiled and analyzed from 35 scientific articles. Its main findings focus on the risks that Artificial Intelligence poses within the legal system, followed by a compilation of crimes committed through the misuse of these tools, the jurisdictions that address criminal liability, the obstacles it creates when administering justice, and the potential uses of these tools to benefit criminal justice. The study concludes that it is evident that Artificial Intelligence, with its capacity to operate autonomously and learn complex patterns, raises questions about the attribution of guilt and the protection of citizens' rights. Integrating the concept of attributing criminal responsibility to developers or users of this technology not only implies restructuring the regulatory framework but also creating solid ethical principles that safeguard human dignity. At this crossroads, the real challenge will be to balance technological progress with the commitment to protect rights and justice in the digital age.**

Keywords - Criminal liability; Criminal law; Artificial intelligence; Cyber security; Cyber crime.

I. Introducción

Diferentes obras trataban de explicar el surgimiento de aplicaciones digitales que cumplían el propósito de ayudar a las personas a generar nuevas ideas, oraciones o libros; Los viajes de Gulliver del 1726, 1984 de George Orwell escrita en 1949 o No tengo boca y debo gritar, redactada en 1967. Historias de ciencia ficción que retrataban la realidad de cómo se percibía los proyectos en el futuro, hasta que se crearon pequeños prototipos que pudiera seguir patrones en juegos de mesa, pero a la par se creaba un concepto que serían impactantes y que sería el surgimiento de una investigación que con el tiempo se volvería un proyecto a futuro: Redes Neuronales.

Este concepto nació en los años '36 sobre el funcionamiento del cerebro y una máquina con la capacidad de cumplir la misma función de almacenamiento; en los años 50', esta teoría se hace realidad con la aparición de un modelo llamado Perceptrón que podía replicar patrones; siendo los primeros pasos en camino de la formación de programas que resuelvan problemas matemáticos, partidas de ajedrez u organizadores de libros [1]. Hasta trasladarnos al siglo XXI, se ha ofrecido diferentes aplicaciones digitales con el fin de agilizar algunas actividades con resultados rápidos y eficientes; comenzando a aparecer los primeros programas de almacenamiento de datos, creando nuevas mecánicas de trabajo en diferentes empresas, dejando atrás las excesivas carpetas acumuladas en las estanterías entre montones de papeles y polvo.

Sin embargo, no conforme con eso, se expandieron proyectos para no solo almacenar información, sino crear un modelo digital que permita asesorar a la sociedad en diferentes empresas; es ahí donde nace la inteligencia artificial (IA). La UNESCO en su revista informativa "Artificial Intelligence and Gender Equality", la IA utiliza computadoras para procesar y analizar datos, aplicando reglas conocidas como algoritmos, los cuales se entrenan con grandes cantidades de datos para detectar patrones, predecir resultados, sugerir decisiones y adaptarse a situaciones nuevas [2].

La IA ha transformado múltiples aspectos en la sociedad, desde el sector industrial hasta el doméstico, a través de su de-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

sarrollado sistema autónomo y algoritmos complejos, los cuales han llevado a una mayor dependencia de las tecnologías que plantean nuevos desafíos. Este elemento se ha convertido en una pieza importante para poder permitirle a la sociedad solventar sus dudas; un ejemplo son las páginas web de los bancos que te proporcionan asistentes digitales programados con una base de preguntas claras y rápidas, respondiendo de forma precisa a las dudas de sus clientes [3].

Siempre han existido proyectos que benefician a las personas dependiendo los resultados que necesitan del programa y estos avances alimentan las metas de la industria con el fin de proporcionar apoyo en instituciones más complejas como el orden público; en el ámbito judicial se inicia a implementar sistemas automatizados de toma de decisiones que se basan en algoritmos, cuyo objetivo es agilizar los procesos y garantizar la precisión en la aplicación de la ley [4].

Autores coincidieron que; así como se busca obtener que los programas permitan a las instituciones administradoras de justicia hagan una labor más rápida y eficaz, surge otro problema a la par del crecimiento tecnológico [5]. Han desarrollado un nuevo reto para las instituciones que buscan mantener el orden y castigar las conductas infractoras, esto incluye al hecho de que las personas, con un pensamiento distorsionado, han reconocido que leyes que no son lo suficientemente exigentes en algunas jurisdicciones [6].

Es un hecho que, toda política pública no crece a la par con la realidad moderna y el impacto que estos avances tecnológicos han provocado dentro de la responsabilidad que tiene cada ciudadano frente a una conducta infractora o delictiva. La discusión se centra a como las instituciones deben reaccionar ante el indebido uso de estas herramientas digitales; pues son algoritmos que evolucionan constantemente, y salen al mercado diferentes funciones para crear y manipular imágenes, fotomontajes, modificaciones de voz, entre otros [7].

Esto provoca una vulneración evidente de la identidad, reputación e imagen de cada persona; sumándose también, una aplicación desactualizada de la norma, permitiendo que ciertas conductas sean castigadas con penas mínimas o sean archivadas sin un proceso penal; simple y llanamente, puede ser considerado como una interferencia con el funcionamiento adecuado de los tribunales. Ossadón ha expresado, que la obstrucción de justicia ocurre cuando la persona se niega a proporcionar información relevante, destruir o alterar pruebas [8].

Esta investigación tiene como objetivo explorar los marcos legales en base a la responsabilidad penal en el uso de la IA, siguiendo los pasos hacía una dirección satisfactoria como: (I) Identificar los riesgos que enfrenta el derecho que surgen por usar la IA; (II) Enumerar los delitos que se llevan a cabo con el uso indebido de las inteligencias artificiales; (III) Codificar cómo otras jurisdicciones están abordando la responsabilidad penal en relación con la IA; (IV) Establecer los obstáculos ocasionados por la IA en la administración de justicia; y finalmente, (V) Analizar los usos de las IA en beneficio del derecho.

II. Metodología

El uso de la IA como parte de la responsabilidad penal, ha sido un tema de conversación de poco interés entre los juristas que se han enfocado en problemas que fueron arrastrados durante el año 2000 en adelante; con el propósito de modificar artículos, arreglar ambigüedades y ocupar todos los vacíos legales posibles; a pesar de que se ha expuesto una realidad moderna y tecnológica donde se regula muy poco el grande mercado de programas u algoritmos que son usados para diferentes propósitos.

El impacto que ha generado es tan grande, pero el conocimiento de estas fuentes es tan pequeño, como si fuera únicamente materia de comprensión en la rama ingeniera. Por lo que este trabajo de investigación, bajo un enfoque cualitativo siguiendo parámetros del marco de diseño no experimental – descriptivo cumple con el propósito de explicar la razón necesaria de relacionar las problemáticas, como el uso de instrumentos digitales desde una perspectiva jurídica que beneficie a la población y al sistema legal; donde se parte de un enfoque deductivo.

Las técnicas en este artículo científico fueron aplicadas con la respectiva revisión bibliográfica e instrumentos cuya población fue de 35 artículos recopilados por artículos científicos, doctrina interna y externa; así como normativas legales de diferentes fuentes como Scopus, Redalyc, Scielo, Dialnet; como su técnica es la revisión bibliográfica. Los instrumentos usados fueron fichas bibliográficas evidenciados en un Excel, además, se utilizó el software Zotero para almacenar todos los artículos (se pueden descargar del enlace: https://doi.org/10.6084/m9.figshare.30933464).

II. Resultados

A. *Inteligencia Artificial y sus riesgos dentro del derecho.*

Este tema de creciente interés debido a la rápida expansión de la IA en diversos campos especialmente en ámbitos sensibles como la medicina, el derecho y la conducción autónoma. El Centro Criptológico Nacional estableció que la IA tiene el potencial de cometer ciberdelitos u otros tipos de infracciones, puesto que no solo se limita a ejecutar órdenes, sino que también puede aprender, tomar decisiones y actuar en función de datos y experiencias previas [9].

La IA, especialmente las versiones más avanzadas en Machine Learning, tiene la capacidad de aprender patrones y comportamientos complejos a partir de grandes volúmenes de datos [10]. Esto significa que los sistemas de IA pueden optimizar sus acciones y decisiones a lo largo del tiempo, mejorando sus respuestas en función de la experiencia; esta capacidad de aprender y adaptarse abre la posibilidad de que si la intervención directa de un ser humano, un sistema de IA puede llegar a cometer actos delictivos de manera automática.

El punto gira en torno a como atribuir responsabilidad penal cuando las acciones de un sistema de IA causan daño o infringen la ley; el factor clave es el grado de autonomía que tienen los sistemas de IA, aunque claramente se tiene en conocimiento que el que provoca el daño es quién programa el algoritmo con fines criminales. Si bien estas tecnologías pueden tomar decisiones, no tienen conciencia ni intencionalidad, lo que plantea preguntas sobre como asignar culpa o intención en el sentido penal clásico [11].

Dentro del derecho penal, las acciones de la IA se deben evaluar si las decisiones incorrectas o dañosas son el resultado de errores humanos en el diseño, programación o supervisión de

ISBN: 978-989-36481-2-4

la IA, lo que podría imputarse como negligencia. Se instituyó que el derecho penal generalmente requiere la presencia de dolo (intención) o culpa (negligencia) para imputar responsabilidad; lo cual esto deja a tallar una serie de requisitos o directrices que se requiere valorar para poder utilizar estas herramientas en fases para probar dentro del proceso penal y se puedan aplicar alguna pena o sanción a la persona que dio uso indebido a dicha herramienta digital [4].

Hallevy aludió que existen modelos y los coloca dentro del contexto de los sistemas de IA, el primer modelo que analiza es el de autor a través de un tercer (perpetrador- a través de- otro), el cual se aplica cuando un delito es cometido por una persona que no puede ser considerada responsable penalmente [12], según la ley; pero que ha sido incitada a actuar por un sujeto que sí es penalmente responsable; el segundo modelo es el modelo de consecuencia Natural – probable, donde la responsabilidad penal recae sobre el programador o fabricante de la IA cuando debe prever que la activación del sistema podría causar un delito y aun así, no toma las medidas necesarias para evitarlo.

En base al segundo método, aunque el delito no haya sido premeditado, la comisión del mismo es una consecuencia posible y previsible del uso de la IA. Por lo tanto, la culpa radica en la omisión del programador al no prevenir un riesgo que era evidente desde el diseño del sistema [13]; y el tercer modelo de responsabilidad directa, este sostiene que la IA puede ser considerada responsable por sí misma cuando comete un acto delictivo [12].

Dentro de los aspectos más interesantes sobre el tema de la IA, está la capacidad de tomar decisiones de manera autónoma lo que da la posibilidad de ocultar la identidad del verdadero atacante. Esto ocurre por las decisiones sueles ser ejecutadas por una IA que son difíciles de rastrera hasta la fuente humana que las programó; en algunos casos pueda ser utilizada para cometer un delito, habría una complicación para atribuirle responsabilidades directamente a una persona o grupo, debido que el sistema en sí podría llegar a tomar decisiones que no estaban previstas por sus programadores, añadiendo una capa de complejidad legal al intentar determinar la responsabilidad penal.

Sin embargo, ante la aparición de una amenaza compleja, cada individuo debe tener en cuenta lo siguiente: Una máquina no puede entender cuando tiene una conversación común y genérica o cuando está a un paso de cometer una acción lesiva que tenga una respectiva condena, son los propios usuarios quienes la guían, calificando sus mensajes como positivos o negativos mientras empezaban a moldearla

Entonces ya no se habla netamente de las acciones penales a los que se pueden incurrir con el uso de esta de forma individual, sino también en como un producto es lanzado a un mercado con la más mínima evaluación y seguimiento para evitar alguna clase de daño en los datos personales o la información que las personas otorgan en cada producto.

En el contexto de los ciberdelitos, una IA puede ser programada para infiltrarse en sistemas de seguridad o para hackear, esto también puede llevar a desarrollar nuevas estrategias y técnicas sin ser reprogramadas explícitamente por sus creadores; dicha situación lo convierte en algo preocupante en áreas como el espionaje cibernético, el robo de datos personales y el sabotaje digital, hasta terrorismo cibernético o delitos nuevos como la ciberextorsión. Los algoritmos de IA pueden ser usados para ejecutar fraudes financieros, manipulación de información o incluso llevar a cabo un ataque coordinado sin requerir de intervención humana [15].

Puede llevar a la comisión de diversos delitos, muchos de los cuales están relacionados con el cibercrimen y otras actividades ilícitas que aprovechan la capacidad de la IA para automatizar como también optimizar acciones; delitos que involucren al uso indebido de las inteligencias artificiales pueden ser el pishing y Spear Pishing, donde se puede programar a un bot y otorgarle facultades para crear correos electrónicos fraudulentos altamente personalizados basados en grandes cantidades de datos de usuarios, haciendo más efectivos los actos de suplantación de identidad [16].

Delitos como el fraude financiero y estafas automatizadas como el trading algorítmico ilegal, donde se pueden usar inteligencias artificiales para manipular mercados financieros a través del trading algorítmico, ejecutando millones de transacciones por segundo para aprovechar pequeñas fluctuaciones dentro del mercado. También como ejemplo están los fraudes de tarjetas de crédito y robo de identidad, donde el algoritmo puede "analizar" grandes volúmenes de datos de tarjetas de crédito que han sido previamente robadas y esto puede optimizar el uso de las mismas sin ser detectadas al instante.

Estas acciones también pueden arrastrar otros delitos; como las campañas de desinformación como la difamación, distribución de material indebido, fraude financiero, extorsión y manipulación política, pues la imagen de una persona se encuentra expuesta hacía el público que puede tomar esta información como verdadera. Ahora en lo que respeta a distribución de material indebido, se está enfocando en una brecha entre la creación de la imagen de una persona no real; Sin embargo, estas imágenes podrían llegar al punto de tener un objetivo macabro de manera moral pero no legal, donde se exponen determinados actos de apología a la pedofilia, pero no existe un sustento o normativa legal suficiente para castigar a estas personas.

Profundizando en este punto, no es muy común ver estas situaciones, hasta que la Organización de las naciones unidas (ONU) y el Buró Federal de Investigación (FBI) consideran que el material indebido sea animado o creado que involucren a menores de edad (aunque se muestren como simples caricaturas) ingresan en el plano de material ilegal; pero, ¿Cómo se castigaría estos actos donde existe una intervención de una IA? ¿Existirá una responsabilidad penal por parte de los creadores de programas o toda esa carga va a quién lo usa de forma indebida?

Añadiendo otro dato, la manipulación de la información y desinformación; es uno de los ámbitos más preocupantes del uso indebido de la IA, pues afecta directamente a la sociedad en términos de acceso a información veraz, confianza en los medios y estabilidad social y política [17]. Estos IA son modelos avanzados que tienen la capacidad de crear y difundir información falsa de manera eficiente, rápida y difícil de detectar, lo que ha generado nuevos desafíos para la protección de la integridad e identidad.

Desde Deepfakes, aplicaciones más conocidas de la IA para finos delictivos donde se distribuyen imágenes, vídeos o audios falsos generados por IA que imitan a personas reales [18]. Pueden

ISBN: 978-989-36481-2-4

ser utilizados para extorsión, difamación o incluso para influir en la opinión pública de manera ilícita; estas técnicas de manipulación se han perfeccionado agresivamente gracias a redes neuronales como Generative Adversarial Networks (GAN) que han permitido crear vídeos y audios extremadamente realistas.

B. Los delitos que se llevan a cabo con el uso indebido de las inteligencias artificiales.

El uso indebido de la IA ha facilitado la comisión de diversos delitos, aprovechando su capacidad para automatizar procesos y analizar grandes volúmenes de datos.

1) Ciberacoso y Deepfakes

La IA permite la creación de imágenes y videos falsos, conocidos como deepfakes, esta modalidad de crimen son imágenes o videos manipulados mediante redes neuronales avanzadas, como las GANs, que permiten la creación de contenido visual altamente realista que pueden utilizarse para acosar o difamar a individuos [18]. Esta tecnología permite crear contenido falso que parece auténtico, y se utiliza a menudo para generar videos o fotos específicas de personas, especialmente mujeres y menores, sin su consentimiento, los algoritmos combinan o superponen imágenes y sonidos de manera que parecen pertenecer a una persona real, haciendo difícil para el espectador discernir si el contenido es genuino o falso [10].

El ciberacoso va más allá de las formas tradicionales, como los mensajes ofensivos en redes sociales [7]. Potenciado con una IA, tiene la capacidad de crear deepfakes abre la puerta tanto a nuevas y más peligrosas formas de acoso, como a nuevas modalidades de estafas: Frente a acciones delictivas como el acoso puede incluir la difusión de videos o imágenes comprometedoras sin el consentimiento de la persona afectada, este tipo de contenido falso puede compartirse en redes sociales o plataformas de mensajería, afectando gravemente la reputación y salud mental de las víctimas.

Es cierto que dentro de la jurisdicción peruana se está ingresando una idea base sobre los delitos informáticos con el tema del ciberbullying como un tipo de violencia; pero en el caso de ciberacoso las penas no son lo suficientemente duras como para prevenir que estas situaciones se agraven a mayor escala, por lo que no debe haber ninguna diferencia con un delito común puesto tanto como la identidad y la intimidad de la víctima se ve expuesta no solamente por una vez en su vida de lo contrario quedaría demostrado el poco conocimiento que la sociedad tiene de estas herramientas tecnológicas como lo es el internet. Es una lucha constante debido a que una vez se sube un archivo o una fotografía para poder ser compartida no solo en una plataforma sino en diferentes redes sociales.

Ahora, dentro de las modalidades de estafas, generan una situación preocupante; pues no solo se tiene en cuenta la existencia de estos elementos digitales sino también reformula una nueva situación donde las herramientas muestran que los modelos biométricos ya no son seguros; claro que dentro de una realidad nacional como Perú tiene opciones para poder obtener facilidades de ingreso a las cuentas bancarias, esto refiriéndonos por el lado de las entidades bancarias. Pero no se descarta la posibilidad de que dentro de 5 años o más la población tenga el conocimiento que puede acceder a sus cuentas mediante la imagen de su rostro, ahí es donde se sitúa el problema cuando se llevan a cabo, delitos como lo son el fraude financiero y la suplantación de identidad para así llevar a cabo las estafas.

Un delincuente puede hacer uso de la fotografía de la víctima en todo caso de que este use el acceso por medio de verificación biométrica, pero esta acción llevada a cabo con un algoritmo que permita lograr el ingreso a una cuenta bancaria, resulta ser una de las pesadillas o algo fantástico. A su vez que es sencillo para algunas entidades plantear un extenso documento donde expongan los términos y condiciones donde plantea la posibilidad de tomar esta opción, pero teniendo en cuenta las consecuencias, entonces es ahí mismo donde se busca que las personas sean diligentes y cuidadosas con sus datos. Sin embargo, se presentan estas situaciones donde se cometen delitos bajo la dirección de un sujeto activo cuya identidad se desconoce con nueva herramienta lanzada al mercado de la que los órganos de justicia saben poco sin la dirección de un especialista en ingeniería de software.

2) Suplantación de identidad y Phishing: La suplantación de identidad y el fraude mediante IA es uno de los delitos más preferidos y comunes asociados con el uso indebido de esta tecnología. La IA ha ampliado las capacidades de manipulación de información y fraude, especialmente en el contexto financiero. Con las habilidades para procesar grandes cantidades de datos en tiempo real, los sistemas de IA pueden facilitar operaciones algorítmicas ilegales, donde millones de transacciones se ejecutan en segundos para explotar pequeñas fluctuaciones del mercado. Este método permite que los delincuentes obtengan ganancias significativas antes de que las irregularidades sean detectadas, así como ocurrir en delitos como la suplantación de identidad.

El phishing o la suplantación de identidad, es una práctica de fraude que se ha vuelto más peligrosa con la integración de algoritmos de IA. Mediante técnicas de phising y Spear phishing (una versión más dirigida y personalizada), los delincuentes emplean IA para analizar patrones de comportamiento y preferencias personales de los usuarios en redes sociales, correos electrónicos y otras plataformas [4].

Además, la IA permite generar mensajes de phishing altamente personalizados a través del análisis de patrones en redes sociales y plataformas en línea, lo cual aumenta considerablemente la efectividad de los ataques. A diferencia de las modalidades tradicionales, los sistemas de IA utilizan el comportamiento específico de cada usuario, lo que maximiza las probabilidades de que las víctimas compartan información confidencial; por lo que esta personalización ha hecho que el Spear phishing sea una táctica especialmente peligrosa, permitiendo fraudes de gran escala en poco tiempo y afectando tanto a individuos como a empresas.

Con esta información, los algoritmos generan mensajes convincentes y personalizados que aumentan la probabilidad de que las víctimas compartan información sensible, como datos bancarios o contraseñas. A diferencia de los correos de pishing genéricos, el Spear Pishing utiliza IA para crear mensajes específicos basados en el historial de actividad de la víctima [16].

La IA es capaz de manipular sistemas financieros a través de transacciones automáticas de alta frecuencia, conocidas como trading algorítmico ilegal [19]. Este tipo de fraude afecta prin-

ISBN: 978-989-36481-2-4

cipalmente a los mercados financieros, donde las IA pueden ejecutar millones de transacciones por segundo para aprovechar pequeñas fluctuaciones en el mercado; es tan eficaz que permite a los delincuentes obtener beneficios financieros significativos antes de que los reguladores o instituciones puedan detectarlo.

El uso de estas herramientas también genera un conflicto principalmente en quien utiliza o manipula estos sistemas para cometer delitos; en estos casos, es responsable puede ser acusado de delitos como fraude informático, pero un factor clave en la atribución de responsabilidad penal es demostrar que el acusado tenía conocimiento y la intención de usar la IA con multas ilícitas. Este es un elemento esencial en el derecho penal; Sin embargo, la utilización de bots en plataformas como Telegram para recolectar, almacenar y distribuir datos personales sin el consentimiento de los afectados constituye una violación a la privacidad y, en muchos países, es un delito penado por la ley.

En estos casos, quienes diseñan, implementan o utilizan estos bots deben enfrentar responsabilidad penal por varios delitos como suplantación de identidad, fraude informático, comercialización ilegal de datos y algunas jurisdicciones, delitos contra la intimidad y privacidad personal. La responsabilidad penal recae tanto en los desarrolladores, como administradores y usuarios de estos bots que operan intencionalmente para acceder a información privada o confidencial de manera ilícita.

Al configurar o administrar estos programas para obtener datos de usuarios sin autorización, estos individuos incurren en actividades que pueden ser consideradas como fraude informático o delitos de alta tecnología.

3) *Suplantación de autenticación biométrica:* Así como existen situaciones sociales que involucran la manipulación de información con el uso de la IA para ser utilizada con el propósito de crear y difundir noticias falsas, imágenes o videos manipulados, involucrando a las deepfakes [20]. Surge también otro elemento delictivo que también las usa para alterar pruebas biométricas.

La biometría emplea un conjunto de tecnologías diseñadas para medir y analizar datos de reconocimiento únicos, lo que facilita los procesos de verificación, autenticación e identificación [21]. La verificación biométrica, también es conocida como autenticación que se usa para comparar la validez de la identidad de una persona (características físicas) con su plantilla biométrica preexistente; Esta comparación permite determinar la coincidencia y crear un modelo de referencia que se almacena en un sistema de gestión de identidad o plantilla, permitiendo así la autenticación en futuros accesos.

La suplantación de autenticación biométrica mediante IA, esto es una preocupación en el ámbito de la seguridad digital, debido a que explota una de las formas confiables de identificación y no solo en esa área se encuentra en aprietos; sino que también involucra a la rama del derecho al momento de presentar elementos de convicción que relacione a una persona directamente con un delito.

Previamente se había mencionado que los sistemas biométricos destacaban por ser versátiles y que permiten su uso en una variedad de sectores, por lo que es común encontrar un sistema en áreas como la salud, servicios bancarios, inmigración, transporte, telefonía [22], [23]. Sin embargo, poco se habla del peligro que amenaza significativamente para el derecho penal, pues esto compromete la confiabilidad de un método de identificación clave en procesos judiciales.

Al explotar los datos biométricos, que son considerados una de las formas más confiables de identificar personas, la IA puede crear vulnerabilidades que socavan la integridad del proceso penal, afectando tanto la admisión de pruebas como la protección de los derechos de los involucrados. Por ejemplo, a menudo se usan los registros biométricos para autenticar la identidad de los individuos en evidencias digitales, como acceso a dispositivos o sistemas de seguridad.

En caso de que un acusado alegue que su identidad fue falsificada mediante una suplantación biométrica generada por IA, podría cuestionarse la autenticidad de pruebas clave, retrasando el proceso judicial o incluso descartando evidencia que podría ser crucial para condenar al imputado. O en un caso de amenaza de extorsión telefónica, un deepfake de voz podría utilizarse para simular la voz de un acusado, pareciendo culpable de las amenazas; por lo que existe la posibilidad de que un criminal pueda utilizar una clonación de voz para hacer pasar por una víctima y comprometerla en actividades ilícitas.

4) *Creación y Distribución de contenido ilícito:* La generación de contenido ilegal, como pornografía infantil simulada, mediante herramientas de IA, plantea serios desafíos legales y éticos. La facilidad para crear este tipo de material compromete la protección de los derechos fundamentales y la intimidad de las personas.

Personas pueden ser representadas en situaciones comprometidas, explícitas o ilegales sin su conocimiento o autorización, lo que constituye una invasión severa a la privacidad y vulneración de derechos. Existen casos en los que esta tecnología se ha utilizado para producir contenido que simula pornografía infantil, un acto gravemente criminalizado en muchos países, y que plantea desafíos legales en torno a cómo y cuándo una IA puede ser penalmente responsable, o si la responsabilidad recae en el programador o usuario que la emplea para tales multas [24]. Dado que la IA puede operar de manera autónoma, se dificulta la identificación de un director responsable. Las legislaciones deben adaptarse para considerar la responsabilidad de las personas que crean, programan o usan estas tecnologías con multas ilícitas.

El uso de la IA para crear contenido sexual sin consentimiento o pornografía infantil simulada atenta contra la dignidad, privacidad y otros derechos fundamentales de los individuos afectados. Además, complica la legislación tradicional en cuanto a la protección de menores y personas vulnerables. Debido a la facilidad de creación y distribución, como la dificultad de rastrear a los responsables, las autoridades constantemente se enfrentan a grandes barreras para sancionar estos delitos [9]. El problema en este punto es donde buscan defenderse en casos donde argumentan que crearon y distribuyendo contenidos ilícitos por medio de una IA, a pesar de que se busque maquillar dicha acción solo se puede decir que es un tipo de pornografía infantil simulada. Esta teoría plantea ciertos desafíos legales y éticos significativos, porque han buscado exonerar esta conducta como “irreal”.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Aunque el contenido no representa a una persona real, las imágenes simuladas o creadas digitalmente refuerzan prácticas y deseos que atenten más contra la moral y el pudor como también puede llegar a violar la dignidad; porque, aunque se permita la creación de contenido simulado que represente situaciones ilegales o de abuso, aunque no implique directamente con una persona, contribuye de cierto modo a un ambiente donde tales actos se perciben como menos graves o incluso tolerables.

La exposición a este material crearía sensibilidad al impacto real que estos actos tienen sobre víctimas reales, trivializando el problema. La disponibilidad de este tipo de contenido en el espacio digital contribuye a que las personas normalicen o refuercen conductas que son socialmente y legalmente inaceptables; estas acciones al no ser limitadas crean confusión sobre que es aceptable y que no, tanto legal como éticamente; su contribución genera un área gris donde es fácil argumentar a favor de la creación de contenido nocivo o cuestionables sin enfrentar consecuencias.

5) *Ciberextorsión:* La IA facilita la recopilación de datos sensibles sobre individuos y empresas, permitiendo que los delincuentes puedan realizar ciberextorsión de manera más efectiva. A través del uso de algoritmos avanzados, los atacantes pueden recolectar información privada y amenazar con su divulgación, exigiendo pagos a cambio de silencio.

Este tipo de delitos ha aumentado con la capacidad de IA para analizar grandes volúmenes de información y seleccionar las víctimas en función de vulnerabilidad, esto puede surgir a través de la creación de perfiles falsos y la manipulación de contenido en redes sociales con el propósito de tener mayor acceso. El atacante utiliza información obtenida de manera ilegal para amenazar a una persona o empresa, este sujeto activo exige un pago o cumplimiento de demandas a cambio de no divulgar o destruir la información sensible, generalmente solo es dinero lo que solicitan un cambio de la no divulgación de información privada [25]. Pero a través de métodos como los ransomware, spyware o malware, que provocan fugas de información, esto permite que los delincuentes puedan obtener acceso a datos sensibles, personales o comerciales, que luego usan para extorsionar a las víctimas.

El ransomware y los ataques con exfiltración de datos son formas comunes de ciberextorsión; en estos ataques ransomware tradicionales, los ciberdelincuentes secuestran la información de una empresa, encriptando sus datos y exigiendo un pago para restaurar el acceso. Sin embargo, en los ataques más recientes, los atacantes también roban ("exfiltran") información antes de encriptarla, por lo que les permite realizar una "doble extorsión"; además de pedir un rescate para desbloquear los datos, amenazan con hacer pública o vender la información roba si no se recibe el pago [26].

En una fuga de información, los atacantes pueden acceder a detalles privados, como documentos confidenciales, contraseñas, datos financieros y otra información sensible. También hay que tomar en cuenta que no toda la información filtrada es "monetizable" por sí misma, pero puede servir como un recurso de manipulación; por ejemplo, los atacantes pueden obtener correos electrónicos, archivos internos, registros médicos o fotos privadas que pueden poseer un valor emocional o de reputación de la víctima, entonces esta información se convierte en una herramienta de persuasión y presión para poder llevar a cabo al delito. No es el mismo tipo de amenaza como ocurre en las extorsiones donde atacan hasta la integridad física de las personas, sino que es algo un poco más psicológico y económico. Pero en el caso de las empresas, genera un conflicto más profundo debido al número de sus usuarios como ocurre en los bancos, en pocas palabras lo definiría como un tipo de delito más sofisticado aplicado contra una nueva generación.

Un ejemplo claro fue el reciente incidente de ciberextorsión que afectó a un Banco reconocido de Perú en octubre del 2024; siendo el ejemplo claro de como los ciberdelincuentes pueden comprometer la seguridad de las instituciones financieras y utilizar información sensible para poder llevar a cabo este delito. El atacante identificado como "kzoldiyck" logró acceder a los sistemas de la entidad bancaria obteniendo información de tres millones de clientes, haciendo uso de credenciales internas para ingresar a los servidores administrados por New Relic, proveedor tecnológico del banco; extrayendo así, datos personales como nombres completos, número de tarjetas, teléfonos, fechas de nacimiento, números de documentos de identidad y detalles de transacciones bancarias.

Tras obtener la información, el atacante amenazó con divulgar los datos sensibles a menos que la entidad bancaria cumpliera con sus demandas, lo que constituyó un claro caso de extorsión cibernética, donde presionó a la parte víctima (la entidad bancaria) mediante amenazas de exposición pública de información confidencial, con el objetivo de obtener beneficios económicos.

Este incidente resaltó la importancia de contar con medidas de ciberseguridad robustas y la necesidad de una respuesta efectiva ante ataques de este tipo. La confianza de los clientes en las instituciones financieras puede verse afectada significativamente por eventos de ciberextorsión, lo que subraya la necesidad de transparencia y acciones concretas para mitigar los riesgos y proteger la información sensible.

6) *Ciberterrorismo y espionaje Cibernético:* Este delito se refiere al uso de IA para llevar a cabo ataques digitales que amenazan la seguridad nacional o pública, los sistemas de IA permiten a los terroristas planificar y ejecutar ataques de forma remota y con mayor precisión, utilizando herramientas avanzadas para sabotear infraestructuras críticas, como redes eléctricas, sistemas de transporte y redes sociales; dicha capacidad de los programas para optimizar y aprender de las tácticas utilizadas aumenta el impacto de estos ataques y la dificultad para prevenirlos.

El ciberterrorismo es la intersección entre el ciberespacio y el terrorismo; en otras palabras, es la manera en que el terrorismo emplea las tecnologías de la información para intimidar, coaccionar o causar daño a grupos sociales con objetivos de índole política o religiosa [27]. Además de ser una combinación de ciberespacio y terrorismo, representa una amenaza moderna que aprovecha la conectividad global y la dependencia de la tecnología en múltiples aspectos de la vida.

A través de ataques como la manipulación de infraestructura crítica (redes electrónicas, sistemas de transporte, comuni-

ISBN: 978-989-36481-2-4

caciones), el ciberterrorismo puede generar un impacto social profundo, afectando no solo a gobiernos y organizaciones, sino también a la vida cotidiana de las personas. Usa tácticas que van desde el robo de datos sensibles y el sabotaje de sistemas esenciales hasta la difusión de propaganda, reclutamiento y coordinación de ataques físicos a través de una plataforma en línea.

En el caso de espionaje cibernético se emplean programas en el espionaje digital, permitiendo a los atacantes acceder y extraer información confidencial de instituciones gubernamentales, empresas o individuos de alto perfil. Mediante el análisis de extensos informes de datos, la IA ayuda a identificar vulnerabilidades y recopilar información crítica sin ser detectadas.

El concepto abarca en sí, diferentes aspectos; por un lado, puede referirse al acceso o adquisición no autorizada de datos o programas que contienen información privada de individuos y, por otra parte, puede aplicarse al acceso o adquisición indebida de datos o programas pertenecientes a empresas u otras organizaciones, lo cual se conoce como espionaje informático en diferentes ámbitos [28].

Un ejemplo es el ataque ocurrido en Estados Unidos en el año 2015 a la Oficina de Gestión de Personal (OPM) donde un grupo de ciber espías lograron ingresar en la base de datos de la Oficina de Gestión del Personal de Estados Unidos y robaron información personal de más de 21 millones de empleados federales. Se creía que los atacantes estaban vinculados al gobierno chino y buscaban datos sensibles para obtener información sobre agentes y funcionarios de seguridad.

Este ataque puso en riesgo la seguridad de miles de empleados gubernamentales y expuso a personas en roles de alto perfil, lo cual representaba una amenaza para la seguridad nacional de Estados Unidos. O también la operación Octubre Rojo del 2012, donde se llevó a cabo una campaña de ciberespionaje dirigida a organizaciones diplomáticas, gubernamentales y de investigación en Europa, Asia y América Latina. Los atacantes crearon un software personalizado que infectaba sistemas para extraer datos confidenciales de embajadas, centros de investigación nuclear y sistemas de defensa, cuya culpabilidad recayó en actores rusos. Estos datos robados incluían documentos clasificados, correos electrónicos y archivos de redes diplomáticas, pues comprometía la seguridad de varios gobiernos y exponía información confidencial a largo plazo.

C. Jurisdicciones que abordan la responsabilidad penal en relación con la IA

La responsabilidad penal por delitos cometidos con el uso de una IA, puede recaer en diferentes actores según la jurisdicción y las circunstancias del caso. Como elemento principal, se considera que los desarrolladores podrían ser responsables de delitos cometidos con sus sistemas porque son quienes tienen control sobre la estructura y el funcionamiento de la tecnología; Al programar una IA, los desarrolladores definen los algoritmos y patrones de respuesta del sistema.

Eso quiere decir, que, si el diseño del sistema incluye errores, brechas de seguridad, o permite una mala interpretación de datos que luego conduce a actos ilícitos, se les podría atribuir responsabilidad bajo el argumento de que no tomaron medidas suficientes para prever y evitar esas conductas. En esencia, como creadores del sistema, tienen un grado de responsabilidad sobre el comportamiento de la tecnología que producen; en cuanto a los operadores o usuarios de la IA, la responsabilidad puede recaer sobre ellos porque tienen el poder de decidir cómo se empleará la IA en situaciones específicas.

Los operadores son quienes programan las instrucciones finales, ajustan configuraciones y supervisan el funcionamiento del sistema en su contexto de uso. Si un operador configura la IA de manera que pueda cometer un acto ilegal o no actúa para evitar que lo haga, se considera que tiene una cuota de responsabilidad es que el operador conoce las implicaciones del uso del sistema y tiene control sobre su contexto y propósito de aplicación, por lo que debe tomar medidas preventivas para evitar conductas ilícitas o peligrosas de la IA [29].

Para sustentar este punto principalmente; se inicia con la normativa colombiana, especialmente el Código General del Proceso (CGP), establece una serie de disposiciones que permiten el uso de medios electrónicos en los procesos judiciales. En los artículos 103 y 109 del CGP, en concordancia con la Ley 527 de 1999, se consagra la posibilidad de que las comunicaciones entre las partes y el despacho judicial se lleven a cabo a través de plataformas digitales [30].

Esto representa un avance hacia la modernización del sistema judicial, permitiendo que los actos procesales como la presentación de demandas o la notificación de actos, puedan realizarse de forma electrónica, optimizando el tiempo y facilitando el acceso a la justicia. La ley conocida como Ley de Comercio Electrónico, proporciona el marco legal necesario para la autenticación y validez de los documentos y transacciones electrónicas en Colombia. Esta normativa no solo cubre aspectos comerciales, sino que también se aplica en el ámbito judicial, brindando seguridad jurídica a los documentos y actos procesales que se gestionan de manera digital. De esta forma, el uso de medios electrónicos en los procesos judiciales cuenta con respaldo legal, lo cual garantiza la validez de los documentos y comunicaciones digitales.

Para facilitar la implementación de estas disposiciones, el Consejo Superior de la Judicatura desarrolló en 2002 el Sistema de Información de Gestión de Procesos y Manejo Documental, conocido como "Justicia XXI". Este sistema busca organizar y centralizar los documentos y expedientes judiciales en formato digital, lo cual mejora significativamente la administración de los casos judiciales.

En 2014, se autorizó que el sistema de Justicia XXI fuera adaptado a un entorno web [30]. Esta adecuación permite que los usuarios puedan acceder al sistema desde cualquier lugar con conexión a internet, haciendo que la información judicial sea accesible de manera remota. Esta evolución hacia un entorno digital y en línea facilita que los abogados, jueces y demás interesados puedan presentar y consultar documentos, hacer seguimiento a los casos y gestionar otros trámites judiciales sin necesidad de trasladarse estrictamente a las sedes judiciales, agilizando el sistema y mejorando la accesibilidad para los usuarios.

En Argentina, se desarrolló un software llamado Sherlock – Legal, creado por la empresa Albremática S.A. (La editora de elDial.com). Este software utiliza la IA, específicamente el procesamiento del lenguaje natural, para analizar decisiones judiciales de tribunales argentinos [17].

ISBN: 978-989-36481-2-4

La finalidad de esta herramienta es ayudar a los abogados y usuarios del sistema a entender cómo se han resuelto casos similares en el pasado y prever, en cierta medida, el posible resultado de sus propios casos. Es decir, facilitar a los abogados y otros usuarios legales un análisis rápido y fundamentado de los fallos judiciales argentinos, ofreciendo información detallada que permita prever el resultado de los casos basados en antecedentes judiciales. Esta herramienta innovadora que permite a los profesionales del derecho tomar decisiones informadas y preparar estrategias legales con una comprensión más profunda de las probabilidades y riesgos asociados a cada caso. El programa también evalúa si la posición o solicitud del cliente tiene un enfoque favorable o desfavorable según los datos históricos; esta evaluación depende de algoritmos construidos a partir de datos jurídicos.

La Unión Europea, Estados Unidos y el Reino Unido lideran este esfuerzo, habiendo iniciado en octubre del 2016 una serie de reuniones para acordar una legislación marco basada en principios éticos universales [31]. Estas reuniones tienen como objetivo crear un entorno seguro y responsable para la IA, abordando, entre otros temas, la responsabilidad que puedan tener las personas o entidades que desarrollan y operan estas tecnologías.

En la Unión Europea, el Parlamento Europeo, a través de su propuesta de legislación sobre desarrollo, despliegue y uso de IA, robótica y tecnologías afines de 2020, ha subrayado la importancia de un marco ético que orienta la regulación de estas tecnologías. En el artículo 4 de esta propuesta, se establece que toda IA, incluyendo software, algoritmos y datos, debe desarrollarse y utilizarse en conformidad con principios éticos, su enfoque refleja el interés de la Unión Europea por no solo abordar aspectos técnicos, sino también por regular la responsabilidad penal derivada de daños que puedan causarse con estas tecnologías, a través de políticas públicas y una gobernanza que incluya la colaboración del sector privado y la comunidad científica.

La ley de iniciativa de IA en Estados Unidos, presentada en el Senado en 2019, es una propuesta legislativa cuyo objetivo principal es establecer una regulación a nivel federal para la IA [12]. Esto significa que, en lugar de que cada estado tenga sus propias reglas para regular la IA, se busca crear un marco común que unifique las prácticas en todo el país; Con esta ley, el gobierno pretende guiar el desarrollo de la IA en temas de investigación y aplicación de manera coherente y segura en todos los estados.

En su definición inicial, la ley describe la "Inteligencia Artificial" como un sistema que tiene la capacidad de realizar tareas de manera autónoma en contextos cambiantes y sin la supervisión constante de humanos. También incluye en su definición la capacidad de aprendizaje; es decir, sistemas que aprenden de la experiencia mediante el análisis de grandes formatos de datos.

Otra jurisdicción que trata de los delitos informáticos es el Perú cuya Ley N° 30096, se enfoca netamente en ese ámbito con otras aplicaciones normativas como la Ley de Protección de Datos Personales (LPDP), Ley N° 29733. Precisamente enfocando la idea en los delitos informáticos, existe una desactualización; es decir, la tecnología y las tácticas de cibercrimen evolucionan a gran escala, mientras que las modificaciones a la ley pueden tardar años, provocando que la ley se quede obsoleta frente a nuevas modalidades de delitos cibernéticos, como el uso de IA para estafas y ransomware.

Esto de la mano con ciertas limitaciones en la tipificación de delitos, al ser una ley que no aborda con profundidad las particularidades de cada delito, no ofrece una protección integral para las víctimas de delitos informáticos específicos. Lo que significa que, en algunos casos, los afectados pueden no obtener una reparación justa o una sentencia contundente debido a las limitaciones en la definición de los roles delictivos.

Cuando los datos personales o financieros de una persona son robados y utilizados para fines fraudulentos, la falta de precisión legal en el manejo de casos de uso indebido de información reduce la protección de la privacidad de las víctimas, especialmente si la sustracción de datos no es seguida por un uso claramente tipificado como delito. En otros países han actualizado sus leyes para incluir categorías específicas de delitos informáticos como "delitos de suplantación de identidad con IA" o "difusión no consentida de información personal".

D. Obstáculos de la IA en la administración de justicia.

La implementación de (IA) en la administración de justicia ofrece oportunidades significativas, pero también enfrenta varios obstáculos críticos que necesitan ser superados para que su adopción sea efectiva, segura y ética. Los algoritmos de IA, en particular aquellos basados en aprendizaje profundo, pueden funcionar como una "caja negra", lo que significa que sus decisiones no siempre son compresibles para los usuarios [32].

La introducción de IA en la justicia plantea dilemas éticos significativos. Por ejemplo, ¿Quién es el responsable en caso de un fallo o un error judicial provocado por una recomendación de la IA? También está el debate sobre hasta qué punto la IA debe reemplazar las decisiones humanas, considerando que el juicio humano es indispensable para la interpretación y adaptación de las leyes en casos complejos [15].

La responsabilidad en el derecho cibernético suele basarse en: participación directa en el acto ilícito, complicidad o cooperación (conocimiento y facilitación del delito medidas), negligencia (falta de adecuado o incumplimiento de normativas de seguridad) e intencionalidad en la creación y distribución de herramientas maliciosas [11]. Cada actor puede asumir distintos niveles de responsabilidad según su participación, el conocimiento que tenga sobre el delito y el grado en que sus acciones (o falta de ellas) contribuyen al daño causado. Los gobiernos y legisladores tienen una responsabilidad indirecta en la medida en que no promulguen o apliquen leyes y regulaciones efectivas contra el cibercrimen; la falta de políticas fuertes de ciberseguridad o de colaboración internacional puede permitir que los criminales actúen impunemente.

Esto incluye también a otros problemas en las leyes como la carga probatoria y la naturaleza mueble o inmueble de la IA [33]. Primero, la dificultad de probar una falta de vigilancia y control en sistemas complejos de IA se relaciona directamente con cuestiones de responsabilidad legal; este problema surge debido a la naturaleza opaca de algunos sistemas de IA, lo que

ISBN: 978-989-36481-2-4

complica para la víctima demostrar negligencia o falla, aumentando así los desafíos éticos y legales. Segundo, el problema de clasificar la IA como mueble o inmueble, como en el caso de viviendas inteligentes, se enmarca en las dificultades legales para definir la IA en términos de propiedad y responsabilidad. Este aspecto afecta cómo las leyes se aplican en distintos contextos y es un tema emergente en la regulación de la IA.

Se relaciona con la responsabilidad civil en el uso de la IA en la administración de justicia y en otros contextos. Este es uno de los puntos clave en el debate sobre los obstáculos de la IA en la administración de justicia, puesto que involucra quien debe asumir la responsabilidad en caso de que un sistema de IA cause un daño a terceros debido a su capacidad de aprendizaje autónomo y toma de decisiones sin intervención directa de sus programadores o fabricantes [11].

La preocupación sobre la filosofía de la justicia social y la posibilidad de que la IA remarque desigualdades sociales se relaciona con el debate ético de hasta qué punto la tecnología puede (o debe) reemplazar al juicio humano [30]. La IA podría interpretar de forma simplista situaciones sociales complejas y pasar por el alto la justicia social, sino que está diseñada y supervisada adecuadamente; Además, está la instrumentalización de personas y recursos naturales, que plantea dilemas éticos y desafíos legales en la responsabilidad de los resultados de la IA. Subsumiendo los valores subyacentes y la filosofía de justicia social que debería guiar el uso de la IA en el sistema judicial [18]. Aquí se platea el temor de que la IA pueda reforzar las desigualdades sociales, deshumanizar a las personas, y promover un uso inadecuado de los recursos naturales, lo que es un dilema ético profundo.

Además, la mención de regulaciones y principios destinados a garantizar que la IA respeta el desarrollo sostenible, el Estado de derecho y los derechos humanos también resuena con este punto, puesto que se trata de establecer marcos legales y éticos que aseguren que la IA no contravenga los valores fundamentales de justicia y equidad [30]. Esto sumado con la falta de regulación y Normas Internacionales, las regulaciones en torno a los principios de la justicia social, el desarrollo sostenible, el respeto al Estado de derecho y los derechos humanos son esenciales para guiar el desarrollo de la IA de forma ética. Sin un marco regulatorio sólido, los desarrolladores pueden aplicar estándares y prácticas que no necesariamente alinean sus sistemas con estos valores.

También la instrumentalización de personas y recursos naturales implica un riesgo de que los algoritmos perpetúen desigualdades y prioricen a ciertos grupos sobre otros. Este riesgo es central en el sesgo algorítmico, pues esta herramienta no sensible a las desigualdades puede acentuar problemas de justicia social, en lugar de reducirlos.

La falta de transparencia y explicabilidad, la conclusión sugiere que, aunque la IA no necesita tener un grado de confiabilidad absoluta, sí se requiere que su uso en justicia sea transparente y explicable para que se pueda evaluar como las decisiones o recomendaciones afectarán el juicio [4]. La falta de transparencia en los datos y en el funcionamiento del algoritmo podría impactar negativamente en la confianza del sistema judicial. En el contexto del uso de la IA en sistemas de cumplimiento o "compliance". Se refiere específicamente a los desafíos y limitaciones en la imputación de responsabilidades penales cuando la AI está involucrada, dado que los marcos legales tradicionales suelen exigir la identificación de una conducta humana para atribuir responsabilidad [34].

El uso de estas herramientas enfatiza que los modelos de autorresponsabilidad resultan más adecuados, pues permiten que las empresas o personas jurídicas asuman responsabilidad por sus propios programas y mecanismos internos de cumplimiento. Además, se subraya la importancia de que cualquier sistema de IA utilizado en estos programas debe respetar los principios de legalidad y proporcionalidad para asegurar su validez en procesos penales, esto implica que los datos y pruebas generados por la IA deben seguir normas rigurosas, incluida la documentación de la cadena de custodia, para que sean admisibles y confiables en los tribunales.

Finalmente, un ámbito crucial que abarca es tanto la filosofía del derecho y la ética jurídica específicamente en la discusión sobre el impacto de la IA en la conceptualización misma del derecho y la justicia. Cuando introducimos un elemento como las tecnologías, que carecen de los atributos humanos —como la empatía, la moralidad y la subjetividad— en la administración de justicia, se plantea una cuestión filosófica fundamental: Entonces, ¿Cómo se puede considerar las decisiones generadas por máquinas como derecho en el sentido pleno del término?

Se hace referencia a un riesgo ético y filosófico profundo: al atribuir a las máquinas cualidades normalmente humanas podría ocurrir una "deshumanización" del derecho. Esta perspectiva sugiere que una dependencia excesiva de la IA en el ámbito jurídico podría erosionar valores humanos esenciales, reduciendo el derecho a una serie de soluciones automatizadas y despojándolo de su componente humano esencial; por ello, se enmarca en el debate sobre los límites éticos y filosóficos de la automatización en el derecho, y sobre como la sociedad debería abordar el papel de los "actores no humanos" (como las máquinas y la IA) en la administración de justicia.

Dentro de la jurisdicción peruana sucede algo diferente, iniciando por la aplicación de las penas y las modificaciones que se estuvieron llevando a cabo. Es curioso mencionar también que parte de estos delitos que se han cometido como los más comunes, tales como la suplantación, la distribución de material pornográfico con montaje ha sido archivados porque no se identifica al sujeto activo. La creación de una nueva normativa legal legal como lo es la Ley Delitos informáticos Ley N° 30096 involucra la aparición de nuevos elementos a tomar en cuenta al momento de tipificar un delito, poco a poco aparecen conceptos nuevos como lo es el Grooming, que es una forma de acoso en línea en la que un adulto se comunica con un menor de edad, generalmente a través de las redes sociales, chat o plataformas de videojuegos, con el fin de ganarse su confianza y establecer una relación que permita manipularlo para obtener información íntima, personal o en casos extremos, encuentros presenciales.

Al tratarse de tecnicismos que otorgan definiciones que han sido recogidas de leyes extranjeras y tratadas, las modificaciones a la ley podrían tardar años. Lo que provoca que la ley se queda obsoleta frente a nuevas modalidades de delitos cibernéticos, como el uso de las inteligencias artificiales para estafas o ciberextorsión; acompañando de la falta de personal

ISBN: 978-989-36481-2-4

capacitado y con recursos tecnológicos adecuados, como herramientas de rastreo y análisis de delitos cibernéticos; la falta de estos recursos limita la eficacia de la persecución y el procesamiento judicial de los delitos informáticos.

E. Usos de las IA en beneficio del Derecho.

La IA ofrece variedad de aplicaciones en el ámbito de la justicia penal que pueden mejorar la eficiencia, precisión y equidad en los procesos judiciales, posee un gran potencial para beneficiar la justicia penal al ofrecer herramientas avanzadas para la investigación, el análisis y la toma de decisiones.

Principalmente en esta medida se busca que exista cierta transparencia algorítmica y un principio de imparcialidad del validador, al momento de emplear sistemas de IA en áreas como la salud, libertad, seguridad u otros derechos fundamentales [22]. Claro, en un principio se mencionó lo desastroso que es tener que lidiar con el comportamiento delictivo de las personas que usan esta herramienta con algún beneficio propio; sin embargo, pueden llegar a usarse en favor de la justicia; en el caso de la lucha contra la suplantación de autenticación biométrica requiere de una combinación de estrategias tecnológicas, legales y educativas.

En este contexto, Leret subraya la estrecha conexión entre la biotecnología, el derecho y la bioética, que surge frente al rápido avance tecnológico en áreas como la informática, la medicina y la genética, con el propósito de proteger la identidad, integridad y patrimonio genético de las personas [35].

En la parte de implementación de tecnología avanzada, está la detección de vida (Liveness Detection), que incorpora sistemas que verifican si el usuario es un ser humano presente en tiempo real, a través de la detección de parpadeo, movimientos naturales o cambios en la iluminación del rostro. Otro punto a tallar en el caso de los sistemas de informática jurídica judicial, es que podrían aplicar a procesos de reconocimiento cuando cuentan con autonomía propia; es decir, si están equipados para poder identificar documentos o interpretar números y caracteres, permitiendo una gestión instantánea mediante la generación automatizada de resoluciones [10].

También mejorar la regulación y Normativa legal, donde se aplican sanciones severas, ante el uso malintencionado de IA para suplantación de autenticación biométrica y manipulación de datos biométricos. Incorporar la situación jurídica de los datos biométricos en las legislaciones de protección de datos como información sensible, lo que exige estándares más altos de almacenamiento, manejo y procesamiento. Un ejemplo claro es el Perú, donde los datos biométricos están regulados y considerados como datos sensibles bajo la Ley N° 29733, de la Ley de Protección de Datos Personales (LPDP). Esta ley establece que los datos personales que pueden identificar de manera única a una persona, como los datos biométricos, requieren un tratamiento especial debido a su naturaleza sensible. Aunque también está la falta de normas específicas para nuevas tecnologías; a pesar de que la ley reconoce los datos biométricos como sensibles y exige de protección, no aborda de manera específica las nuevas tecnologías como el reconocimiento facial, las medidas de detección de vida o el uso de inteligencias artificiales, que están cada vez más integradas al sistema biométrico. Esto deja un vacío en cómo regular las tecnologías avanzadas, particularmente en relación con su capacidad para realizar análisis masivos o perfiles crear sin el consentimiento explícito de la persona.

Esto sumando a la existencia de medidas de seguridad no uniformes, que no se especifican estándares mínimos ni se ofrecen lineamientos claros sobre tecnologías específicas. Lo que genera disparidades en la calidad de las protecciones aplicadas, dejando vulnerables ciertos sistemas biométricos; también la responsabilidad en caso de brechas, es decir que, esto se presenta suficiente cuando la ley no define con claridad quién asume la responsabilidad en caso de una fuga de datos biométricos, especialmente entre sistemas de terceros o subcontratados, creando incertidumbre sobre cómo las víctimas pueden buscar reparación o a quién deben responsabilizar en casos de mal uso de sus datos. Por ejemplo, dentro de la ley N°29733 (Perú), se señala que el responsable del tratamiento de datos es la persona natural o jurídica que decide sobre la finalidad y los medios del tratamiento de datos personales. Sin embargo, no se definen claramente las obligaciones en casos donde el tratamiento de datos sea delegado a terceros o subcontratistas.

En caso de que una empresa contrate a un proveedor externo para gestionar un sistema de autenticación biométrica y ocurra una fuga de datos, la ley no especifica de qué manera va a recaer la responsabilidad, en caso si es únicamente a la empresa contratante o si también alcanza al proveedor lo que genera una zona gris legal porque no define de manera específica el alcance de la responsabilidad compartida entre la empresa contratante y el proveedor externo. Al carecer de lineamientos claros, se deja a interpretación si la obligación de proteger los datos recae únicamente sobre la entidad que contrató el servicio o si el proveedor también debe responder legalmente en caso de un incumplimiento. Esto podría resultar en que ambas partes intenten evadir la responsabilidad, dificultando la búsqueda de justicia para las víctimas y generando incertidumbre en la aplicación de sanciones. Además, que sin una normativa precisa que regule la relación entre el responsable del tratamiento de datos y los subcontratistas, es posible que los proveedores externos no implementen medidas de seguridad de adecuada, amparadas en la ambigüedad normativa.

Aumentando el riesgo de filtraciones de información sensible y limitando las opciones de reparación o compensación para los afectados, quienes podrían enfrentar barreras para probar negligencia o irresponsabilidad en la cadena de manejo de sus datos. Finalmente, otro elemento a tomar en cuenta dentro de la ley, es en su artículo 15, que permite que los responsables del tratamiento contraten a encargados (terceros), pero solo menciona de forma general que estos deben garantizar la seguridad de los datos.

No existen sanciones claras ni cómo se comparte la responsabilidad en caso de incidentes de seguridad. En consecuencia, si el subcontratista incumple medidas de seguridad y provoca una fuga de datos, la víctima podría enfrentar dificultades para identificar al responsable directo o recibir una reparación justa; ante la falta de una regulación específica deja a las víctimas en una posición vulnerable, puesto que no tienen un marco legal lo suficientemente claro para determinar contra quién deben proceder en caso de que exista una fuga de datos.

Esto puede dilatar los procesos legales, limitar las opciones de reparación o incluso permitir que los responsables eludan

ISBN: 978-989-36481-2-4

su obligación. También es absolutamente necesario contar con jueces especialistas en esta rama evolutiva como lo es la tecnología, pues ellos comprenden un funcionamiento de la tecnología y la IA que pueden evaluar mejor la autenticidad y confiabilidad de las pruebas digitales.

En delitos complejos, como el uso de deepfakes o la manipulación de pruebas digitales, es fundamental que los jueces puedan distinguir entre pruebas genuinas y manipuladas, incluyendo entender cómo se generan perfiles de riesgo o las evaluaciones de reincidencia y garantizar que el uso de IA en las decisiones judiciales sea transparente y ético.

IV. Conclusiones

Se identificaron los riesgos que surgen por el uso de una IA abarcada dentro de la rama del donde destacan: Los hackeos, espionaje cibernético, ciber-extorsión, terrorismo cibernético, fraude financiero, pishing y Spear Pishing, la programación de bots para crear correos electrónicos fraudulentos, spam, estafas de trading. Todas estas acciones pudiendo ser realizadas por IAs que son capaces de tener cierta independencia para extraer la información y ser distribuida de forma remota en el ciberespacio.

Se enumeraron los delitos cometidos con el uso indebido de las inteligencias artificiales: Ciberacoso, Deepfakes Suplantación de identidad, Phishing Suplantación de autenticación biométrica, Creación y Distribución de contenido ilícito, Ciberextorsión, Ciberterrorismo y espionaje Cibernético. Es evidente que herramientas como la IA han dado lugar tanto a individuos como organizaciones y gobiernos; que muestran los avances tecnológicos sin una regulación adecuada; incluyendo medidas de seguridad efectivas, puede ser instrumentalizada para multas que vulneran la privacidad, integridad y seguridad; la diversidad y gravedad de estos crímenes reflejan la urgente necesidad de actualizar las legislaciones y desarrollar sistemas de protección y prevención más fuertes que puedan adaptarse a las innovaciones tecnológicas y su potencial abuso.

La comparación que se llevó a cabo para saber cómo otros países abordan la responsabilidad penal al usar de forma indebida la IA resaltan con la intervención de jurisdicciones como Estados Unidos, China, Argentina, Colombia, Panamá, Reino Unido y Perú. En lo que respeta a este punto no solo son los diferentes enfoques adoptados por diferentes países respecto a la responsabilidad penal por el uso indebido de la IA revela la diversidad en las estrategias regulatorias y jurídicas a nivel global; países como Estados Unidos y China destacan por su énfasis en la regulación tecnológica y el control estatal, mientras que naciones como Argentina, Colombia, Panamá y Reino Unido, muestran un enfoque más adaptativo incorporando principios éticos (en el caso de Perú también ingresa a este concepto de enfoque adaptativo solo que la ley está iniciando), legislaciones específicas y, en algunos casos, mecanismos de responsabilidad comparada; entonces esto evidencia la necesidad de desarrollar marcos legales más homogéneos y efectivos que permitan enfrentar de manera adecuada los desafíos éticos y legales asociados al mal uso de estas herramientas emergentes, promoviendo al mismo tiempo innovación responsable y protección de los derechos fundamentales.

Se estudió que la introducción de la IA en el mundo está interfiriendo con la administración de justicia frente: A la adaptación de nuevos delitos con poca base de conceptualización en casos complejos; el grado de participación que estas herramientas tienen en la participación de un delito; probar la responsabilidad de los sujetos que participan en dicho delito; los pocos elementos de convicción para incriminar al sujeto activo. Además, la aplicación de las penas en algunos países dada sus modificaciones normativas dejan casi impunes a los delincuentes que llevan a cabo estos delitos debido al nivel de responsabilidad de seguridad que debe tener cada usuario, sumado con poca normativa internacional que intervenga en el territorio peruano.

Se logró analizar cómo es que la IA puede ser utilizada como medio para prevenir delitos y mejorar la eficacia en el derecho: ofreciendo herramientas avanzadas que incrementan la transparencia y equidad en los procesos judiciales; en mejorar la lucha contra la suplantación de autenticación biométrica, en brindar observaciones a conceptos normativos con el propósito de evitar vacíos legales, como también la implementación de sanciones a los responsables y a los que incumplen su trabajo como protector de los datos.

La IA desempeña un papel clave en la prevención del delito y el fortalecimiento de la justicia, al ofrecer herramientas avanzadas que mejoran la transparencia y equidad en los procesos judiciales. Además, permite abordar problemas como la suplantación biométrica y fomentar la actualización de normativas para evitar vacíos legales. La IA también facilita mecanismos de sanción más efectivas, tanto para infractores como para quienes incumplen la protección de datos, fortaleciendo la confianza y la seguridad en el sistema judicial.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Privada Antenor Orrego por el apoyo brindado en esta investigación.

Referências Bibliográficas

[1] J. Hopfield, «Historia de las Redes Neuronales», 1985. [En línea]. Disponible en: https://nlaredo.tecnm.mx/takeyas/Apuntes/Inteligencia%20Artificial/Apuntes/tareas_alumnos/RNA/Redes%20Neuronales2.pdf

[2] UNESCO, «Artificial Intelligence and Gender Equality», *U. N. Educ. Sci. Cult. Organ.*, vol. 7, p. 54, 2020.

[3] B. S. GMB y A. Alonso, «Asistentes Virtuales». 2022. [En línea]. Disponible en: https://gbm.net/wp-content/uploads/2022/05/ebook-asistentes-virtuales.pdf

[4] M. Estrada, «La inteligencia artificial como prueba científica en el proceso penal español», *Rev. Bras. Direito Process. Penal*, vol. 7, n.º 2, oct. 2021, Accedido: 2 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/journal/6739/673972089017/

[5] R. Martínez, A. Palma, y A. Velásquez, «Revolución tecnológica e inclusión social: reflexiones sobre desafíos y oportunidades para la política social en América Latina», 2020, [En línea]. Disponible en: https://www.cepal.org/sites/default/files/publication/files/45901/S2000401_es.pdf

[6] J. Rousseau, «El contrato social», 1999, [En línea]. Disponible en: https://www.secst.cl/upfiles/documentos/01082016_923am_579f698613e3b.pdf

[7] C. Astorga y I. Schmidt, «Peligros de las redes sociales: Cómo educar a nuestros hijos e hijas en ciberseguridad», *Rev. Electrónica Educ.*, vol. 23, n.º 3, pp. 339-362, dic. 2019, doi: 10.15359/ree.23-3.17.

[8] M. Ossandón, «Los delitos de ostrucción a la justicia», *Rev. Derecho Valpso.*, vol. 1, pp. 309-323, 2005.

[9] Centro Criptológico Nacional, «CCN-CERT IA-13/20 Ciberamenazas y Tendencias», *2020*, p. 44, 2020.

[10] A. Morán, «Responsabilidad penal de la Inteligencia Artificial (IA). ¿La próxima frontera?», *Rev. IUS*, vol. 15, n.º 48, jun. 2021, doi: 10.35487/rius.v15i48.2021.706.

[11] M. Hernández, «Inteligencia artificial y Derecho Penal», *Actual. Juridica Iberoam.*, n.º 10, p. 28, 2019.

[12] S. E. Mecaj, «Artificial Intelligence and Legal Challenges», *Rev. Opinião Juríd.*, vol. 20, n.º 34, pp. 180-196, 2022.
[13] C. Ayo, Á. Seijo, I. Garre, y P. González, «Responsabilidad civil e inteligencia artificial», 2025, [En línea]. Disponible en: https://www.uria.com/documentos/publicaciones/9326/documento/AJUM_67-2025.pdf?id=14010&forceDownload=true
[14] El ultimo Tv-Nauta y Gonzma, *Deus Ex Machina: El verdadero precio de la Inteligencia Artificial*, (24 de octubre de 2025). Accedido: 26 de octubre de 2025. [En línea Video]. Disponible en: https://www.youtube.com/watch?v=0ECQHxQ3qpM
[15] P. M. de la C. Aguado, «Inteligencia artificial y responsabilidad penal», *Rev. Penal México*, vol. 9, n.º 16-17, Art. n.º 16-17, 2020.
[16] CAEN *et al.*, «REVISTA CIENTÍFICA SEGURIDAD Y DESARROLLO», vol. 2, n.º 1, 2024, doi: 10.58211.
[17] S. Sacoto, «Artificial Intelligence (AI): Beyond Legal Limits», *Rev. Fac. Jurisprud.*, n.º 10, p. 367, 2021.
[18] J. Bañuelos, «Deepfake: la imagen en tiempos de la posverdad.», *Rev. Panam. Comun.*, vol. 2, n.º 1, Art. n.º 1, ene. 2020, doi: 10.21555/rpc.v0i1.2315.
[19] O. Mazeyra, Y. Pérez, A. Bermudez, y P. Huertas, «Innovación y Software», vol. 5, 2024. [En línea]. Disponible en: https://revistas.ulasalle.edu.pe/innosoft/issue/view/16/22
[20] Defensoría del Pueblo, «La Ciberdelincuencia En El Perú: Estrategias Y Retos Del Estado», 2023, [En línea]. Disponible en: https://www.defensoria.gob.pe/wp-content/uploads/2023/05/INFORME-DEF-001-2023-DP-ADHPD-Ciberdelincuencia.pdf
[21] G. Quintanilla, «Legislación, riesgos y retos de los sistemas biométricos», *Rev. Chil. Derecho Tecnol.*, vol. 9, n.º 1, Art. n.º 1, jun. 2020, doi: 10.5354/0719-2584.2020.53965.
[22] H. Barrios, V. Díaz, y Y. Guerra, «Subjetividades e inteligencia artificial: desafíos para 'lo humano'», *Veritas*, n.º 47, pp. 81-107, dic. 2020, doi: 10.4067/S0718-92732020000300081.
[23] V. Díaz, «Sistemas biométricos en materia criminal: un estudio comparado», *Rev. IUS*, vol. 7, n.º 31, 2013, doi: 10.35487/rius.v7i31.2013.19.
[24] M. Santisteban, «La criminalización de las ultrafalsificaciones (con especial atención a las implicaciones de la normativa europea de servicios digitales e inteligencia artificial)», *Rev. Derecho Penal Criminol.*, n.º 31, pp. 211-249, 2024.
[25] M. Á. Ballesteros y A. Bonime, «Ciberriesgos», n.º 48, 2021, [En línea]. Disponible en: https://www.actuarios.org/wp-content/uploads/2021/03/Actuarios-48-web-low.pdf
[26] F. Avila, «Ransomware, una amenaza latente en Latinoamérica», *InterSedes*, vol. 24, n.º 49, pp. 92-119, ene. 2023, doi: 10.15517/isucr.v24i49.50765.
[27] G. Sánchez, «Ciberespacioy El Crimen Organizado. Los Nuevos Desafíos Del Siglo Xxi», 2012, [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/pdf/960/96024266004.pdf
[28] L. Mayer, «Elementos criminológicos para el análisis jurídico-penal de los delitos informáticos», *Ius Prax.*, vol. 24, n.º 1, pp. 159-206, jun. 2018, doi: 10.4067/S0718-00122018000100159.
[29] F. Miró-Llinares, «Digitalización y algoritmización de la justicia: introducción a un monográfico en tiempos de regulación de la IA», *IDP Rev. Internet Derecho Polit.*, n.º 39, pp. 1-4, nov. 2023, doi: 10.7238/idp.v0i39.421153.
[30] W. Suárez, G. De León, y J. Monsalve, «Un análisis sobre la aplicabilidad de la inteligencia artificial en el derecho colombiano*», *Prolegómenos*, vol. XXVI, n.º 52, pp. 11-23, 2023.
[31] D. Parra y R. Concha, «Inteligencia artificial y derecho. Problemas, desafíos y oportunidades», *Vniversitas*, vol. 70, oct. 2021, doi: 10.11144/Javeriana.vj70.iadp.
[32] D. Bonsignore, «Sobre Inteligencia Artificial, decisiones judiciales y vacíos de argumentación», *Teoría Derecho Rev. Pensam. Juríd.*, n.º 29, Art. n.º 29, jun. 2021, doi: 10.36151/td.2021.011.
[33] S. Scheffer, «Instrumentos colaborativos en la regulación de la responsabilidad civil frente a daños ocasionados por sistemas de inteligencia artificial: sandboxes y evaluación de impacto algorítmica», *Justicia*, vol. 29, n.º 45, p. 15, 2024.
[34] T. Xavier, «Inteligencia artificial y responsabilidad penal de personas jurídicas:: Un análisis de sus aspectos materiales y procesales», *Estud. Penal. Criminológicos*, n.º Extra 44 (Inteligencia artificial y sistema penal), p. 1, 2023.
[35] D. Arbeláez, J. Villasmil, y M. Rojas, «Inteligencia artificial y condición humana: ¿Entidades contrapuestas o fuerzas complementarias?», *Rev. Cienc. Soc.*, vol. XXVII, n.º 2, 2021, doi: 10.31876/rcs.v27i2.35937.

ISBN: 978-989-36481-2-4

La responsabilidad civil por difusión de noticias falsas en internet: Una revisión sistemática

Civil liability for the dissemination of false news on the internet: A systematic review

Nathaly G. Amaya-García [1], Angie F. Fernández-Silva [1], Segundo E. Cieza-Mostacero [1], Claudia E. Mori-Ugarte [1], Raul Y. Lozano-Peralta [1]

[1] Semillero de Investigación Human Right Warrios, Universidad Privada Antenor Orrego, Trujillo, Perú

namayag1@upao.edu.pe, afernandezs1@upao.edu.pe, sciezam1@upao.edu.pe, cmoriu1@upao.edu.pe, rlozanop@upao.edu.pe

***Resumen* — Esta revisión sistemática analiza la responsabilidad civil derivada de la difusión de noticias falsas, basándose en un total de 20 artículos seleccionados de las bases de datos Redalyc, Ebsco, Google Académico y Dialnet, siguiendo un enfoque cualitativo y criterios de evaluación estandarizados; los resultados evidencian que el tema se encuentra en una etapa inicial de investigación, identificándose cuatro dimensiones clave: las características de las noticias falsas, el marco legal que engloba la responsabilidad civil de este tipo, los principales responsables y los mecanismos jurídicos que deberían implementarse para prevenir los daños causados por la difusión de noticias falsas en internet, se destaca que la dificultad para encontrar a los responsables como uno de los desafíos para atribuir responsabilidades.**

Palabras **Clave - Responsabilidad Civil; Noticias falsas; Difusión; Internet.**

***Abstract* — This systematic review analyzes the civil liability derived from the spread of fake news, based on a total of 20 articles selected from the Redalyc, Ebsco, Google Scholar, and Dialnet databases, following a qualitative approach and standardized evaluation criteria; the results show that the topic is in an initial stage of research, identifying four key dimensions: the characteristics of fake news, the legal framework that encompasses this type of civil liability, the main parties responsible, and the legal mechanisms that should be implemented to prevent the damage caused by the spread of fake news on the internet, highlighting the difficulty in finding those responsible as one of the challenges for attributing liability.**

Keywords – Civil Liability; Fake news; Diffusion; Internet.

I. Introducción

En la era digital, el avance tecnológico ha transformado de manera radical gran parte de las interacciones sociales, así como ha cambiado la forma de consumir información y sobre todo, el método para difundir la misma, haciendo énfasis en su manejo dentro de entornos virtuales como lo vendrían siendo explícitamente las redes sociales; de tal manera, logrando que los ciudadanos tomen el papel de transmisores de contenido, lo que termina por generar que la transmisión de noticias no dependa exactamente de los medios tradicionales.

Algo a aclarar es que, tal fenómeno ha traído consigo importantes desafíos en términos de veracidad, responsabilidad y daño, así como en relación con la circulación de noticias falsas o malintencionadas. Las cuales son contenidos creados deliberadamente con el propósito de engañar presentándose como si fueran verdaderos, estos suelen adoptar una apariencia de falsa veracidad para ganar credibilidad llegando a incluso incorporar datos reales, más en esencia no son sostenibles debido a que fueron elaborados con la intención explícita de inducir al error y provocar conflicto [1].

Esta falsa apariencia verídica en las noticias suele lograrse mediante el uso de lenguaje periodístico, así como la adhesión de contenido aparentemente legítimo, dificultando el hallar que es o no es falso, lo cual tiene como consecuencia su rápida difusión; especialmente en plataformas digitales como las redes sociales. Es así que, es necesario precisar que este tipo de noticias se estructuran con la intención de provocar un daño, aprovechándose de la negligencia de los lectores, causando efectos negativos que se ven amplificados por los algoritmos que se utilizan en las redes sociales.

Esta agravante situación provoca un debate acerca de cómo controlar la difusión de información falsa, especialmente en contextos donde se vean en juego el honor, la reputación e incluso la seguridad de las personas. Es ante esto que mediante la figura jurídica del Derecho Civil llamada responsabilidad civil, se hace presente una vía idónea para alcanzar a reparar los daños causados por la difusión de noticias falsas, además de incentivar al usuario común a evitar cometer este tipo de delito referente a difundir información errónea.

La responsabilidad civil se ocupa esencialmente de la reparación de los daños causados en las relaciones entre particulares, ya sea que estos perjuicios deriven del incumplimiento de una obligación asumida voluntariamente, como ocurre en los contratos, o que resulten de una conducta dañosa entre personas que no están unidas por ningún vínculo jurídico previo [2]. Esta forma referida con anterioridad es conocida como responsabilidad civil del tipo extracontractual y adquiere especial relevancia en el entorno digital, donde la difusión de noticias falsas puede producir perjuicios significativos sin que exista una obligación previa entre el emisor del contenido y la persona afectada, configurándose una hipótesis de responsabilidad civil extracontractual en la que el ordenamiento jurídico debe ofrecer mecanismos adecuados para la reparación del daño.

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

Por tanto, es posible afirmar que los daños derivados de la difusión de noticias falsas tienen su origen en una acción como la creación, publicación o propagación, acción que resulta contraria al orden jurídico, siendo a partir de ello que se puede establecer la existencia de un nexo causal, así como identificar los factores de atribución, que podrán ser de naturaleza objetiva o subjetiva. De esta manera, se puede afirmar que estas conductas generan efectos perjudiciales que se enmarcan adecuadamente dentro del modelo jurídico de la responsabilidad civil [3].

Por ejemplo, entre estos efectos perjudiciales se encuentran: la afectación a la reputación y al honor de la persona, pérdidas financieras y de oportunidades laborales, despidos injustificados, asimismo, daños emocionales y profundos como ansiedad, depresión, estrés, aislamiento social, acoso y amenazas en redes sociales. Es así que, para que se pueda reconocer a la difusión de noticias falsas en el entorno digital como un hecho generador de responsabilidad civil extracontractual, es necesario que concurran elementos clásicos de la responsabilidad civil como: el daño, la conducta antijurídica, el nexo causal y el factor de atribución. La identificación de estos elementos es fundamental debido a que permitirán a las personas afectadas por la conducta antijurídica de difundir información falsa a tener el derecho de exigir una reparación justa ante el daño causado por la vulneración de sus derechos, y, además, permitirá que se logre atribuir eficazmente la responsabilidad de reparar el daño al autor o difusor del contenido malicioso.

Otro punto importante a resaltar, son los sujetos que pueden ser pasibles de responsabilidad civil por la difusión de noticias falsas, siendo esencial identificar a todas las partes, abarcando tanto a los proveedores de servicios de la red social, ya sean directos o indirectos, como al propio usuario que utiliza la plataforma para subir y compartir información [4]. De igual manera, los medios de comunicación también suelen ser responsables de los daños que causan a otros cuando intencionalmente o por descuido, no se aseguran de que la información que publican sea verdadera [5]. En otras palabras, la responsabilidad civil no recae únicamente en la persona que crea o comparte inicialmente la noticia falsa, por el contrario, el alcance de la obligación de reparar puede ser mucho más amplio, incluyendo a los proveedores de servicios de las redes sociales, lo que abarca tanto a aquellos que ofrecen el servicio de manera directa (por ejemplo, la propia plataforma de redes sociales) como a los indirectos (proveedores de alojamiento de datos) su rol en la moderación, la facilitación de la difusión o la falta de acción ante el contenido dañino podría hacerlos pasibles de responsabilidad.

Del mismo modo, en el Foro contra las Campañas de Desinformación, se incluyeron propuestas como establecer con precisión las medidas de regulación para que se logre garantizar la vigilancia de las plataformas digitales, y definir las responsabilidades de las empresas en combate contra la desinformación, de hecho, bajo el Reglamento de Servicios Digitales (RSD), estas plataformas pueden ser sancionadas si no acatan las normativas vigentes para la pronta eliminación de contenido dañino, en un mundo digital donde las noticias falsas se propagan a la velocidad de la luz, no basta con identificar a los responsables de su difusión [6].

La mención del RSD es clave debido a que este marco legal europeo transforma la ética de la moderación en una obligación legal con consecuencias tangibles, las plataformas ya no pueden simplemente ignorar el problema, dado a que, si no cumplen con las normativas establecidas para la pronta eliminación de contenido dañino, se exponen a sanciones. Lo cual representaría un cambio fundamental debido a que la lucha contra la desinformación pasaría de ser una cuestión de autorregulación o buena voluntad, a una exigencia regulatoria con implicaciones económicas y operativas significativas.

Por un lado, en España se considera fundamental modificar el sistema de responsabilidad para ciertos intermediarios, especialmente las redes sociales, dado que en la práctica contribuyen activamente a la desinformación, y para lograrlo, se propone flexibilizar los criterios para exigirles responsabilidad y, en algunos casos, invertir la carga de la prueba. Por otro lado, sería conveniente establecerles deberes de diligencia para la detección de contenido desinformativo, incluso, su responsabilidad podría configurarse de manera similar a la establecida en el Artículo 1903 del Código Civil para los empresarios por los actos de sus empleados [7].

Para abordar esta problemática, se necesita poder flexibilizar los criterios para exigir responsabilidad, lo que implica hacer más sencillo para las víctimas y las autoridades demostrar la implicación de las redes sociales en la difusión de contenido perjudicial, asimismo, un elemento revolucionario de esta propuesta es la idea de invertir la carga de la prueba, lo cual significa que las plataformas virtuales tienen la responsabilidad de demostrar que actuaron con la diligencia debida para prevenir la desinformación. Al mismo tiempo, la educación es esencial para que una sociedad combata la desinformación, de hecho, algunos gobiernos la ven como su herramienta más potente contra este problema, al educar a los jóvenes y futuros votantes, se les brinda las defensas necesarias para enfrentarse a las enormes redes de noticias falsas, algoritmos y bots que dominan las plataformas digitales, siendo crucial porque estas plataformas se han convertido en uno de los principales medios de recolección de información para la mayoría en la sociedad [8].

La relevancia de esta perspectiva radica apuesta por la prevención a través de la educación, formando de manera más integral a los jóvenes preparándolos no solo para ejercer su derecho al voto, sino también para desenvolverse de manera critica en un entorno digital cada vez más complejo. De tal manera, ellos como futuros ciudadanos y consumidores de información, necesitan desarrollar habilidades que les servirán de herramientas de defensa, las que les permitirán reconocer la manipulación de los medios y distinguir entre hechos reales o contenido distorsionado.

Por otra parte, se han planteado modelos normativos híbridos en el ámbito de la legislación sobre Internet, los cuales buscan equilibrar el derecho al anonimato en línea con la necesidad de afrontar y sancionar la difamación cibernética, estas propuestas reconocen la complejidad del entorno digital, donde la protección de la libertad de expresión debe coexistir con mecanismos para prevenir el daño al honor de las personas [9].

El planteamiento de modelos híbridos en la legislación sobre Internet representa un esfuerzo necesario para afrontar los desafíos que surgen en la esfera digital, especialmente ante fenómenos como la difamación cibernética y la circulación de noticias falsas, además si bien el anonimato en línea constituye una extensión del derecho a la libertad de expresión, no es mentira que puede ser utilizado como escudo para la impuni-

ISBN: 978-989-36481-2-4

dad, permitiendo la comisión de actos lesivos contra el honor, la privacidad o la dignidad de las personas sin consecuencias jurídicas. Finalmente, la creciente problemática de la difusión de noticias falsas en Internet, es un fenómeno que desestabiliza las sociedades, por ello, es fundamental entender que, ante los efectos de este tipo de contenido engañoso, generado con la intención de manipular, la responsabilidad civil emerge como un mecanismo jurídico clave para reparar el daño y compensar a las víctimas por los perjuicios sufridos.

Referida a esta investigación se han llegado a desarrollar los objetivos: 1) Describir las características esenciales de lo que es una noticia falsa, 2) Determinar los elementos jurídicos necesarios para configurar la responsabilidad civil derivada de la difusión de noticias falsas en internet, 3) Identificar quiénes pueden ser considerados responsables civilmente por la difusión de noticias falsas en internet y, 4) Explicar que mecanismos jurídicos deberían implementarse para prevenir los daños causados por la difusión de noticias falsas en el entorno digital.

II. Metodología

La investigación estuvo basada en un enfoque cualitativo, siguiendo una secuencia de revisión sistemática de rigurosas directrices PRISMAS 2020 con 20 artículos de investigación ubicados entre los 2018-2024 extraídos de SCOPUS, REDALYC, EBSCO, GOOGLE ACADEMIA y DIALNET que indagan sobre la responsabilidad civil referente a la difusión de fake news. Se seleccionaron artículos a través de una búsqueda diseñada para identificar con palabras claves, categorías y sus respectivos títulos enfocados en el derecho y la responsabilidad civil. Se aplicaron criterios de inclusión y exclusión precisas con el fin de seleccionar los artículos científicos que más se relacionan con el tema a tratar en diferentes idiomas tales como; español, inglés, portugués y francés. Sin embargo, algunas de ellas se excluyeron porque, aunque se traten de los temas asignados en el título de la investigación, no responden de forma explícita las preguntas (Figura 1). El resultado se encuentra en el siguiente enlace [10].

TABELA I. DISTRIBUCIÓN DE ARTÍCULOS POR PREGUNTAS

P°	Pregunta de investigación	Referencias
P1	¿Cuáles son las características de las noticias falsas?	[10], [11], [12], [13], [14]
P2	¿Cuáles son los elementos jurídicos necesarios para configurar la responsabilidad civil derivada de la difusión de noticias falsas en Internet?	[15], [16], [17], [5], [3]
P3	¿Quiénes pueden ser considerados responsables civilmente por la difusión de fake news en Internet?	[18], [19], [5], [20]
P4	¿Cuáles son los mecanismos jurídicos que deberían implementarse para prevenir los daños causados por la difusión de noticias falsas en Internet?	[9], [7], [16], [21], [22], [13]

Se detallan las etapas del proceso de selección por medio del sistema PRISMA 2020, encontrándose con un resultado final dentro del diagrama de flujo enmarcando con mayor detalle los registros excluidos y los motivos por el cual fueron separados, la falta de información en algunos de los artículos generó un resultado menor a las investigaciones obtenidas previamente.

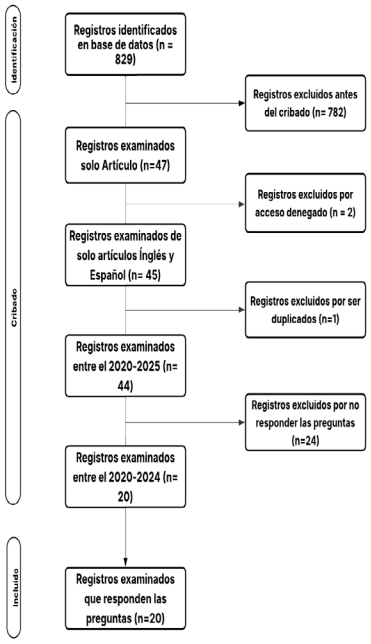


Figura 1. Diagrama Prisma

III. Resultados

A. *Características de las noticias falsas*

Cuando la información es veraz y confiable, puede volverse una herramienta esencial para la formación de opiniones, toma de decisiones y la comprensión acerca de lo que ocurre diariamente en la sociedad, sin embargo, también puede vérsele como un arma de doble filo, especialmente cuando la información ha sido manipulada con el propósito de engañar.

Este tipo de información engañosa son las llamadas noticias falsas (también conocidas como "fake news"), la cuales se han convertido en un fenómeno complejo que afecta profundamente la forma en la que las personas acceden, interpretan y comparten información, situación que resulta mucho más grave en la era digital, debido a que las plataformas virtuales como las redes sociales facilitan la proliferación de contenidos engañosos, y por tanto, es importante saber reconocer y advertir las características que permitirán distinguir las noticias falsas del resto de información disponible en línea.

En primer lugar, las noticias falsas consisten en información intencionalmente falsa y evidentemente errónea, que se distribuye por medios digitales con el objetivo de manipular la percepción y opinión del público que las recepta y comparte [11]. Asimismo, son contenidos creados o divulgados de forma deliberada con la intención de interferir en el derecho del público a estar bien informado, afectando su capacidad para distinguir entre la realidad y la invención [12].

En este contexto, la primera característica de las noticias falsas es su intencionalidad deliberada de engañar, tratándose de contenidos construidos con la intención consiente de manip-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

ular al público, y esta intencionalidad implica que no se trata de malentendidos o errores, sino de información diseñada para parecer verosímil, aunque en realidad sea falsa y fácilmente refutable.

Como segunda característica se debe destacar su medio de distribución, siendo este a través de plataformas digitales, especialmente tomando en cuenta el gran desarrollo tecnológico y masiva popularidad de las redes sociales; espacios que potencian el alcance y la rapidez de difusión de las noticias falsas, logrando llegar incluso a diversas partes del mundo al ser compartidas por millones de personas.

La tercera característica es su capacidad de manipular la emoción y percepción humana, llegando a influir en la opinión y comportamiento de las personas, debido a que, al presentarse como verdades plausibles las noticias falsas logran insertarse en el debate público diario, distorsionando la realidad y dificultando la capacidad de los ciudadanos para distinguir entre lo verdadero y lo inventado; distorsión que constituye un problema ético y social porque vulnera la calidad del discurso público y la posibilidad de mantener a la sociedad correctamente informada.

En términos generales, las noticias falsas se generan con fines específicos y mediante el uso de tácticas diseñadas para asegurar su difusión masiva, una estrategia frecuente consiste en que un primer comunicador lance una afirmación, que luego es adoptada rápidamente por otros emisores, quienes la presentan como cierta y la reproducen numerosas veces en redes sociales, muchas veces a través de cuentas falsas o bots [13].

La cuarta característica es la difusión masiva planificada, las noticias falsas no se propagan de manera aleatoria, sino que responden a una estrategia estructurada que busca maximizar su alcance, para ello se requiere una sola afirmación presentada por un emisor inicial, la cual es reproducida y amplificada por otros actores en redes sociales, como cuentas falsas o bots, generando una apariencia de consenso y veracidad.

Es necesario enfatizar en lo difícil que es identificar la intención deliberada de engañar, y eso sumado al carácter subjetivo que implica el determinar lo qué es verdadero, se halla un impedimento en la creación de sistemas realmente eficaces para filtrar las noticias falsas. Debido a que, en la mayoría de los casos, es complejo establecer si un usuario difunde una información inexacta con dolo, y además, cualquier sistema de filtrado estará inevitablemente influenciado por el sesgo que conlleva la idea subjetiva de una "verdad oficial" [14]in the written publications that emerged to control the dissemination of ideas, after the invention of the printing press. But the concept of censorship within modern constitutions does not include the control carried out by private organizations, as is the case of social networks, although the practical effects on freedom of expression and information are comparable to the censorship of the State, and even many times worse, due to the multiplier effect of the Internet. For this reason, we consider that the control of content and the blocking of user accounts, carried out in social networks, are the new form of censorship in the digital age, requiring an expansion of the concept of censorship and a change in the regulation, in the sense that the providers that carry out a content control should have a responsibility regime similar to the press editors one.","container-title":"Ibersid: revista de sistemas de información y documentación","DOI":"10.54886/ibersid.v15i2.4736","ISSN":"2174-081X","issue":"2","language":"es","license":"Derechos de autor 2021 Los autores y autoras conservan sus derechos de autor, aunque ceden a la revista de forma no exclusiva los derechos de explotación (reproducción, distribución, comunicación pública y transformación.

Siendo así que la quinta característica es la dificultad para identificar el dolo, después de todo uno de los mayores desafíos frente a este fenómeno es que no se trata únicamente de contenidos erróneos o manipulados, sino de situaciones profundamente vinculadas con el entorno digital, donde las plataformas de redes sociales como X, Instagram o WhatsApp operan bajo un sistema de inmediatez y personalización en la que la información es compartida masivamente sin filtros previos de veracidad.

Lastimosamente se han ido eliminando progresivamente las barreras tradicionales del control editorial, y cada usuario se ha transformado en un potencial emisor de contenido falso, ahora distinguir entre la difusión dolosa y un acto causado por desconocimiento o descuido se vuelve sumamente difícil y un nuevo desafío porque muchas veces los usuarios en redes sociales comparten la información sin tener la intención engañar, sino por la facilidad con la cual se logró captar su atención.

Por último, la sexta característica es el refuerzo de ideas preconcebidas, en [15] se explica cómo las fake news son la materialización de los sesgos de una sociedad dominada por la emoción y el deseo, ante ello como contrapeso, es necesario mencionar que la existencia de sociedades con una buena cultura de la información obligará a otras a realizar una confrontación con sus propios sesgos epistémicos.

El contenido engañoso no es lo único que favorece a la difusión de información falsa, su verdadera fuerza radica en la capacidad de conectar con las emociones y deseos profundamente arraigados en las personas, su impacto favorece a la disposición colectiva de priorizar las creencias propias frente a las evidencias reales, frente a ello, para llegar a una cultura sólida de información, es necesario un ejercicio constante de autocrítica, donde cada individuo debe reconocer y cuestionar sus propias ideas preconcebidas y no convertirse en cómplice pasivo de la desinformación.

En síntesis, según los autores y el análisis desarrollado, las noticias falsas presentan seis características esenciales que permiten identificarlas y comprender su funcionamiento en el entorno digital en 2025: (1) la intencionalidad deliberada de engañar, (2) la difusión a través de plataformas digitales, (3) la capacidad para manipular emociones y percepciones, (4) la difusión masiva planificada, (5) la dificultad para identificar el dolo y (6) el refuerzo de ideas preconcebidas, reconocer estas características resulta fundamental para promover una cultura de información crítica y responsable.

Elementos jurídicos necesarios para configurar la responsabilidad civil derivada de la difusión de noticias falsas en internet

Debido al avance tecnológico, las instituciones jurídicas se han visto en la necesidad de cubrir situaciones que antes no existían, un claro ejemplo es el caso de la responsabilidad civil, un mecanismo que establece la obligación de una persona de indemnizar o reparar los daños y perjuicios que cause a otra, ya sea de forma intencional (dolo) o por negligencia (culpa), esta

obligación surge independientemente de que exista o no un contrato previo entre las partes; por ejemplo, una situación posible es la difusión de noticias falsas en internet, lo cual lleva a las personas a sufrir una afectación pasible de una indemnización.

En [16] se estableció que la responsabilidad civil por publicaciones falsas presenta múltiples dificultades, comenzando por la definición de sus propios elementos constitutivos, estas complejidades incluyen: i) Identificar al responsable cuando el autor es anónimo o cuando el contenido proviene de publicidad automatizada generada por inteligencia artificial; ii) Determinar quién tiene derecho a demandar por los daños sufridos, dado que los perjuicios colectivos o sociales causados por la desinformación parecen no poder repararse fácilmente, cualquier límite podría interpretarse como censura; y iii) Delimitar los mecanismos para detener el daño en curso y compensar los perjuicios inmateriales causados.

Además, estos autores ofrecen una síntesis lúcida sobre los desafíos jurídicos de la responsabilidad civil derivada de publicaciones falsas en la era digital, destacando tres complejidades estructurales particularmente vigentes. En primer lugar, identifican con acierto la crisis de atribución de responsabilidad, en segundo término, exponen la paradoja fundamental entre reparación y censura, finalmente, subrayan la insuficiencia de los mecanismos jurídicos tradicionales (cesación del daño y reparación inmaterial) para abordar lesiones complejas, difusas y de naturaleza psicológico-social propias de la desinformación digital.

En [17] se mencionó que, además de los requisitos del dolo o culpa grave, así como el daño y el nexo causal, es necesario evaluar criterios adicionales para establecer la responsabilidad. Esto aplica tanto por la publicación de noticias falsas como por comentarios dañinos, y se basa en tres elementos: i) Material: La difusión masiva de información "errónea". ii) Cognoscitivo: El conocimiento efectivo de que la información creada o difundida es falsa iii) Volitivo: La intención de engañar o confundir al público, o a una parte de él, mediante la acción u operación realizada.

En la legislación de la mayoría de países latinoamericanos, los elementos de la responsabilidad civil son tradicionalmente el factor de atribución, el daño, el nexo causal y la antijuricidad, aunque estos elementos son necesarios para el autor, considera que son insuficientes para abordar la complejidad y el impacto único de las acciones en redes sociales.

Sin embargo, [18] menciona que en el país de Uruguay no existe regulación expresa en su ordenamiento jurídico para este ámbito de responsabilidad civil por difusión de noticias falsas, entonces debe aplicarse la estructura de la responsabilidad extracontractual. Para ello, es preciso establecer los elementos clásicos: un hecho antijurídico, un factor de imputación (dolo o culpa), un nexo causal y un daño indemnizable; así se logra transferir la carga de la reparación desde la víctima hacia el responsable

Esto es un llamado de atención a los legisladores para que en casos de difusión de noticias falsas se configuren elementos adicionales que puedan ayudar a resolverlos de manera satisfactoria ayudando a reparar el daño causado a la víctima; todo esto situándose ante una laguna que obliga a buscar soluciones en figuras jurídicas generales. Además, el autor menciona que se debe encapsular en la responsabilidad civil extracontractual, debido a que el tipo de responsabilidad en la que las partes no están vinculadas por un contrato de por medio.

En [5] se explicó que en estos casos específicamente, los requisitos del dolo y la culpa grave permiten gestionar la responsabilidad civil con mayor conciencia del conflicto entre el derecho al honor de figuras públicas y la libertad de expresión de los medios de comunicación.

El autor reconoce que el conflicto honor vs. libertad de expresión no se resuelve con prohibiciones absolutas, sino mediante criterios que gradúen la responsabilidad como el dolo/culpa grave, los cuales actúan como filtros calibrados. El dolo en cuanto sancionar solo intencionalidad maliciosa (como las campañas de difamación planeadas) y la culpa grave, que cubre negligencias inexcusables (como el publicar sin la mínima verificación); agregando, el autor menciono que es para personajes públicos, por lo que podría aplicarse sin distinción si es o no la persona un personaje público.

En [3] se establece que, el daño generado por noticias falsas deriva siempre de una conducta antijurídica, la creación, publicación o distribución infringe normas del ordenamiento jurídico. Para que proceda su reparación, resulta indispensable acreditar concurrentemente la existencia de un nexo causal entre la acción y el perjuicio ocasionado, así como la existencia de un factor de atribución (objetivo o subjetivo) que permita imputar responsabilidad al agente causante.

Para los autores los elementos de la responsabilidad civil por difusión de noticias falsas se clasifican en dos grupos, primero están los tradicionales como son: i) la antijuricidad, porque se trata de un hecho contrario a las normas ii) Factor de atribución, que determinará si el hecho fue cometido con dolo o culpa iii) Relación de causalidad, este es el nexo que une el hecho con el daño producido a la persona y por último iv) El daño, se debe establecer qué tipo de daño sufrió la víctima.

También está el segundo grupo de elementos, los no convencionales, como: i) Material: La difusión masiva de información "errónea", esto se refiere a la acción física de concretar la divulgación de la información. ii) Cognoscitivo: El conocimiento efectivo de que la información creada o difundida es falsa, tiene que ver con el estado mental de la persona que difunde esta información. iii) Volitivo: La intención de engañar o confundir al público, o a una parte de él, mediante la acción u operación realizada

Por lo tanto, cuando se trata de responsabilidad civil por difusión de noticias falsas, los elementos que configuran si hay o no responsabilidad por parte de la persona que realiza estos actos en internet son: la antijuricidad (lo que implica que la acción sea contraria a lo establecido en las normas), el factor de atribución (que corresponde a evaluar si fue con dolo o culpa), el nexo causal (la relación entre el hecho y el daño producido) y por último, establecer el daño ocasionado a la víctima.

Responsables civilmente por la difusión de fake news en internet

La proliferación de las fake news en el mundo digital ha generado un desafío jurídico crucial, el determinar quiénes de-

ISBN: 978-989-36481-2-4

ben responder civilmente por los daños derivados de la desinformación, esto es consecuencia de la ausencia de regulaciones específicas en muchos ordenamientos. En este caso, la responsabilidad civil extracontractual se rige como el mecanismo clave para atribuir consecuencias jurídicas a los creadores de estas noticias, difusores e incluso las plataformas digitales.

Para [19], la difusión de contenido ilícito que ocurre a través de redes sociales, podría recaer sobre: (i) el autor directo de la intromisión, quien mantiene siempre su responsabilidad sobre el contenido publicado; (ii) los demás usuarios que comparten y replican dicho material; (iii) el medio de comunicación que eventualmente publique la noticia; y (iv) la propia plataforma digital que aloja la difusión ilegítima.

Siendo esta propuesta acertada, porque reconoce que la responsabilidad no recae solamente en un único actor, sino que se distribuye según el grado de participación en la difusión del material ilícito, esto resulta esencial para establecer un marco jurídico y ético preciso, que permita asignar sanciones diferenciadas a cada parte involucrada. Además, subraya la necesidad de equilibrar la libertad de expresión con la protección frente a contenidos ilegítimos, sin caer en una responsabilidad desproporcionada hacia un solo eslabón de la cadena.

Por un lado, para muchos autores, adicionalmente son los usuarios de redes sociales los responsables, porque cuando uno de ellos comparte o replica contenido ilícito, no solo le da validez ante su propia red de contactos, sino que también amplifica su alcance; lo que podría haber sido una publicación limitada a unos pocos, se convierte en material accesible para cientos, miles o incluso millones de personas.

Por otro lado, otros responsables serían las empresas que difunden las denominadas "noticias falsas", puesto que, ese caso se configura cuando el accionante acredita que la publicación se realizó con malicia, siendo situaciones en donde el juez puede atribuir la responsabilidad al medio de comunicación y disponer al pago de una indemnización compensatoria; dado a que, por ejemplo, para determinar el grado de malicia con el que se difundió la noticia falsa en Ecuador aplican el estándar de real malicia [20].

Es así que, la responsabilidad civil de la empresa se activa si se demuestra que el medio actuó con intención deliberada de perjudicar o con conocimiento de la falsedad del contenido. Este es el corazón del concepto de "real malicia", que no sea solo de un error o mala imprecisión, sino una actuación dolosa, donde la empresa sabía que la información era falsa y actuó con una temeraria despreocupación.

Ahora bien, está claro que los medios de comunicación pueden ser considerados civilmente responsables cuando difunden noticias falsas sobre cualquier individuo, responsabilidad que surge si los medios actúan con dolo (intención de causar daño) o con culpa (negligencia o descuido al verificar la información), siendo que su omisión o intención igual deviene en responsabilidad [5].

Por último, otro responsable es la propia plataforma digital que aloja la difusión ilegítima, y es respecto a este punto que, el país de México cuenta con un Tratado con Estados Unidos y Canadá de 2018, el cual limita generalmente la responsabilidad legal de las plataformas digitales por el contenido que suben sus usuarios. Sin embargo, esta protección no aplica para los casos de derechos de autor, aquí, el tratado exige un sistema donde, si se notifica a la plataforma sobre una infracción, esta puede decidir retirar el contenido sin un proceso legal formal [21].

El tratado establece una limitación de la responsabilidad legal de las plataformas por el contenido que sus usuarios suben, esto es fundamental, porque les permite operar sin la constante amenaza de litigios por cada publicación de sus millones de usuarios. En esencia, las plataformas no son tratadas automáticamente como editoras del contenido de terceros, lo que evita que sean responsables por difamación, incitación al odio, o desinformación, entre otros.

En definitiva, la lucha contra la desinformación en el entorno digital exige un enfoque multifacético de responsabilidad civil, después de todo no solo se debe apuntar al creador original, sino también a la cadena de difusión, incluyendo a los usuarios y los medios que replican con malicia, así como evaluar el papel y las obligaciones de las propias plataformas digitales que fungen como hospedadores de este vasto intercambio de información.

Mecanismos jurídicos que deberían implementarse para prevenir los daños causados por la difusión de noticias falsas en internet

Ante el crecimiento masivo de la desinformación en entornos digitales, surge la necesidad de establecer herramientas eficaces que permitan prevenir y reparar los daños ocasionados por la difusión de noticias falsas, en ese contexto, la responsabilidad civil se presenta como una vía legítima para atribuir consecuencias jurídicas a quienes contribuyen a la propagación de información falsa que afecta derechos como el honor, la imagen, la reputación o incluso la seguridad de las personas.

Por tanto, resulta pertinente analizar qué mecanismos jurídicos deberían implementarse o fortalecerse para responder adecuadamente ante los desafíos y peligros que presenta este fenómeno, dentro de un marco respetuoso de los principios constitucionales y del equilibrio entre importantes garantías como la libertad de expresión y la protección de los derechos de la personalidad.

Además, se han planteado enfoques híbridos en materia de legislación de internet, que buscan equilibrar el respeto al derecho al anonimato con el reconocimiento de los problemas derivados de la difamación en internet [9]. Asimismo, se debe replantear el régimen de responsabilidad aplicable a ciertos intermediarios que participan de forma activa en la difusión de desinformación, especialmente en redes sociales, flexibilizando los criterios para atribuirles responsabilidad e incluso, considerando la posibilidad de invertir la carga de la prueba en determinadas situaciones [7].

La protección del anonimato, ha sido históricamente un elemento esencial para salvaguardar la libertad de expresión, especialmente en contextos donde la opinión o la crítica pública podrían conllevar represalias, sin embargo, cuando ese anonimato se convierte en un escudo para la comisión de actos lesivos, como la difamación o la difusión de noticias falsas en entornos digitales, se vuelve imprescindible establecer límites claros que permitan responsabilizar efectivamente a quienes incurren en estas conductas.

ISBN: 978-989-36481-2-4

No se busca eliminar la protección del anonimato, sino de introducir mecanismos jurídicos que permitan diferenciar entre su uso legítimo y su utilización con fines ilícitos, en tal sentido, uno de los mayores desafíos es la figura de los intermediarios digitales, en particular las redes sociales y plataformas que actúan como canales privilegiados para la circulación masiva de contenidos.

Si bien, tradicionalmente, a las plataformas se les ha eximido de responsabilidad bajo el argumento de que, no generan directamente el contenido que alojan, en realidad en muchos casos su papel va más allá de una simple función técnica. El uso de algoritmos de recomendación, la monetización de contenidos y la falta de filtros efectivos, todo contribuye activamente a la amplificación de la desinformación, por ello, resulta necesario flexibilizar los criterios legales que determinan su responsabilidad, permitiendo que sean considerados corresponsables cuando su intervención resulta determinante en la propagación del daño.

Además, la propuesta de invertir la carga de la prueba en determinados supuestos representa una herramienta jurídica relevante para lograr equilibrar la posición entre los afectados y los intermediarios, quienes usualmente cuentan con los medios técnicos y la información necesaria para esclarecer los hechos, esta medida no busca vulnerar el debido proceso, sino corregir las asimetrías que impiden a las víctimas de la difusión de información el poder acceder a una tutela efectiva de sus derechos de forma igualitaria y a obtener una reparación justa por el daño causado.

En relación a lo anterior, para determinar la forma de reparar el daño, es necesario atender a las particularidades del caso concreto, especialmente si existe la posibilidad de una reparación en especie. La cuantificación del perjuicio dependerá de diversos elementos, tales como la afectación específica al honor, la existencia o no de un intercambio previo en la red social, si el autor obtuvo algún provecho a raíz del agravio, así como la cantidad de seguidores de cada cuenta y el alcance real o potencial del contenido ofensivo, todo ello deberá ser acreditado mediante los medios probatorios correspondientes [18].

La reparación del daño en el contexto digital exige un enfoque flexible ante las particularidades del caso, la posibilidad de optar por una reparación en especie, como una disculpa pública o la eliminación del contenido ofensivo, cobra relevancia cuando se afecta un bien jurídico como el honor, difícil de cuantificar económicamente, es por ello que la evaluación del perjuicio debe considerar factores específicos como la existencia de provocaciones previas, el beneficio obtenido por el autor de la lesión o el alcance efectivo del contenido a través de la red.

A la vez, otro mecanismo jurídico importante para prevenir la difusión de noticias falsas se explica en [16], la intervención estatal que implique el bloqueo total de sitios web, direcciones IP, puertos o protocolos de red constituiría una medida de carácter excepcional, cuya legitimidad solo podría sostenerse si está prevista expresamente por la ley y resulta indispensable para salvaguardar un derecho humano o algún otro interés público legítimo, además, dicha acción debe cumplir con el principio de proporcionalidad, evidenciar la inexistencia de alternativas menos lesivas y garantizar, en todo caso, el respeto al debido proceso.

En el marco del combate contra la desinformación en entornos digitales, la adopción de medidas estatales como el bloqueo de sitios web o direcciones IP representa una propuesta que debe ser analizada con cautela porque si bien los Estados tienen la responsabilidad de proteger a la ciudadanía frente a contenidos que pueden afectar gravemente el orden público o los derechos fundamentales, los mecanismos jurídicos que se implementen para tal fin deben conservar criterios y garantías mínimas que aseguren la posibilidad de defensa y transparencia.

Por ello, antes de recurrir a restricciones severas, el ordenamiento jurídico debería priorizar estrategias como la regulación clara de responsabilidades de las plataformas y la implementación de mecanismos de control de contenidos nocivos, de este modo, se propicia una respuesta equilibrada que combate la propagación de noticias falsas sin comprometer el ejercicio pleno de las libertades fundamentales.

En relación a lo anterior, resulta evidente que la sociedad muestra una creciente preocupación sobre esta problemática, como lo demuestra la adopción de instrumentos como Código de Conducta y la implementación de mecanismos destinados a informar a las plataformas sobre la presencia de contenidos ilícitos o, en su caso, proceder directamente a su eliminación; enfrentar eficazmente este fenómeno requiere una acción coordinada por parte de todos los actores involucrados en el entorno digital, incluidos tanto los generadores de contenido como los prestadores de servicios de intermediación [22].

La elaboración de códigos de conducta para las empresas y la creación de mecanismos para reportar o suprimir contenidos nocivos, reflejan un cambio hacia una gobernanza digital más corresponsable, este enfoque reconoce que la prevención y mitigación de los daños en el entorno digital no puede depender únicamente del Estado, sino que exige la participación activa de todos los actores del ecosistema, desde los usuarios hasta las grandes plataformas tecnológicas, en ese sentido, se consolida una lógica de responsabilidad compartida que obliga a los proveedores de contenido y a los intermediarios a adoptar medidas proactivas para evitar la propagación de información ilícita o dañina.

Como último mecanismo de prevención, es esencial mencionar la importancia de educar e informar a la sociedad, puesto que resulta imprescindible que tanto las instituciones educativas, como los organismos gubernamentales, desarrollen iniciativas orientadas a sensibilizar a la ciudadanía respecto del marco normativo que regula la desinformación en entornos digitales, con el fin de fomentar prácticas responsables y éticamente informadas en el uso de las tecnologías de la información [23].

Asimismo, las formas más efectivas de combatir las noticias falsas son el acceso a la información veraz y la educación, esto hace referencia a poder responder a la desinformación con hechos comprobables y con el uso de razonamientos sólidos, al mismo tiempo que se realizan capacitaciones dirigidas al usuario para identificar y diferenciar fuentes confiables de aquellas que no lo son en el entorno digital [14].

El combatir la desinformación requiere de estrategias preventivas para poder informar a la ciudadanía y fortalecer las capacidades críticas de los usuarios desde edades tempranas, así la educación digital adquiere un rol protagónico al permitir que

ISBN: 978-989-36481-2-4

los ciudadanos identifiquen contenidos falsos, adquieran conocimientos sobre los límites legales aplicables, y de esta manera, se podrá promover un uso más responsable y ético de los entornos digitales.

En síntesis, los mecanismos jurídicos para prevenir los daños causados por la difusión de noticias falsas en internet, se configuran a partir de la aplicación de la responsabilidad civil como vía para atribuir consecuencias jurídicas y garantizar la reparación integral del daño a los derechos afectados, a ello se suma la necesidad de regular de manera más efectiva el rol de los intermediarios digitales, establecer límites al uso abusivo del anonimato y definir criterios claros para la aplicación excepcional de medidas como el bloqueo de contenidos; mecanismos que deben complementarse con estrategias de educación digital que promueva un entorno informativo más ético y respetuoso de los derechos fundamentales.

Conclusiones

Se describió las características de las noticias falsas, entre las cuales se encuentran la intencionalidad deliberada de engañar, la difusión a través de plataformas digitales, la capacidad para manipular emociones y percepciones, la difusión masiva planificada, la dificultad para identificar el dolo y el refuerzo de ideas preconcebidas.

Se determinó que la responsabilidad civil por la difusión de noticias falsas en internet se configura mediante dos grupos de elementos: los tradicionales (antijuricidad, factor de atribución, relación de causalidad y daño) y los no convencionales, este último grupo se enfoca en la acción física de la difusión masiva (material), el conocimiento de que la información es falsa (cognoscitivo) y la intención de engañar al público (volitivo).

Se identificó quiénes pueden ser considerados responsables civilmente por la difusión de noticias falsas en internet, originalmente se considera responsable al creador de las noticias falsas, también a todos aquellos que participan en su propagación, la responsabilidad recae en la cadena de difusión, incluyendo a los usuarios que replican y amplifican el contenido, a los medios de comunicación que lo difunden con malicia, y a las plataformas digitales que lo alojan.

Se explico los mecanismos jurídicos para prevenir la difusión de noticias falsas en internet, entre los cuales destacan de la aplicación de la responsabilidad civil como vía para atribuir consecuencias jurídicas y garantizar la reparación integral del daño a los derechos afectados, que se regule efectivamente el rol de los intermediarios digitales, establecer límites al uso abusivo del anonimato y implementar de educación digital.

Agradecimientos

Los autores agradecemos a la Unidad de Investigación y Semilleros de la Universidad Privada Antenor Orrego de Perú.

Referencias Bibliográficas

[1] L. Cardoso de Melo, C. Goncalves, y U. Coelho, «Fake News nas eleições, direito da personalidade e responsabilidade», REVISTA FOCO, vol. 16, n.o 02, pp. e922-e922, feb. 2023, doi: 10.54751/revistafoco.v16n2-061.

[2] L. Taboada, «Elementos de la Responsabilidad Civil». 2003.

[3] I. Soria, «Derecho al honor vs derecho a la libertad de expresión: la necesidad de un cambio paradigmático ante el avance de las "fake news" a partir del estudio del derecho argentino». 2024. [En línea]. Disponible en: https://dspace.uces.edu.ar/handle/123456789/7029

[4] K. Domínguez, «Daño moral en redes sociales: su tratamiento procesal en el derecho comparado», Revista IUS, vol. 14, n.o 46, pp. 163-182, 2020.

[5] C. Banfi del Río, «Por una responsabilidad civil de los Medios de comunicación coherente con el riesgo de divulgación de noticias falsas sobre personas públicas», Ius et Praxis, vol. 24, n.o 3, pp. 255-308, dic. 2018, doi: 10.4067/S0718-00122018000300255.

[6] B. Souto, «El impacto de la desinformación en la propagación del discurso de odio racista y xenófobo». Revista de Derecho Político, 2024.

[7] C. Castells, «Bulos virtuales, daños reales: la responsabilidad civil por desinformación a través de nuevas tecnologías: Virtual hoaxes, real damages: civil liability for misinformation via new technologies», Cuadernos de Derecho Privado, vol. 2, n.o 2, Art. n.o 2, 2022, doi: 10.62158/cdp.18.

[8] J. Sánchez y D. Salazar, «Plataformas digitales y fake news: ¿una amenaza a la democracia?», Democracia Actual, vol. 6, n.o 1, Art. n.o 1, jun. 2021, doi: 10.56332/2745029569.O. Müller, «¿Sueñan las inteligencias artificiales con ser autoras?», Av. En Psicol. Latinoam., vol. 41, n.o 1, Art. n.o 1, 2023, Accedido: 2 de septiembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.redalyc.org/journal/799/79977693001/

[9] A. Ramos, «De lugar para los sin voz a espacio de difamación digital: los resquicios de la información para la solución de problemáticas sociales en Internet», E-Ciencias de la Información, vol. 11, n.o 2, pp. 172-190, dic. 2021, doi: 10.15517/eci.v11i2.44226.

[10] D. Carrizo y C. Moller, «Estructuras metodológicas de revisiones sistemáticas de literatura en Ingeniería de Software: un estudio de mapeo sistemático». Revista chilena de ingeniería, 2018.

[11] G. Sued y M. Rodríguez, «Noticias falsas en Facebook: narrativas, circulación y verificación. Los casos de Argentina y México». Accedido: 3 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://revistas.ucm.es/index.php/ESMP/article/view/65136

[12] N. M. Grandi, «Robots reporteros y fake news: una mirada sobre la responsabilidad jurídica de la inteligencia artificial en el campo de la desinformación», en Actas de Periodismo y Comunicación Social, 2020. Accedido: 21 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/123406

[13] M. Álvarez, M. Batista, y N. A. N. Tovilla, «Fake news, comunicación y diseño: trascendencia, impacto y responsabilidad social», n.o 25, Art. n.o 25, ago. 2023, doi: 10.24275/issn.2954-3770.n25.a72.

[14] J. Gonzales, «El control de contenidos en las redes sociales: la nueva forma de censura de la era digital», Ibersid: revista de sistemas de información y documentación, vol. 15, n.o 2, Art. n.o 2, nov. 2021, doi: 10.54886/ibersid.v15i2.4736.Lorenzo. Cotino, «Qué concreta transparencia e información de algoritmos e inteligencia artificial es la debida». Accedido: 21 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-85161620616&origin=reflist&sort=plf-f&src=s&sid=aa47904c6a469424b3957329ad185ffb&sot=b&sdt=b&sl=112&s=TITLE-ABS-KEY%28The%22transformative+use%22of+AI+companies%3a+between+creative+freedom+and+intellectual+property+rights%29

[15] M. I. Puente, «Noticias falsas: una perspectiva jurídica mexicana», Derecom: Revista Internacional de Derecho de la Comunicación y las Nuevas Tecnologías, n.o 32, p. 3, 2022.

[16] J.-T. Jiménez-Escalante y D. Guerra-Moreno, «Fake news, libertad de expresión y derecho a la información, un nuevo reto para la responsabilidad civil», Saber, ciencia y libertad, vol. 17, n.o 1, pp. 138-174, 2022.

[17] M. Daza, «Responsabilidad del Estado en el uso de las redes sociales», Pluriverso, vol. 14, n.o 14, Art. n.o 14, 2020, doi: 10.24142/pluriverso.n14a2.

[18] M. Cánepa, «Responsabilidad civil por lesión al derecho de honor en redes sociales», Revista de Derecho, vol. 17, n.o 33, Art. n.o 33, dic. 2018.

[19] M. Silva, «La protección del derecho al honor de las personas jurídicas en redes sociales. La vía civil y la responsabilidad de las plataformas digitales». Revista Aranzadi Doctrinal, 2022.

[20] J. Ortiz, «¿Real malicia? Descifrando un estándar foráneo de protección del derecho a la libertad de expresión para su aplicación en Ecuador», Derecho PUCP, n.o 85, Art. n.o 85, nov. 2020, doi: 10.18800/derechopucp.202002.011.

[21] A. Bizberge y M. Segura, «Los derechos digitales durante la pandemia COVID-19 en Argentina, Brasil y México», Revista de Comunicación, vol. 19, n.o 2, pp. 61-85, feb. 2020.

[22] M. Beltrán, «La responsabilidad civil en las redes sociales», 2022, Accedido: 20 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://repositorio.comillas.edu/xmlui/handle/11531/59721

[23] D. Vega, F. Vásquez, A. Guevara, I. Maldonado, y M. Maldonado, «Desinformación en la era digital: el papel de las redes sociales en la propagación de noticias falsas durante conflictos globales», LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, vol. 5, n.o 2, Art. n.o 2, mar. 2024, doi: 10.56712/latam.v5i2.1865.

[24] Amaya Garcia, N., y Fernandez Silva, A. (2025). Resource - Civil liability for the dissemination of false news on the internet: A systematic review of the literature. figshare. Online resource. https://doi.org/10.6084/m9.figshare.30978967.v1

ISBN: 978-989-36481-2-4

Plan de calidad de datos para el proceso de facturación en las Corporaciones Autónomas Regionales de Colombia – Caso: Corpocesar

Data quality plan to billing process for Colombia's Regional Autonomous Corporations - Case: Corpocesar

Mauricio Garcés Ordóñez
Corporación Autónoma Regional del Cesar
Valledupar - Cesar, Colombia
mauricio.garces@corpocesar.gov.co

Mayda Patricia González Zabala
Facultad de Ingeniería, Universidad del Magdalena
Santa Marta - Magdalena, Colombia
mpgonzalez@unimagdalena.edu.co

***Resumen* — Este artículo presenta los costos estimados por la mala calidad de los datos en CORPOCESAR debido a falencias y debilidades en la administración y gestión de la información en el proceso de facturación. El proceso se desarrolló mediante cuatro etapas, en la primera se dimensionaron los costos por la mala calidad de los datos. Para la segunda se identificaron las fuentes de información que componen el proceso y se caracterizaron los atributos seleccionados. La tercera consistió en el perfilado de los datos a través del software seleccionado y el análisis de los resultados. Por último, se definieron las acciones que componen el plan. Como resultados se obtuvo el diagnóstico de las fuentes de información y el plan de calidad de datos para la mejora de estos. Su implementación disminuyó los hallazgos en la administración y gestión de datos, mejoró la efectividad de gestión de la cartera y aumentó el recaudo.**

Palabras **Clave - Gobierno de datos; Calidad de datos; CAR; Perfilado de datos; Plan de calidad de datos.**

***Abstract* — This article presents the estimated costs of poor data quality at CORPOCESAR due to shortcomings and weaknesses in information management and administration during the billing process. The process was developed in four stages. The first stage involved quantifying the costs associated with poor data quality. The second stage identified the information sources that comprise the process and characterized the selected attributes. The third stage consisted of profiling the data using the selected software and analyzing the results. Finally, the actions comprising the plan were defined. The results included a diagnosis of the information sources and a data quality plan for their improvement. Its implementation reduced the findings related to data management and administration, improved the effectiveness of portfolio management, and increased collections.**

Keywords - Data governance; Data quality; CAR; Data profiling; Data quality plan.

I. Introducción

La inadecuada gestión en los datos que impiden el mejoramiento de las organizaciones provienen, entre otras, de [1], [2], [3]: 1) carencia de personal cualificado que conlleve a la elección ideal, 2) herramientas complejas y costosas, 3) falta de integración de los datos desde su fuente, 4) problemas al visualizar datos, 5) falta de apoyo y acompañamiento, y 6) pobre calidad de los datos. Así las cosas, las organizaciones han visto la importancia de invertir en herramientas y técnicas que orienten el fortalecimiento de la utilización de la información para crear expectativas que generen valor a la empresa [4] desde la óptica del mejoramiento de la calidad de los datos.

El sector público en Colombia, en búsqueda de la eficiencia administrativa y operativa utiliza las Tecnología de la Información y Comunicaciones (TIC) como instrumento apalancador para la Transformación Digital de los paradigmas que entrega la cuarta revolución de los datos [5] como activo de valor en los ejercicios de gobierno y gestión del ciclo de vida de los componentes de información [6], la entrega de datos abiertos con calidad [7], dar cumplimiento a sus estrategias y la generación de nuevos conocimientos [8], [9].

Las Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (CAR) son entes de carácter público que administran en su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables propendiendo por el desarrollo sostenible del país [10], se apalancan, entre otros, con ingresos generados por la prestación de servicios ambientales e ingresos provenientes del cobro de tasas y multas de acuerdo a las directrices e instrumentos económicos diseñados por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MinAmbiente) [11] en virtud de la utilización de los recursos naturales renovables. Actualmente, existen 33 CAR en todo el territorio nacional.

De acuerdo con la Contraloría General de la República (CGR), quien es el máximo órgano de control fiscal en Colombia y tiene como función el vigilar la gestión de los recursos y bienes públicos para garantizar su uso eficiente, encontró que existen pérdidas millonarias generadas por parte de las CAR. Lo cual implica que se ha subestimando el Activo y Patrimonio del país, ocasionando detrimento patrimonial a los recursos

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

ISBN: 978-989-36481-2-4

del Estado, evidenciando falencias y debilidades en la administración y gestión de la información, en especial en los procesos de facturación de tasas y servicios ambientales [12].

Específicamente, la revisión a la Corporación Autónoma Regional del Cesar (CORPOCESAR), quien es la autoridad ambiental del departamento del Cesar, permitió evidenciar que tiene falencias en el proceso de facturación provenientes de la administración de los datos necesarios para calcular los cobros, lo que acarrea que no se tenga conocimiento de los estados reales de las deudas de los usuarios y retrasos en el proceso de registro, emisión, generación y entrega de facturas. Estas situaciones dificultan el inicio de procesos de cobros persuasivos y coactivos, y no permiten reflejar información financiera razonable de los Activos, Pasivos y Patrimonios de la Entidad [13]. Por tal razón, surge la necesidad de establecer acciones encaminadas a mejorar la calidad de los datos del proceso de facturación con el fin de mitigar los inconvenientes en la administración de datos que afecta el recaudo en las CAR.

Este documento presenta el diseño de un plan que ayuda a mejorar la calidad de los datos del proceso de facturación de tasas y servicios ambientales desde la puesta en práctica en CORPOCESAR, específicamente a la Tasa por Utilización de Agua (TUA) a partir de la aplicación de la metodología propuesta en [14] que se enfoca en la planificación, caracterización de fuentes y atributos, evaluación, análisis o diagnóstico de calidad de los datos, construcción del plan y, la validación y monitoreo que corresponde a la fase "Controlar" con el propósito de servir como instrumento base para la adopción en las CAR o en otras organizaciones. Es de anotar, que los resultados que se exponen en este artículo hacen parte de una investigación más amplia, dirigida al diseño de una guía de implementación de un gobierno de datos enfocado en calidad de datos en entidades públicas de carácter regional en Colombia [12].

El presente documento ha sido organizado como sigue: un primer apartado en el cual se presenta la introducción al asunto a abordar que incluye las problemáticas que tienen las CAR en Colombia en relación con la calidad de sus datos. Posteriormente, se presenta la metodología utilizada y los resultados obtenidos. Finalmente, las conclusiones y referencias bibliográficas.

II. Metodología

Esta investigación se desarrolló mediante la ejecución de las siguientes etapas, las cuales fueron ejecutadas por el Profesional Especializado del área de Sistemas y TICs y, revisadas y/o ajustadas en conjunto con los profesionales del Grupo Interno de Trabajo para la Gestión del Seguimiento al Aprovechamiento del Recurso Hídrico, encargados de la gestión de datos de la TUA y el área de Tesorería, perteneciente al Grupo Interno de Trabajo para la Gestión Financiera, encargados de la gestión de la liquidación y el cobro de las tasas y servicios ambientales:

1) Dimensionamiento de los costos del problema de calidad de datos que consistió en la cuantificación en pesos colombianos de los hallazgos identificados por la CGR asociados a la administración de datos en CORPOCESAR con el fin de generar un impacto positivo de cara a los productores de datos para establecer oportunidades de mejora y reducción de pérdidas monetarias significativas para la entidad,

2) Identificación y mapeo de las fuentes de información que se consideran para el cálculo de las tasas a cobrar por parte de la CAR, especialmente para el cálculo de la TUA; además de detallar los atributos de los campos a analizar,

3) Perfilamiento de datos en la que, de acuerdo con la aplicación de las fases que componen la metodología para la implementación de un Gobierno de Datos enfocado en Calidad de Datos propuesta en [14], se crearon perfiles de los campos seleccionados a través de una herramienta de software y se realizó el análisis de los resultados del perfilado. Además, se definieron los indicadores de calidad a medir, para así, analizar los resultados obtenidos y determinar características particulares de los datos que servirán como una base para darle continuidad a la construcción y presentación del Plan de Calidad del Dato, de acuerdo con lo descrito en [14],

4) Creación de un plan donde se presentan las estrategias y las acciones a tomar con el fin de mejorar la calidad de datos el cual es el instrumento que permitirá evaluar la evolución de la calidad en los datos del proceso de facturación de las CAR.

III. Análisis y resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en cada etapa:

A. Dimensionamiento de los costos del problema

Para cuantificar el costo de los problemas de fallas de la calidad de datos se consultó la información reportada por los entes de control nacional en los informes de Auditoría Gubernamental con Enfoque Integral – Modalidad Regular. En estos reportes se analizaron todos los hallazgos descritos por el órgano de control y se consolidó la cuantificación de los costos (ver TABLE I) de los hallazgos por el mal manejo de la información, carencia de políticas y procedimientos para los años que van desde el 2015 al 2021 en CORPOCESAR [12], los cuales, al 17 de marzo del año 2025, equivaldría a USD 2,055,773,500.96.

TABLE I. Costos por datos sin calidad

Vigencia Auditada	Detalle Hallazgo	Costo Estimado ($)
2015	No registro de deudores	2,118,800,000.00
2016	No registro de intereses de mora por TRVP, TUA y Sobretasa Ambiental. Riesgo de prescripción de cobros de TRVP, TUA y Multas	44,313,115,893.90
2017	No registró de deudores de la Sobretasa Ambiental y TUA del 2015. Dejó de facturar TUA y Cobro no realizado en el 2014	3,910,068,990.00
2018	Deterioro de cuentas. Consignaciones por identificar y facturas no registradas	26,768,186,994.00

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Vigencia Auditada	Detalle Hallazgo	Costo Estimado ($)
2019	Facturas sin registrar, Inconsistencia en la información sobre Metas y reporte de indicadores, Registro de Sobretasa Ambiental, Consignaciones por identificar y Bajo recaudo de Tasas por Uso de Agua, Retributiva y Sobretasa Ambiental	2,066,462,524
2020	Usuarios de la TUA sin facturar por falta de identificación, bajo Recaudo Tasa Retributiva, Tasa por Uso de Agua, y Sobretasa Ambiental. Consignaciones por identificar	2,169,217,523
2021	Bajo Recaudo Tasa Retributiva y Tasa por Uso de Agua. Usuarios de la TUA sin facturar por falta de identificación	2,931,683,791
Total Costo		**$84,277,535,715.87**

En los resultados de las auditorias de las vigencias del período de 2015 al 2021 para CORPOCESAR se evidenciaron debilidades en la gestión de los cobros persuasivos y coactivos de tasas con acciones de cobro prescritas, deudores de la sobretasa ambiental, saldos de naturaleza contraria de deudores, recaudos a favor de terceros y consignaciones por identificar debido a la ausencia e incongruencias de datos. También, encontró falencias en el control de las cuentas por cobrar en reclamación, la gestión de la liquidación, facturación y las cuentas por cobrar de difícil recaudo de la TUA, Tasa Retributiva por Vertimientos Puntuales (TRVP) y sobretasa ambiental con posible prescripción de cartera [13]. La mala gestión de los datos de liquidación, facturación y cobro produjo unos costos aproximados de $84,277,535,715.87 pesos para las vigencias analizadas como se muestra en la TABLE I. De los cuales, las cifras más altas en los hallazgos sobre la gestión de información están en las vigencias 2016 y 2018 con un total de $44,313,115,893.90 y $26,768,186,994 pesos que equivalen a un 52.58% y 31.76%, respectivamente. Seguido se encuentra el año 2017 con un 4.64% del total de los costos correspondientes a $3,910,068,990 pesos y, para el año 2021 se tienen unos costos de $2,931,683,791 pesos para una participación del 3.48%. Para las otras vigencias, su representación está por debajo del 3%.

B. Identificación de las fuentes de información

Para la identificación de las fuentes de información que se consideraron para el cálculo de las tasas de cobro se realizó una reunión con los responsables de la liquidación y facturación, quienes explicaron el proceso e indicaron que tienen dos sistemas para el reporte de datos. Uno es un archivo en Excel que corresponde a la base de datos (BD) de la liquidación de la TUA y el otro es el software PCT Enterprise, por temas de derechos de autor el proveedor de servicios no suministra acceso a la estructura de la base de datos. Sin embargo, se valida con el proveedor, la posibilidad de extraer la información de los usuarios desde la interfaz de los módulos sin que se afecte la volumetría de estos en la tabla de la BD y como respuesta se obtuvo que, los datos se podrían extraer directamente desde la funcionalidad "Administración de Terceros" de los módulos y estos exportados a Excel, validando a través del Soporte Técnico Especializado que las cantidades de registros fueran iguales en el Excel y en la BD.

De este proceso, se genera un formato de registro de fuentes de información en el que se caracterizaron atributos con tipo de datos como los descritos en la TABLE II. Para todos los atributos se estableció un indicador de "Completitud" para medir el grado de datos faltantes y para el campo de clave primaria "Identificación" se evaluó la "Unicidad / Integridad".

TABLE II. Atributos del dato

Tipo de Dato	Formato del Dato	Campos
Integer/entero	Entre 10 y 14 caracteres	Identificación, teléfono.
String/cadena	Datos alfanumérico	Usuario, dirección, ciudad, E_mail, expediente, resolución, predio y municipio.
Date/fecha	DD/MM/YYYY	Fecha cero
Double/ doble	Números reales con dos decimales (XX.xx)	Caudal concesionado (Q), Factor Regional (FR), Tarifa Mínima (TM) y Tarifa de la (TUA), Volumen captado, Factor de Costo de Oportunidad (FOP), Valor a pagar (VP).

C. Perfilamiento de datos

Para el proceso de perfilado de los datos, a partir de un análisis comparativo de proveedores de soluciones en gestión de la calidad de datos que fueron seleccionados por recomendación de expertos en *Big-Data*, autores de revistas científicas y plataformas web como "*Capterra*" en [12], se utilizó el software *Talend – Open Studio for Data Quality*, guiados por el instrumento de conocimiento proporcionado por el trabajo investigativo en [12], el cual, es un entregable de la fase II "*Perfilar*" denominado "*Instructivo para la Instalación y Configuración del Software Talend – Open Studio for Data Quality*" propuesto en [14] que permitió realizar el alistamiento de la herramienta ofimática *Talend – Open Studio for Data Quality*, el cual es un software de código abierto que permite crear perfiles de datos y es útil para ejecutar proyectos complejos de datos [15].

Posteriormente, se configuraron los análisis a ejecutar para los campos de las tablas de datos seleccionados y se definieron los indicadores de calidad a aplicar en los que se busca, entre otros, contabilizar datos, datos nulos, duplicados y únicos. Los análisis configurados evaluaron los datos básicos del usuario del recurso hídrico, los actos administrativos que otorgan concesión al usuario del recurso hídrico, los datos básicos para la liquidación del servicio de TUA y los datos básicos de los terceros registrados en el sistema de información PCT Enterprise. La información suministrada para el proceso fue al 31 de octubre de 2021.

Se identificaron 1454 registros en la BD TUA de los cuales no se tenían registros nulos. En la TABLE III se encuentra

ISBN: 978-989-36481-2-4

el detalle de los resultados del perfilado en el que se puede apreciar que los campos "E_mail" y "Teléfono" tienen un porcentaje de completitud por debajo del 45%. Siendo estos campos tan fundamentales para acortar distancias y mejorar la comunicación entre la entidad y sus usuarios se debe tratar de disminuir estos registros en blanco. El campo "Identificación" presentó 552 registros en blanco que equivale a un 62.04% de completitud y un 8.94% de unicidad, lo que indica que se tienen registros duplicados. Los campos "Dirección" y "Ciudad" están por debajo del 80%, los cuales aumentan la probabilidad de fracaso en la identificación del destino de la notificación o entrega de la facturación del servicio al usuario del recurso hídrico.

TABLE III. Evaluación de BD TUA

Campo	Perfiles de datos				
	Distintos	**Únicos**	**Duplicados**	**Blanco**	**% Completitud**
Identificación	561	431	130	552	62.04
Usuario	1043	857	186	0	100
Dirección	694	499	195	310	78.68
Ciudad	42	9	33	371	74.48
E_mail	322	223	99	846	41.82
Teléfono	385	296	89	800	44.98

Por otro lado, para los resultados del perfilado de datos de la BD PCT2021 se descubrieron 2014 registros, de los cuales dos registros del campo NIT están en nulos por efectos de migración de datos. En la TABLE IV se presenta el detalle de los resultados del perfilado en el que se muestra que, de los seis campos analizados, cuatro tienen el 100% de completitud, estos son: NIT, Nombre, Municipio y Teléfono. El campo "Dirección" tiene un 99.90% y el campo "E_mail" tiene un porcentaje de completitud del 44.84% que equivalen a 903 registros con información. Para el campo "NIT" se obtuvo un 0.05% de unicidad.

TABLE IV. Evaluación de BD PCT2021

Campo	**Perfiles de datos**				
	Distintos	**Únicos**	**Duplicados**	**Blanco**	**% Completitud**
NIT	2013	2012	1	0	100
Nombre	2005	1996	9	0	100
Dirección	1921	1882	39	2	99.90
Municipio	58	14	44	0	100
E_mail	897	889	8	1111	44.84
Teléfono	1152	1069	83	0	100

D. Creación del plan

Para el diseño y construcción del plan, se siguieron los siguientes pasos:

Conformación del equipo

- El equipo interdisciplinario se conformó de acuerdo con los roles de los interesados del dato definido en [12], así:
- El Coordinador GIT para la Gestión del Seguimiento al Aprovechamiento del Recurso Hídrico y la Tesorera como "Custodio del Dato", quienes son los responsables de que el dato esté disponible y con los atributos de calidad.
- El Profesional Especializado del área de Sistemas y TICs como "Gestor y administrador del Dato". Además, Líder de TI, quien se encarga del uso estratégico del dato, organiza las necesidades técnicas y crea estándares de buenas prácticas e implementa el gobierno del dato.
- Los Profesionales de Apoyo del Grupo Interno de Trabajo para la Gestión del Seguimiento al Aprovechamiento del Recurso Hídrico y del Grupo Interno de Trabajo para para la Gestión Financiera como "Productor de Datos", quienes son los responsables de la creación del dato.
- El Subdirector de Gestión Ambiental y el Subdirector Administrativo y Financiero como líderes de los procesos ante el Sistema Integrado de Gestión.

Formulación de iniciativas

A partir de los resultados de los perfiles de datos de los campos seleccionados en las fuentes de información del proceso de facturación, en los que se obtuvo un estado real de la calidad de datos, se definieron dos tipos de acciones, así:

- Administrativas: que permitieron establecer, bajo un enfoque estratégico, las decisiones y actividades coordinadas que conllevarían al éxito del gobierno, las políticas relacionadas con la producción y uso de los datos de facturación, creación y ajuste de instrumentos de apoyo a la gestión de datos y la socialización para el uso y apropiación de procedimientos, manuales, formatos y demás instrumentos con los interesados del dato.
- Técnicas: que permitieron la aplicación de métodos y la obtención de resultados específicos como lo fue, la ejecución y respaldo de copias de seguridad, consolidación de datos desde diferentes fuentes de información para completarlos, separación de datos que requieren limpiarse, estandarización de datos, consolidación de datos limpios y actualización de fuentes de información con datos limpios.

Evaluación y priorización de iniciativas

Para la evaluación y priorización de las iniciativas se estableció una calificación de cero (0) a cinco (5), así: 0 → nulo, 1 → muy bajo, 2 → bajo, 3 → medio, 4 → alto y, 5 → muy alto. Esta calificación, asignaba una ponderación según los siguientes criterios: 1) Impacto en las capacidades de la entidad, 2) Bajo riesgo, 3) Capacidad de ejecución y, 4) Ganancias tempranas.

La calificación se multiplicó por la ponderación asignada y al final, se sumaron los resultados parciales, dando un valor porcentual como resultado final. Entre mayor fuese el número, mayor prioridad tendría esa iniciativa dentro del plan.

Consolidación y socialización del plan

A partir de evaluación y priorización, se consolidaron las actividades que compondrían el plan, se determinó el alcance y aplicación y se definieron los responsables para la implement-

ISBN: 978-989-36481-2-4

ación. Posteriormente, se socializó el Plan de Calidad de Datos construido que tiene la finalidad de mejorar los resultados obtenidos y para apoyar la toma de decisiones. En la TABLE V se presentan las acciones priorizadas de mayor a menor para mejorar la calidad de los datos del proceso de Facturación de Tasas y Servicios Ambientales de CORPOCESAR.

TABLE V. Plan de Calidad de Datos

Prioridad	Descripción de la acción	Tiempo	Responsable
Alta	Definir estrategias y políticas de datos	2 días	Custodio del Dato
Alta	Crear procedimiento para detección y corrección de datos	2 días	Administrador del Dato
Alta	Realizar copia de seguridad de los datos desde las fuentes de información incluido los metadatos y la estructura de estos para asegurar la replicabilidad	15 Min	Administrador BD
Alta	Almacenar las copias de seguridad en repositorios seguros para garantizar el respaldo de información en caso de pérdida durante el proceso de limpieza de datos	15 Min	Administrador BD
Alta	Filtrar datos que consiste en la aplicación de reglas o condiciones a los datos para obtener aquellos registros que serán objeto de limpieza. Separar en dos archivos, uno para almacenar los registros que no cumplen las condiciones y otro que se limpiará	1 día	Gestor del Dato
Alta	Conciliar datos de diferentes fuentes de información para poder tener datos completos	2 días	Gestor del Dato
Alta	Estandarizar formatos de datos para tener estructuras uniformes	1 día	Administrador BD
Alta	Eliminar duplicados para garantizar la unicidad de los datos	1 día	Gestor del Dato
Alta	Mejorar la discrepancia de datos para evitar las incongruencias	3 días	Gestor del Dato
Media	Generar reportes de calidad para mostrar tipos de errores, variables con más errores, niveles de confianza, etc.	1 día	Analista de Calidad
Media	Almacenar datos limpios, consolidar datos que consiste en unificar o agrupar estructuras de datos que contienen una relación	1 día	Administrador BD
Media	Actualizar fuentes de información con datos limpios	1 día	Gestor del Dato
Media	Generar indicadores de calidad	1 día	Analista de Calidad
Media	Ajustar el procedimiento de liquidación de la TUA	1 día	Custodio del Dato
Media	Rediseñar la matriz de datos de la liquidación de la TUA	2 días	Administrador del Dato
Media	Crear diccionarios de datos de las BD	2 días	Administrador del Dato
Media	Reforzar procedimientos, manuales, formatos y demás instrumentos con los interesados del dato	3 días	Custodio del Dato

Ejecución del plan

Durante la implementación del plan podrán presentarse limitaciones técnicas, administrativas o legales, así como dificultades que pueden variar según el contexto particular de cada empresa. Sin embargo, es importante prever lo siguiente:

- Existencia de Talento Digital con capacidades técnicas en datos y uso de herramientas en gestión de calidad de datos con fuentes heterogéneas.
- Accesos autorizados y uso de contraseñas de accesos para no vulnerar los datos.
- Costos, tiempo y escalabilidad por el tratamiento de grandes volúmenes de datos para que los recursos y las técnicas no se vuelvan ineficientes para el procesamiento. Además, del uso de datos regulados por Ley.
- Dispositivos con capacidades técnicas suficientes para el mantenimiento de los perfiles de datos y la ejecución de otras técnicas de calidad a través de software. Además, del licenciamiento de aplicaciones acordes a la necesidad de datos a satisfacer.
- Los sesgos detectados durante el proceso de implementación pueden dar origen a nuevas acciones que permitan rediseñar el plan, estas deben documentarse para crear lecciones aprendidas.

El plan se ejecutó completamente logrando resultados favorables para el proceso de facturación de tasas y servicios ambientales. Sin embargo, el éxito de la calidad radica en el cumplimiento de los estándares establecidos por CORPOCESAR.

Mediante la ejecución del plan se logró completar la información de los datos básicos faltantes corrigiendo los errores detectados en el proceso de perfilado y se incorporó un subproceso para el diagnóstico y corrección de los datos. Es de anotar, que a la medida que los usuarios se involucran en la importancia de la calidad de los datos del proceso de facturación se obtiene información completa y coherente, lo que ha permitido que en las auditorías realizadas por la CGR durante las vigencias siguientes a la 2021, los hallazgos por administración y gestión de datos en el proceso de liquidación y facturación de la TUA y demás servicios ambientales hayan disminuido en un 90%. Además, se tiene un aumento en la efectividad de contacto con el usuario deudor al momento de gestionar la cartera lo que ha conllevado a un mayor recaudo.

IV. Conclusiones

La cuantificación de los costos por la mala calidad de los datos estimuló el interés de directivos en apoyar las iniciativas relacionadas con calidad de datos y fomentar una cultura de datos desde la alta dirección. El perfilado de datos es el pilar del ciclo de vida de la calidad del dato. El proceso de perfilado en CORPOCESAR mostró la debilidad que se tiene en la gestión de datos de la liquidación de la TUA, lo que se ve reflejado en el bajo recaudo de esta tasa por no tener la información completa de los datos básicos de los usuarios, ya que existen muchos campos nulos en los registros de las bases de datos suministradas. La evaluación del estado de calidad de los datos permitió la identificación de acciones preventivas y correctivas que fueron tomadas como oportunidades para fortalecer la calidad de los

ISBN: 978-989-36481-2-4

datos, las cuales sirvieron para diseñar la estrategia de calidad, definir reglas de calidad y para la construcción del Plan de Calidad de Datos en el que se demarcan los pasos a seguir para iniciar el proceso de calidad.

Los resultados del perfilado de datos se convirtieron en la línea base para que CORPOCESAR dé continuidad a la iniciativa de mejora de los datos del proceso de facturación, permitiéndoles implementar y consolidar un gobierno de datos enfocado en calidad de datos con el fin de mejorar las capacidades de gestión de la información y mitigar el descontrol ocasionado por falta de políticas y procedimientos.

Con la implementación de las acciones contenidas en el plan, CORPOCESAR pudo incluir un subproceso para la detección y corrección de errores en el proceso de facturación, específicamente antes de iniciar el registro de datos de la liquidación de la tasa o servicio ambiental con el fin de tener la información completa de la facturación y estas puedan ser notificadas a los usuarios que utilizan el recurso natural.

Uno de los factores de éxito para la materialización del objetivo de este documento es que el Administrador de TI, o quienes hagan sus veces, desarrolle el trabajo de forma conjunta e involucren a las áreas estratégicas y misionales que producen los datos para impulsar una cultura de datos al interior de la entidad y se fomenten las buenas prácticas en gestión y gobierno de los datos. Así como también, realicen un análisis a las limitaciones que se deben prevenir al momento de iniciar con la implementación del Plan de Calidad de Datos y que estas se puedan controlar para viabilizar el éxito en dicho proceso.

Finalmente, se espera que este documento sea un aporte a los Administradores de las TIC para que puedan tener una base clara sobre las actividades a realizar durante el diagnóstico de la calidad de los datos como herramienta para evaluar y mejorar la calidad de datos, teniendo en cuenta las dimensiones de calidad como completitud y unicidad. Además, construir y poner en marcha el Plan de Calidad de Datos para la limpieza y normalización de los datos en las CAR.

Agradecimientos

Se agradece a la Corporación Autónoma Regional del Cesar – CORPOCESAR y al Centro de Ingeniería y Desarrollo de Software de la Universidad del Magdalena por el apoyo en la realización de la presente investigación.

Referências Bibliográfica

[1] J. Ladley, "Chapter 5 - The data governance business case," in *Data Governance (Second Edition)*, J. Ladley, Ed., Academic Press, 2020, pp. 51–60. doi: 10.1016/B978-0-12-815831-9.00005-9.

[2] A. Ivanov, O. Petrova, and D. Pavlov, "Quality Management Data-Driven Decisions Fail and How to Fix It," *National Journal of Quality, Innovation, and Business Excellence*, vol. 2, no. 1, Art. no. 1, Mar. 2025.

[3] S. Sleep, Gala ,Prachi, and D. E. and Harrison, "The impact of information governance on information quality and firm performance: role of IT/marketing collaboration," *Journal of Strategic Marketing*, vol. 32, no. 8, pp. 1357–1375, Nov. 2024, doi: 10.1080/0965254X.2024.2340458.

[4] T. P. 1 Neira and R. 2 1 E. programa de D. en G. de la I. T. Vesga, "Factores que afectan la generación de valor en la estrategia de datos de una organización," pp. 137–157, Aug. 2024.

[5] G. P. Gasca-Hurtado and L. Machuca-Villegas, "Era de la Cuarta Revolución Industrial," *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, no. 34, pp. xi–xv, Oct. 2019, doi: 10.17013/risti.34.0.

[6] MinTIC, *MGGTI.G.GI - DOMINIO DE INFORMACIÓN*, 2023. [Online]. Available: https://www.mintic.gov.co/arquitecturaempresarial/630/articles-237660_recurso_1.pdf

[7] M. A. O. Sanabria, F. O. A. Fernández, and M. P. G. Zabala, "Colombian case study for the analysis of open data government: A data quality approach," in *ACM International Conference Proceeding Series*, Galway, Ireland, Apr. 2018, pp. 389–394. doi: 10.1145/3209415.3209474.

[8] B. Gómez, B. Bermejo, and C. Juiz, "IT Governance and Its Implementation Based on a Detailed Framework of IT Governance (dFogIT) in Public Enterprises," in *Information Technology Governance in Public Organizations: Theory and Practice*, L. Rusu and G. Viscusi, Eds., in Integrated Series in Information Systems. , Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 133–155. doi: 10.1007/978-3-319-58978-7_6.

[9] S. Thammaboosadee and N. Dumthanasarn, "Proposed Amendments of Public Information Act Towards Data Governance Framework for Open Government Data: Context of Thailand," presented at the TIMES-iCON 2018 - 3rd Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference, 2019. doi: 10.1109/TIMES-iCON.2018.8621651.

[10] MinAmbiente, "CORPORACIONES AUTÓNOMAS REGIONALES." Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: https://archivo.minambiente.gov.co/index.php/noticias/2067

[11] Gobierno de Colombia, "Ley 99 de 1993 'por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA, y se dictan otras disposiciones.'" Accessed: Feb. 17, 2025. [Online]. Available: https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=297

[12] M. Garcés Ordóñez and M. P. González Zabala, "Guía de implementación de un gobierno de datos para los procesos de facturación de tasas y servicios ambientales del área de Gestión Financiera de las Corporaciones Autónomas Regionales en Colombia," Universidad del Magdalena, 2020.

[13] Contraloría General de la República, "Sector Medio Ambiente." Accessed: Jul. 07, 2019. [Online]. Available: https://www.contraloria.gov.co/es/resultados/proceso-auditor/auditorias-liberadas/-/document_library/wsvr/view/313931?_com_liferay_document_library_web_portlet_DLPortlet_INSTANCE_wsvr_redirect=https%3A%2F%2Fwww.contraloria.gov.co%2Fes%2Fresultados%2Fproceso-auditor%2Fauditorias-liberadas%3Fp_p_id%3Dcom_liferay_document_library_web_portlet_DLPortlet_INSTANCE_wsvr%26p_p_lifecycle%3D0%26p_p_state%3Dnormal%26p_p_mode%3Dview

[14] M. Garcés Ordóñez and M. P. González Zabala, "Propuesta metodológica para la implementación de un gobierno de datos enfocado en calidad de datos," *RISTI: Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, no. Extra 43, pp. 287–298, 2021.

[15] Informatica Inc., "Informatica: Data Quality and Observability," Data Quality and Observability. Accessed: Jan. 19, 2026. [Online]. Available: https://www.informatica.com/es/products/data-quality.html

O Contributo das TIC para a Resiliência Organizacional

The Contribution of ICT to Organizational Resilience

Nelson Russo
Departamento de Ciências e Tecnologia, Universidade Aberta
Lisboa, Portugal
nelson.russo@uab.pt

Leonilde Reis
Departamento de Sistemas de Informação, Escola Superior de Ciências Empresariais, Instituto Politécnico de Setúbal
Setúbal, Portugal
leonilde.reis@esce.ips.pt

Ana Almeida
GECAD - Research Group on Intelligent Engineering and Computing for Advanced Innovation and Development
ISEP, Politécnico do Porto, R. Dr. António Bernardino de Almeida, 431, Porto 4200-072, Portugal
amn@isep.ipp.pt

Pedro Pardal
Departamento de Contabilidade e Finanças, Escola Superior de Ciências Empresariais, Instituto Politécnico de Setúbal
Setúbal, Portugal
CIEQV (Life Quality Research Centre)
pedro.pardal@esce.ips.pt

Luísa Cagica Carvalho
Departamento de Economia e Gestão, Escola Superior de Ciências Empresariais, Instituto Politécnico de Setúbal
Setúbal, Portugal
CIEQV (Life Quality Research Centre)
luisa.c.carvalho@esce.ips.pt

***Resumo* - A resiliência organizacional constitui um fator decisivo para a sustentabilidade das organizações face a disrupções, tais como crises globais e ciberameaças, bem como perante processos de mudança estrutural profunda, como a transformação digital. Este artigo tem como objetivo identificar os fatores que potenciam a resiliência no contexto das organizações portuguesas, com foco nas dimensões estratégica e operacional das Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC). Com base numa entrevista semiestruturada aplicada a organizações nacionais e multinacionais de média e grande dimensão, analisam-se práticas de liderança, governação, continuidade de negócio, cibersegurança e transformação digital. Os resultados evidenciam o papel crítico das TIC como facilitadoras da capacidade adaptativa e sugerem implicações práticas para o reforço da resiliência organizacional. O estudo contribui para a literatura empírica sobre resiliência no contexto português, ainda pouco explorado, oferecendo um quadro de referência para a integração das TIC na construção da resiliência organizacional.**

Palavras **Chave - resiliência organizacional; Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC); continuidade de negócio; cibersegurança; transformação digital.**

***Abstract* - Organizational resilience constitutes a decisive factor for the sustainability of organizations in the face of disruptions, such as global crises and cyber threats, as well as during processes of deep structural change, such as digital transformation. This article aims to identify the factors that enhance resilience in the context of Portuguese organizations, with a focus on the strategic and operational dimensions of Information and Communication Technologies (ICT). Based on a semi-structured interview conducted with national and multinational medium- and large-sized organizations, the study analyses practices in leadership, governance, business continuity, cybersecurity, and digital transformation. The results highlight the critical role of ICT as enablers of adaptive capacity and suggest practical implications for strengthening organizational resilience. The study contributes to the empirical literature on resilience in the Portuguese context, which remains underexplored, providing a reference framework for integrating ICT in the development of organizational resilience.**

Keywords - organizational resilience; Information and Communication Technologies (ICT); business continuity; cybersecurity; digital transformation.

I. Introdução

A resiliência organizacional tem vindo a assumir um papel central na sustentabilidade e competitividade das organizações face a crises, disrupções e mudanças constantes [1]. Num contexto global marcado por incerteza crescente, a capacidade de antecipar, responder, adaptar-se e recuperar de eventos disruptivos tornou-se um fator crítico de sobrevivência e sucesso a longo prazo. Esta necessidade é amplificada pela aceleração da transformação digital, que coloca as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC), a cibersegurança, a continuidade de negócio e a proteção de dados no centro da capacidade adaptativa das organizações [2].

Eventos catalisadores das últimas décadas, como a pandemia de COVID-19, a entrada em vigor do Regulamento Geral de Proteção de Dados (RGPD), o aumento exponencial de ameaças

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

cibernéticas e os recentes conflitos geopolíticos, demonstraram de forma inequívoca a vulnerabilidade dos sistemas socioeconómicos e a necessidade imperativa de uma resiliência robusta, tanto a nível estratégico como operacional. No entanto, apesar da relevância do tema, persiste uma lacuna significativa de estudos empíricos que se foquem especificamente no contexto organizacional português, analisando de forma integrada as dimensões estratégica e operacional da resiliência e o papel transversal das TIC.

Este estudo aplica e expande o quadro teórico-metodológico proposto por Reis et al. [3], focando-se na realidade portuguesa e integrando dimensões práticas de governação, cibersegurança e transformação digital. O objetivo principal é identificar os fatores que potenciam a resiliência organizacional nas organizações portuguesas. A questão de investigação que orienta o estudo é: Quais são as características e práticas, ao nível estratégico e operacional, com especial foco nas TIC, que mais contribuem para a resiliência organizacional no contexto português?

Para responder a esta questão, o artigo estrutura-se da seguinte forma: após esta introdução, a secção II apresenta o enquadramento teórico. A secção III detalha a metodologia de investigação, baseada numa entrevista semiestruturada aplicada a organizações portuguesas. A secção IV apresenta e discute os resultados, organizados nas perspetivas estratégica, operacional e de segurança/continuidade. A secção V promove uma discussão integrada dos resultados à luz da literatura. Por fim, a secção VI apresenta as conclusões, implicações práticas, limitações e sugestões para trabalho futuro.

II. Enquadramento Teórico

A. Resiliência Organizacional: Conceitos e Dimensões

A resiliência organizacional é definida como a capacidade de uma organização antecipar, preparar-se, responder e adaptar-se a mudanças incrementais e a eventos disruptivos, de modo a sobreviver e prosperar [4] [5]. Mais do que uma mera resistência, trata-se de uma capacidade adaptativa e dinâmica que permite à organização absorver choques, recuperar funções críticas e transformar-se face a novas realidades [6]. Esta capacidade é particularmente crítica em cenários de disrupção prolongada, como pandemias ou crises geopolíticas, onde a incerteza e a volatilidade testam os limites dos modelos de negócio tradicionais.

Normas internacionais, como a ISO 22316, oferecem um conjunto de princípios e atributos que orientam a construção da resiliência organizacional, destacando o papel central da liderança, da cultura organizacional e da capacidade de adaptação [7].

B. Perspetiva Estratégica da Resiliência: Liderança e Governação

No plano estratégico, a resiliência organizacional está profundamente associada à liderança e à administração de topo. A capacidade dos líderes de realizar avaliações cognitivas amplas, manter uma perspetiva confiante e otimista, e refletir sobre as decisões constitui um fator crítico para promover ações resilientes na organização [4] [8]. Estes aspetos de liderança resiliente, que incluem comunicação personalizada, atenção a oportunidades e riscos, e responsabilidade na gestão, são catalisadores da harmonia coletiva e da agilidade organizacional. Paralelamente, o estabelecimento de políticas, estruturas de governação e um alinhamento regulatório robusto (ex: RGPD) cria o enquadramento formal que permite às organizações navegar em ambientes complexos, assegurando conformidade e uma resposta coordenada a crises [6] [9].

C. Perspetiva Operacional e Digital: O Papel das TIC

A nível operacional, a resiliência materializa-se através da estrutura organizacional e dos processos que permitem a adaptação rápida. A reconfiguração de equipas, a adoção de teletrabalho e a redefinição de cadeias de abastecimento são exemplos de respostas operacionais a disrupções [4] [8]. Neste domínio, as Tecnologias de Informação e Comunicação (TIC) assumem um papel transversal e habilitador. A transformação digital deixa de ser uma opção estratégica para se tornar uma componente vital da resiliência operacional, permitindo a continuidade das operações, a manutenção da conectividade com clientes e colaboradores, e a implementação de novas soluções em tempo recorde [10] [11]. Estudos empíricos indicam uma correlação positiva entre a intensidade do uso de TIC e a capacidade organizacional de resposta a crises económicas e operacionais [12] [13].

D. Continuidade de Negócio e Cibersegurança como Pilares da Resiliência

A continuidade de negócio e a segurança da informação constituem pilares essenciais da resiliência operacional. A existência (ou ausência) de Planos de Continuidade de Negócio (PCN) e de estratégias de recuperação de desastres determina a capacidade de uma organização de restaurar rapidamente as suas funções críticas. Normas como a ISO 22301 e ISO 22313 oferecem orientações para a implementação eficaz de sistemas de gestão da continuidade de negócio [14] [15]. Simultaneamente, num contexto de crescente digitalização e expansão do teletrabalho, a proteção de dados e a defesa contra ciberameaças tornaram-se imperativos para a resiliência operacional, estando diretamente ligados à confiança dos *stakeholders* e à sustentabilidade do negócio [6] [9]. Adicionalmente, a ISO 28000 e ISO/TS 22318 oferecem orientações sobre segurança e resiliência na gestão da cadeia de abastecimento [16] [17].

E. Contexto Português: Lacunas de Investigação

Apesar do crescente interesse internacional pela resiliência organizacional, o contexto português permanece pouco estudado em termos empíricos. Existem caminhos de investigação que abordam a continuidade de negócio em organizações [18] [19], mas poucos integram as dimensões estratégica, operacional e de segurança de forma holística [18] [20]. Este trabalho procura colmatar essa lacuna, oferecendo uma análise baseada em dados primários recolhidos no terreno.

III. Metodologia de Investigação

Este trabalho segue uma abordagem qualitativa de natureza exploratória, uma vez que o seu objetivo é compreender os fatores que potenciam a resiliência organizacional no contexto português. A opção metodológica recaiu sobre a realização de entrevistas semiestruturadas, que permitiram a recolha contextualizada de dados [21], adaptando-se à complexidade do

ISBN: 978-989-36481-2-4

fenómeno em estudo. Embora a amostra seja reduzida, esta opção permite uma análise contextualizada do fenómeno em estudo, privilegiando a compreensão em profundidade das práticas organizacionais em detrimento da generalização estatística.

A. Abordagem Metodológica

A entrevista semiestruturada é uma técnica fundamental na investigação qualitativa [21] [22]. Esta abordagem permite uma recolha de dados flexível e contextualizada [21], adaptando-se à complexidade dos fenómenos sociais e organizacionais, permitindo explorar experiências, perceções e opiniões [22]. Destacam-se algumas das características da entrevista semiestruturada:

- Flexibilidade: Permite ao investigador adaptar as perguntas à medida que a entrevista decorre, aprofundando os temas relevantes.
- Diversidade de dados: Facilita a obtenção de informação detalhada e contextual.
- Natureza profissional: Conversa intencional para obtenção de informação específica.

B. Instrumento de Recolha de Dados

O guião de entrevista foi desenvolvido com base no quadro teórico apresentado, articulando as dimensões estratégica e operacional da resiliência organizacional. O instrumento, composto por um conjunto de tópicos e perguntas orientadoras, foi organizado em quatro blocos temáticos principais:

- Caracterização da Organização e do Entrevistado: Contexto organizacional (setor, dimensão, história) e perfil do entrevistado (funções, antiguidade, formação);
- Estrutura e Evolução das TIC: Existência e maturidade da estrutura de TIC, modelos de gestão (interna/externa) e a sua trajetória evolutiva;
- Dimensão Estratégica da Resiliência: Papel da liderança, cultura organizacional, estratégia digital, priorização de investimentos em TIC e importância de redes e parcerias;
- Dimensão Operacional e de Segurança: Práticas de arquitetura empresarial, continuidade de negócio, cibersegurança, resposta a eventos disruptivos e mecanismos de aprendizagem organizacional.

O guião da entrevista serviu como um roteiro flexível, permitindo que os entrevistadores aprofundassem temas emergentes e adaptassem a sequência conforme o fluxo natural da conversa, sem a entrega de um questionário escrito aos participantes.

C. Seleção dos Participantes e Procedimentos de Recolha de Dados

O trabalho teve como alvo organizações portuguesas de média e grande dimensão, abrangendo setores públicos e privados. A amostra foi não probabilística e intencional, constituída por organizações selecionadas com base na sua relevância setorial e acessibilidade, que aceitaram voluntariamente o convite para participar.

Foram realizadas cinco entrevistas, envolvendo uma a duas pessoas por organização, todas com funções de liderança ou responsabilidade direta nas áreas de TIC, estratégia ou operações.

As organizações participantes caracterizam-se pela seguinte diversidade:

- Setores de atividade: Incluem-se os setores da indústria transformadora e química, engenharia e construção, serviços municipais e administração pública, e distribuição e instalações técnicas;
- Dimensão (efetivos): Quatro das organizações empregam mais de 250 colaboradores, situando-se na categoria de grande dimensão, com presença nacional e, em alguns casos, internacional;
- Volume de negócios: Quatro das organizações reportam volumes de negócios anuais superiores a 50 milhões de euros, refletindo a sua significativa dimensão económica e impacto setorial.

As entrevistas decorreram presencialmente, nas instalações das organizações dos entrevistados e uma por videoconferência, entre novembro e dezembro de 2025. Cada sessão foi conduzida por dois entrevistadores, com uma duração média de 60 minutos.

Por questões de ética, confidencialidade e conformidade com as políticas internas das organizações participantes, as entrevistas não foram gravadas. Em alternativa, os dois entrevistadores registaram as respostas de forma independente e exaustiva através de notas escritas, que foram posteriormente consolidadas e validadas no final de cada sessão para garantir a fidelidade e robustez dos dados recolhidos.

D. Análise de Dados

Para analisar os dados qualitativos recolhidos (notas consolidadas das entrevistas), optou-se por uma análise de conteúdo temática, seguindo uma abordagem indutiva-dedutiva [23] [24]. Este método é amplamente reconhecido na investigação qualitativa por permitir identificar, analisar e reportar padrões (temas) dentro dos dados, organizando e descrevendo o conjunto de dados de forma detalhada [21] [25].

O processo analítico envolveu cinco fases iterativas:

- Familiarização: Leitura repetida e imersiva dos registos escritos, para uma compreensão abrangente do material;
- Codificação: Identificação de unidades de significado relevantes para a questão de investigação;
- Geração de temas: Agrupamento dos códigos em temas e subtemas coerentes, que capturam padrões nas perceções, experiências e práticas relatadas pelos entrevistados;
- Revisão e definição dos temas: Refinamento e consolidação dos temas, assegurando a sua coerência interna, clareza e distinção;
- Interpretação: Articulação crítica dos temas identificados com o quadro teórico prévio, de modo a responder à questão de investigação, discutir implicações e extrair

ISBN: 978-989-36481-2-4

significado dos dados.

Esta abordagem metodológica permitiu uma compreensão contextualizada e sistemática das práticas, desafios e mecanismos que sustentam a resiliência organizacional no contexto português em estudo [22].

IV. Análise e Discussão dos Resultados

A análise dos dados recolhidos através das entrevistas semiestruturadas permitiu identificar um conjunto de padrões consistentes nas práticas e perceções das organizações participantes, evidenciando como a resiliência organizacional se constrói de forma articulada entre decisões estratégicas, capacidades operacionais e infraestruturas digitais e de segurança. Os resultados são apresentados segundo as seguintes perspetivas: estratégica, operacional e de segurança/continuidade, sendo interpretados à luz do conceito de resiliência organizacional enquanto capacidade dinâmica e adaptativa.

A. Perspetiva Estratégica

Enfatiza-se a influência da administração de topo, sendo que os dados revelam de forma consistente o seu papel determinante na construção da resiliência organizacional. Em todas as organizações analisadas, a priorização da resiliência esteve diretamente associada ao envolvimento ativo da liderança na definição de estratégias, na alocação de recursos e na legitimação de decisões críticas, particularmente em contextos de incerteza. Este envolvimento manifesta-se não apenas na resposta a crises, mas sobretudo numa postura antecipatória, orientada para a preparação e mitigação de riscos.

Considerando a resiliência organizacional, estes resultados reforçam a ideia de que a liderança desempenha um papel ativo na orquestração das capacidades adaptativas da organização, promovendo alinhamento interno, confiança e rapidez de decisão. A ausência de envolvimento estratégico da administração tende a traduzir-se em respostas reativas e fragmentadas, limitando a capacidade de adaptação sustentável.

Na vertente da adoção de boas práticas, as organizações mais resilientes evidenciaram uma adoção deliberada de boas práticas de governação, planeamento estratégico e gestão do risco, ainda que com diferentes níveis de formalização. Destaca-se a integração progressiva da resiliência nos processos de planeamento estratégico, nomeadamente através de avaliações de risco, definição de prioridades críticas e alinhamento entre estratégia de negócio e estratégia digital.

Do ponto de vista interpretativo, estes resultados sugerem que a resiliência não emerge apenas de mecanismos formais, mas também de uma maturidade organizacional que reconhece a incerteza como condição estrutural e não excecional [19]. Esta visão está alinhada com a literatura que encara a resiliência como uma competência organizacional cumulativa e aprendida.

No que se refere ao impacto das políticas e regulamentação, em particular o RGPD e outras normas de conformidade, foi percecionada de forma ambivalente. Por um lado, é reconhecida como um fator de pressão e custo; por outro, é vista como um catalisador para a adoção de práticas mais robustas de governação da informação, segurança e responsabilização.

Na perspetiva da resiliência, a regulamentação atua como um mecanismo estruturante, que força a institucionalização de práticas que reforçam a capacidade de resposta e recuperação. As organizações que internalizaram estas exigências como parte da sua estratégia demonstraram maior coerência e preparação face a eventos disruptivos.

B. Resultados: Perspetiva Operacional

As entrevistas semiestruturadas evidenciaram que a resiliência operacional se materializa frequentemente através de reorganizações estruturais, formais ou informais. Estas incluem a redefinição de funções, maior autonomia das equipas, redução de dependências críticas e reforço de mecanismos de coordenação transversal.

Estas reorganizações refletem uma capacidade de reconfiguração interna, essencial à resiliência, permitindo às organizações absorver choques sem comprometer as suas funções críticas. A flexibilidade estrutural surge, assim, como um atributo-chave da resiliência organizacional.

A transformação digital foi unanimemente identificada como um fator crítico para a resiliência. No entanto, os dados das entrevistas mostram que o seu impacto depende menos da tecnologia em si e mais da forma como esta é integrada nos processos organizacionais. As organizações que encararam a digitalização como um projeto estratégico contínuo demonstraram maior capacidade de adaptação, enquanto as abordagens *ad hoc* revelaram ganhos limitados.

Do ponto de vista da resiliência, a transformação digital funciona como um amplificador da capacidade adaptativa, permitindo continuidade operacional, escalabilidade e rapidez de resposta, sobretudo em cenários de disrupção prolongada.

A adoção de tecnologias como *cloud computing*, plataformas colaborativas e ferramentas de monitorização foi acelerada por eventos disruptivos, em particular por eventos pandémicos. Estas tecnologias não suportaram apenas a continuidade das operações, mas também desencadearam mudanças duradouras nos modelos de trabalho e coordenação.

Interpretativamente, estas evidências reforçam o pressuposto de que as TIC atuam como infraestrutura habilitadora da resiliência, desde que acompanhadas por competências organizacionais e culturais adequadas.

C. Segurança, Continuidade e Eventos Disruptivos

As práticas de *backup*, proteção de dados e conformidade com o RGPD surgem como componentes essenciais da resiliência operacional. As organizações com abordagens sistemáticas e testadas demonstraram maior confiança e capacidade de recuperação, em contraste com abordagens meramente formais, as quais podem revelar fragilidades significativas. Estas práticas reforçam a dimensão de robustez da resiliência, assegurando a integridade da informação e a continuidade das funções críticas.

Numa outra vertente, a existência de Planos de Continuidade de Negócio variou entre as organizações, tanto em termos de formalização como de maturidade. Contudo, mesmo perante a existência de planos incompletos, os mesmos revelaram valor acrescentado como instrumentos de aprendizagem organizacional, promovendo reflexão, preparação e clarificação de responsabilidades.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Considerando os pressupostos subjacentes à resiliência, considera-se que a continuidade de negócio deve ser entendida não apenas como um documento, mas como um processo ativo e de melhoria contínua e integrado na cultura organizacional.

A pandemia de COVID-19 foi identificada como o principal evento catalisador de mudança. O teletrabalho emergiu como solução imediata, mas também como fonte de novos riscos, particularmente no domínio da cibersegurança. O aumento de ciberameaças reforçou a perceção de que a resiliência digital é indissociável da resiliência organizacional global.

V. Discussão

Os resultados confirmam que a resiliência organizacional emerge da interação dinâmica entre perspetivas estratégica e operacional, sendo mediada pelas TIC enquanto elemento transversal. A liderança estratégica define prioridades e enquadramentos, enquanto a capacidade operacional traduz essas orientações em práticas concretas e adaptativas.

As TIC assumem um papel central como infraestrutura de ligação entre estratégia e operação, suportando tanto a antecipação como a resposta e recuperação. Estes resultados estão em consonância com a literatura que identifica a digitalização como um fator crítico da resiliência, mas acrescentam evidência empírica no contexto português.

O trabalho confirma os pressupostos subjacentes à literatura no domínio da resiliência organizacional, nomeadamente quanto ao papel da liderança e da transformação digital, mas evidencia também divergências relevantes, como a persistente informalidade de práticas de continuidade de negócio e a dependência excessiva de respostas reativas.

Os principais contributos do trabalho consistem numa análise empírica integrada da resiliência organizacional em Portugal, na identificação das TIC como elemento transversal e não meramente operacional, e na demonstração de que a resiliência resulta mais de capacidades organizacionais do que de soluções tecnológicas isoladas.

A investigação não só valida o enquadramento conceptual proposto, no qual a resiliência se constrói na intersecção dinâmica entre a liderança estratégica e a capacidade operacional, mediadas por TIC transversais, como também oferece contributos específicos para a compreensão do fenómeno no contexto nacional.

Apesar de os resultados corroborarem, em larga medida, os pressupostos da literatura quanto ao papel central da liderança e das TIC na resiliência organizacional, emergem também algumas preocupações relevantes. Em particular, observa-se um desfasamento entre o reconhecimento estratégico da importância da resiliência e o nível de formalização das práticas operacionais, nomeadamente no domínio da continuidade de negócio. Este resultado sugere que, embora exista consciência organizacional sobre a relevância do tema, a sua tradução em mecanismos estruturados e sistemáticos ainda pode ser otimizada.

Verifica-se, assim, um paradoxo organizacional: as TIC são amplamente reconhecidas como infraestruturas críticas para a resiliência, mas a sua integração nem sempre é acompanhada por práticas formais de planeamento, teste e melhoria contínua [26]. Esta aparente contradição indica que a resiliência pode estar a emergir mais como resultado de respostas reativas a eventos disruptivos do que de uma construção estratégica deliberada.

Estes resultados suscitam a necessidade de saber se a resiliência organizacional está a ser desenvolvida de forma proativa e sustentada, ou se continua a depender fortemente de eventos catalisadores, como a pandemia de COVID-19, funcionando estes como mecanismos de aceleração da transformação organizacional.

Neste sentido, o estudo não só confirma a literatura existente, como evidencia a persistência de uma lacuna entre enquadramentos normativos e práticas organizacionais efetivas, particularmente no contexto português, contribuindo para uma compreensão mais crítica e contextualizada do fenómeno da resiliência organizacional.

Advoga-se a necessidade de abordar a resiliência como uma competência organizacional sistémica, cuja eficácia depende menos de ferramentas tecnológicas pontuais e mais da sua integração coerente em processos, culturas e estruturas de decisão.

Estes resultados sugerem que a resiliência organizacional, mais do que uma capacidade plenamente institucionalizada, permanece em muitos casos num estado de maturidade intermédio, dependente de fatores contextuais e de liderança, em vez de resultar de práticas sistemáticas e consolidadas.

VI. Conclusões

Do ponto de vista do enquadramento teórico, este trabalho reforça a conceção da resiliência organizacional como uma capacidade dinâmica, multidimensional e cumulativa, que ultrapassa a noção de mera robustez ou resistência a desastres ou incidentes.

Em concordância com a revisão da literatura efetuada, os resultados confirmam que a resiliência emerge da articulação entre liderança estratégica, governação, cultura organizacional, capacidades operacionais e infraestruturas digitais, sendo fortemente dependente da capacidade de aprendizagem e adaptação contínua.

Adicionalmente, o trabalho sustenta a perspetiva de que a resiliência não resulta exclusivamente de mecanismos formais (planos, normas ou tecnologias), mas da forma como estes são internalizados, integrados e mobilizados na prática organizacional, corroborando os modelos que encaram a resiliência como um processo organizacional evolutivo.

No plano empírico, a realização deste estudo junto de organizações portuguesas permitiu observar, no terreno, como estes princípios teóricos se materializam em contextos reais e heterogéneos. A análise das entrevistas semiestruturadas evidenciou diferenças significativas nos níveis de maturidade da resiliência, influenciadas pelo envolvimento da administração de topo, pela integração estratégica das TIC e pela capacidade de reconfiguração operacional face a eventos disruptivos. O contacto direto com os decisores organizacionais revelou que muitas práticas associadas à resiliência emergem de respostas pragmáticas a crises concretas, tais como a pandemia de COV-

ISBN: 978-989-36481-2-4

ID-19, funcionando frequentemente como catalisadores de mudanças estruturais e digitais que, de outra forma, teriam ocorrido de forma mais lenta ou incremental, ou nem sequer ocorrido.

Com base nos resultados, conclui-se que a resiliência organizacional, no contexto português, está fortemente ancorada na interação entre perspetiva estratégica e operacional, sendo as TIC um elemento transversal e estruturante dessa relação. As organizações que alinham a estratégia de negócio com a estratégia digital, investem em capacidades de segurança e continuidade, e promovem estruturas organizacionais flexíveis demonstram maior capacidade de antecipar, absorver e recuperar de disrupções. Em contraste, as abordagens centradas apenas na conformidade normativa ou na resposta a eventos pontuais tendem a limitar o desenvolvimento de uma resiliência sustentável e integrada.

Do ponto de vista prático, o trabalho sugere que as organizações devem encarar a resiliência como um investimento estratégico de longo prazo, integrando-a nos modelos de governação, planeamento e transformação digital. A formalização de práticas de continuidade de negócio, a consolidação de políticas de segurança da informação e o reforço do papel das TIC como facilitadoras da adaptação organizacional são elementos-chave para aumentar a capacidade de resposta a contextos de elevada incerteza.

Em termos de contributo científico, este trabalho procura, de alguma forma, colmatar uma lacuna identificada na literatura ao apresentar uma análise empírica integrada da resiliência organizacional no contexto de um conjunto de organizações portuguesas, articulando dimensões estratégicas, operacionais e digitais.

O estudo apresenta um conjunto de limitações que importa reconhecer. Em primeiro lugar, a reduzida dimensão da amostra limita a diversidade de contextos organizacionais analisados, podendo restringir a identificação de padrões específicos de determinados setores ou níveis de maturidade. Em segundo lugar, a natureza não probabilística e intencional da amostra, baseada na acessibilidade das organizações, pode introduzir viés de seleção, na medida em que as entidades participantes poderão apresentar maior sensibilidade ou predisposição para o tema da resiliência.

Adicionalmente, a ausência de gravação das entrevistas, embora justificada por questões de confidencialidade, pode ter limitado a profundidade e precisão dos dados recolhidos, dependendo do rigor dos registos efetuados pelos investigadores. Por outro lado, a utilização de análise temática, ainda que sistemática, envolve um grau inevitável de interpretação, podendo introduzir subjetividade no processo de codificação e identificação de temas.

Por fim, a natureza qualitativa e exploratória do estudo não permite a generalização estatística dos resultados, devendo estes ser interpretados como indicativos e contextualizados, contribuindo sobretudo para a compreensão do fenómeno em análise.

Apesar destas limitações, o estudo apresenta contributos relevantes para a compreensão do papel das TIC na resiliência organizacional, particularmente em contextos onde a evidência empírica ainda é limitada.

Assim, a resiliência organizacional deverá ser entendida não como um estado alcançado, mas como um processo contínuo de adaptação, no qual as TIC assumem um papel estruturante, cuja eficácia depende da sua integração numa abordagem mais ampla que envolva as dimensões humanas, culturais e estratégicas da organização.

Agradecimentos

Os autores expressam o seu agradecimento ao GECAD-Grupo de Pesquisa em Engenharia Inteligente e Computação para Inovação e Desenvolvimento Avançados. Este trabalho de pesquisa foi desenvolvido com recursos de fundos nacionais através da FCT - Fundação para a Ciência e a Tecnologia under the R&D Units Project Scope, UID/00760/2025 DOI https://doi.org/10.54499/UID/00760/2025 and UID/PRR/00760/2025, DOI https://doi.org/10.54499/UID/PRR/00760/2025.

Referências Bibliográficas

[1] N. Ortiz-de-Mandojana e P. Bansal, "The long-term benefits of organizational resilience through sustainable business practices," *Strategic Management Journal,* vol. 37(8), p. 1615–1631, 2016.

[2] N. Russo e L. Reis, "Organizational Resilience: Strategies for Business Continuity," em *L. Carvalho, L. Reis, A. Neves de Almeida Baptista Figueiredo, & N. Russo (Eds.), Leveraging Technology for Organizational Adaptability*, GI Global Scientific Publishing, pp. 1-24.

[3] L. Reis, N. Russo, P. N. Pardal e L. C. Carvalho, "Organizational Resilience and the Importance of Information Systems and Information and Communication Technologies," em *L. Carvalho, L. Reis, A. Neves de Almeida Baptista Figueiredo, & N. Russo (Eds.), Leveraging Technology for Organizational Adaptability*, IGI Global Scientific Publishing, 2025, pp. 25-40.

[4] C. A. Lengnick-Hall, T. E. Beck e M. L. Lengnick-Hall, "Developing a capacity for organizational resilience through strategic human resource management," *Human Resource Management Review,* vol. 21(3), p. 243–255, 2011.

[5] S. Duchek, "Organizational resilience: A capability-based conceptualization," *Business Research,* vol. 13, p. 215–246, 2020.

[6] E. Hollnagel, D. D. Woods e N. Leveson, "Resilience Engineering: Concepts and Precepts," *Resilience Engineering: Concepts and Precepts (1st ed.),* p. 416, 2006.

[7] International Organization for Standardization, ISO 22316:2017, "Security and resilience - Organizational resilience - Principles and attributes," 2017.

[8] E. Hadjielias, M. Christofi e S. Tarba, "Contextualizing small business resilience during the COVID-19 pandemic: evidence from small business owner-managers," *Small Business Economics,* vol. 59, p. 1351–1380, 2022.

[9] M. Suleimany, S. Mokhtarzadeh e A. Sharifi, "Community resilience to pandemics: An assessment framework developed based on the review of COVID-19 literature," *International Journal of Disaster Risk Reduction,* vol. 80, p. 103248, 2022.

[10] A. Bharadwaj, O. A. E. Sawy, P. A. Pavlou e N. Venkatraman, "Digital business strategy: Toward a next generation of insights," *MIS Quarterly,* vol. 37(2), p. 471–482, 2013.

[11] E. G. Margherita e A. M. Braccini, "Industry 4.0 Technologies in Flexible Manufacturing for Sustainable Organizational Value: Reflections from a Multiple Case Study of Italian Manufacturers," *Information Systems Frontiers,* vol. 25(3), 2023.

[12] Y. J. Kim, Y. Chen e K. Linderman, "Supply network disruption and resilience: A network structural perspective," *Journal of Operations Management,* vol. 68(5), p. 1–19, 2022.

[13] I. Bertschek, D. Cerquera e G. J. Klein, "More bits – more bucks? Measuring the impact of broadband internet on firm performance," *Bertschek, Irene and Cerquera, Daniel and Klein, Gordon J., More Bits – More Bucks? Measuring the Impact of Broadband Internet on Firm Performance (2011). ZEW - Centre for European Economic Research Discussion Paper No. 11-032, Available at SSRN: https://,* vol. 46, p. 1–14, 2011.

[14] International Organization for Standardization, ISO 22301:2019, "ISO 22301:2019 - Security and resilience - Business continuity management systems - Requirements," 2019.
[15] International Organization for Standardization, ISO 22313:2020, "ISO 22313:2020 - Security and resilience - Business continuity management systems - Guidance on the use of ISO 22301," 2020.
[16] International Organization for Standardization, ISO 28000:2007, "ISO 28000:2007 - Specification for security management systems for the supply chain," 2007.
[17] International Organization for Standardization, ISO/TS 22318:2015, "ISO/TS 22318:2015 - Societal security - Business continuity management systems - Guidelines for supply chain continuity," 2015.
[18] N. Russo e L. Reis, "Methodological Approach to Systematization of Business Continuity in Organizations," em *Research Anthology on Business Continuity and Navigating Times of Crisis, edited by Information Resources Management Association*, IGI Global Scientific Publishing, 2022, pp. 289-312.
[19] N. Russo, H. S. Mamede, L. Reis e C. Silveira, "FAMMOCN - Demonstration and evaluation of a framework for the multidisciplinary assessment of organisational maturity on business continuity," *Heliyon,* vol. 8 (9), 2022.
[20] N. Russo, L. Reis, C. Silveira and H. S. Mamede, "Towards a Comprehensive Framework for the Multidisciplinary Evaluation of Organizational Maturity on Business Continuity Program Management: A Systematic Literature Review," *Information Security Journal: A Global Perspective,* 2023.
[21] A. Fontana e J. H. Frey, "The interview: From neutral stance to political involvement," em *N. K. Denzin, & Y. S. Lincoln, The SAGE Handbook of Qualitative Research (2ª ed.)*, Thousand Oaks: Sage, 2005, pp. 645-672.
[22] A. Strauss e J. M. Corbin, Basics of qualitative research: Grounded theory, Londres: Sage Publications, 1990.
[23] V. Braun e V. Clarke, "Reflecting on reflexive thematic analysis," *Qualitative Research in Sport, Exercise and Health,* vol. 11(4), p. 589–597, 2019.
[24] J. Swain, "A hybrid approach to thematic analysis in qualitative research: Using a practical example," em *Sage Research Methods Cases Part 2*, SAGE Publications, Ltd., 2018.
[25] L. S. Nowell, J. M. Norris, D. E. White e N. J. Moule, "Thematic analysis: Striving to meet the trustworthiness criteria," *International Journal of Qualitative Methods,* vol. 16(1), pp. 1-13, 2017.
[26] H. Trieu, P. Nguyen, K. Tran, D. Vrontis e Z. Ahmed, "Organisational resilience, ambidexterity and performance: the roles of information technology competencies, digital transformation policies and paradoxical leadership," *International Journal of Organizational Analysis,* vol. Vol. 32 No. 7, p. 1302–1321.

ISBN: 978-989-36481-2-4

CADUNE-PGFN: Uma Arquitetura para Curadoria e Automação de Documentos Jurídicos Não Estruturados no Setor Público

CADUNE-PGFN: An Architecture for the Curation and Automation of Unstructured Legal Documents in the Public Sector

Pedro Davi Moreira da Cruz
Universidade de Brasília - UnB
Brasília - Brazil
pedrodavimoreira15@gmail.com

Jonatas do Vale Nunes
Universidade de Brasília - UnB
Brasília - Brazil
jonatas.nunes@redes.unb.br

Flávio Garcia Praciano
Universidade de Brasília - UnB
Brasilia, Brazil
flavio.praciano@redes.unb.br

Geraldo Pereira Rocha Filho
Universidade Estadual. do Sudoeste da Bahia
Bahia, Brasil
geraldo.rocha@uesb.edu.br

Georges Daniel Amvame Nze
Universidade de Brasília - UnB
Brasilia, Brazil
georges@unb.br

Fábio Lúcio Lopes de Mendonça
Universidade de Brasília - UnB
Brasilia, Brazil
fabio.mendonca@redes.unb.br

***Resumo* - O crescimento acelerado da produção de documentos jurídicos digitais no setor público tem intensificado os desafios relacionados à coleta, padronização, armazenamento e uso estratégico dessas informações. Esse cenário é particularmente evidente na Procuradoria-Geral da Fazenda Nacional (PGFN), que depende de dados oriundos dos Tribunais Regionais Federais para instrução de processos, planejamento institucional e suporte à tomada de decisão. No entanto, a ausência de mecanismos integrados para curadoria e governança de documentos não estruturados resulta em fluxos manuais, fragmentados e pouco auditáveis, impactando diretamente a eficiência operacional e a capacidade analítica do órgão. Este trabalho apresenta uma arquitetura modular denominada CADUNE-PGFN, concebida para automatizar o ciclo completo de tratamento de documentos judiciais, abrangendo a coleta distribuída, orquestração de tarefas, transformação e padronização dos dados, curadoria híbrida e armazenamento em camadas. A solução combina técnicas de processamento de dados em larga escala com mecanismos de rastreabilidade, integração e conformidade com requisitos legais, incluindo observância à Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD). A arquitetura foi avaliada em ambiente real da administração pública federal, demonstrando ganhos em escalabilidade, redução de intervenção humana e maior consistência informacional para análises posteriores. Os resultados sugerem que a aplicação de pipelines de dados e princípios de governança digital pode contribuir significativamente para a modernização dos fluxos documentais no setor público brasileiro.**

Palavras-Chave **- Curadoria Digital, Dados Não Estruturados, Automação Documental, Governança Informacional, Setor Público.**

***Abstract* - The exponential growth of digital legal documents within the Brazilian public sector has intensified the need for scalable mechanisms capable of enabling collection, organization, and strategic use of heterogeneous information. This challenge is particularly evident in the National Treasury Attorney General's Office (PGFN), which relies on judicial data originating from Federal Regional Courts to support legal procedures, institutional planning, and decision-making processes. However, the lack of integrated workflows for handling unstructured documents often results in fragmented, manual, and poorly traceable operations that limit analytical capacity and institutional efficiency. This paper presents CADUNE-PGFN, a modular data architecture designed to automate the full lifecycle of judicial document processing, including distributed collection, task orchestration, ETL-based transformation, hybrid curation, and layered storage. The solution incorporates principles of information governance, traceability, and compliance with legal data protection requirements such as the LGPD. The architecture was deployed and evaluated in a real public sector environment, demonstrating improvements in scalability, reduction in human intervention, and higher informational consistency for analytical and operational use. Results indicate that applying data pipelines and governance-oriented practices can significantly modernize document workflows in the public administration domain.**

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

Keywords - Digital Curation; Unstructured Data; Document Automation; Information Governance; Public Sector.

I. Introdução

O aumento da produção e circulação de documentos digitais em instituições públicas tem gerado desafios para governança, curadoria e análise de dados em larga escala. No sistema judiciário, órgãos como os Tribunais Regionais Federais (TRFs) [1] produzem diariamente grandes volumes de arquivos heterogêneos (PDFs, planilhas e textos), com alta variabilidade estrutural e baixa padronização. Esse cenário configura uma manifestação do paradigma de *Big Data*, demandando soluções escaláveis, automatizadas e seguras [2]. Na Procuradoria Geral da Fazenda Nacional (PGFN) [3], tais documentos são essenciais para instrução de processos, planejamento e conformidade regulatória. A inexistência de mecanismos sistemáticos de coleta, padronização e armazenamento resulta em fluxos manuais e fragmentados, dificultando rastreabilidade e decisões estratégicas baseadas em evidências.

Este artigo propõe a arquitetura CADUNE-PGFN, uma solução modular voltada à curadoria automatizada de documentos jurídicos não estruturados. A arquitetura integra ferramentas para orquestração, transformação e armazenamento distribuído, assegurando padronização, auditabilidade e eficiência operacional, com aderência à governança digital, à Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) e à integração com ferramentas analíticas. As principais contribuições incluem: (i) definição de uma arquitetura modular e escalável para tratamento de dados judiciais não estruturados; (ii) adoção de curadoria híbrida com validação humana; e (iii) avaliação empírica dos ganhos operacionais e informacionais no contexto da PGFN. Este artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta os trabalhos relacionados; a Seção III descreve a metodologia e os componentes da arquitetura CADUNE-PGFN; a Seção IV apresenta a arquitetura CADUNE em ambiente real; Seção V apresenta os resultados e a Seção VI Conclusão.

II. Trabalhos Relacionados

A gestão de documentos digitais não estruturados é um desafio recorrente na literatura, especialmente nas áreas de ciência da informação, arquivologia digital e engenharia de dados. Apesar de avanços em digitalização, preservação e governança arquivística, ainda faltam soluções integradas que combinem automação, curadoria híbrida e validação empírica em ambientes reais. Este estudo contribui nesse sentido ao propor e avaliar uma arquitetura aplicada à PGFN, onde volume, diversidade e requisitos legais impõem desafios operacionais concretos.

Esta seção organiza os trabalhos relacionados em três eixos: digitalização e preservação; governança e curadoria; e arquiteturas para dados não estruturados.

A. Digitalização e Preservação Documental

Santos e Miranda [4] discutem aspectos técnicos da digitalização de acervos físicos, com ênfase em padrões de qualidade e metadados. Embora voltado a documentos físicos, o debate sobre normalização é aplicável a cenários digitais como o da PGFN. Chaves [5] propõe diretrizes de preservação de longo prazo em repositórios confiáveis, destacando autenticidade, acessibilidade e integridade, princípios também incorporados na arquitetura CADUNE-PGFN. Figueiredo [6] mapeia a maturidade institucional em preservação digital no setor público brasileiro, identificando fragilidades de padronização e continuidade tecnológica, lacunas enfrentadas pela solução proposta ao automatizar coleta, tratamento e armazenamento documental.

B. Governança Informacional e Curadoria Digital

No âmbito de políticas arquivísticas e governança informacional, Rabelo e Schmidt [7] analisam o projeto InterPARES Trust, com foco na autenticidade documental e responsabilidade institucional. Tais preocupações são refletidas no CADUNE-PGFN por meio de logs, controle de versão e curadoria híbrida. Innarelli [8] propõe um modelo conceitual para preservação digital baseado na articulação entre políticas, processos e sistemas, diretrizes que a arquitetura CADUNE-PGFN operacionaliza em um ambiente público de produção.

C. Arquiteturas Técnicas e Dados Não Estruturados

Do ponto de vista técnico, Jahn [9] propõe uma arquitetura para tratamento de dados não estruturados em institutos federais, destacando o uso de sistemas distribuídos e orquestração. Embora ainda conceitual, sua proposta apresenta similaridades com o modelo CADUNE, sobretudo na organização em camadas e nos mecanismos de ingestão automática.

Outros trabalhos discutem o uso de *Data Lakes* [10] e técnicas de ETL aplicadas a dados heterogêneos [11], reforçando a necessidade de arquiteturas escaláveis. A presente proposta diferencia-se por consolidar essas abordagens em uma solução completa e validada, com aplicação operacional em ambiente público.

Como sintetiza a Tabela I, embora existam boas propostas conceituais e normativas, a aplicação concreta em órgãos públicos com alto volume documental e exigência de rastreabilidade ainda é limitada-o que reforça a contribuição da solução CADUNE-PGFN.

TABELA I. Comparação entre os trabalhos relacionados e este estudo.

Ref	Foco do Artigo	Relação com este Trabalho
[4]	Digitalização de acervos físicos	Contribui com fundamentos de qualidade e padronização; foco distinto (documentos físicos).
[5]	Preservação digital em repositórios	Alinha-se à proposta quanto à integridade e acessibilidade de longo prazo.
[6]	Maturidade institucional na preservação digital	Aponta lacunas operacionais que o CADUNE-PGFN busca suprir.
[7]	Governança arquivística e responsabilidade institucional	Reforça o uso de logs e curadoria rastreável na arquitetura proposta.
[8]	Modelo conceitual de preservação digital baseado em políticas, processos e sistemas	Fundamenta a integração entre governança, curadoria e infraestrutura operacional implementada no CADUNE-PGFN.
[9]	Arquitetura para dados não estruturados	Inspira elementos técnicos, mas sem implementação validada.
[10]	Arquiteturas de Data Lakes	Fundamenta a escolha do armazenamento em camadas e a separação entre dados brutos e curados.
[11]	ETL inteligente para dados não estruturados em aplicações corporativas.	Sustenta o uso de *pipelines Intelligent* ETL para extração automática, transformação semântica e integração de documentos não estruturados, incluindo PDFs e relatórios empresariais heterogêneos.

ISBN: 978-989-36481-2-4

III. Metodologia

A metodologia adotada caracteriza-se como estudo de caso técnico aplicado, com avaliação empírica em ambiente operacional da administração pública federal. Parte-se do pressuposto de que o tratamento manual ou fragmentado de documentos jurídicos não estruturados compromete a rastreabilidade, a governança e a eficiência em instituições de grande escala. A PGFN foi selecionada como campo de estudo por concentrar grande volume documental, múltiplas fontes judiciais e rigorosos requisitos legais, configurando um cenário representativo para avaliação da solução proposta.

A arquitetura CADUNE-PGFN foi desenvolvida sob princípios de curadoria digital, governança informacional e automação de fluxos de dados em larga escala, alinhados a arquiteturas de referência para gestão de dados não estruturados, conforme discutido por Hashem et al [2].

O desenvolvimento seguiu ciclos incrementais iterativos, com reuniões técnicas entre equipes da PGFN e desenvolvedores para compreensão dos fluxos processuais e requisitos operacionais. A partir desse diagnóstico, foram construídos progressivamente os módulos principais da arquitetura.

- Buscadores de dados: coleta automatizada via *scraping* e APIs;
- *Scripts* de predição e extração textual;
- *Pipeline* de padronização e curadoria.

A modularidade foi operacionalizada por meio da separação funcional das etapas em três servidores distintos, como estratégia metodológica para garantir isolamento, escalabilidade e manutenibilidade:

- Servidor para execução dos buscadores;
- Servidor destinado aos processos ETL (*Pentaho*);
- Servidor responsável pela orquestração (*Rundeck*).

A automação foi implementada predominantemente em Python, com utilização de Selenium para coleta via web scraping, xmltodict e requests para consumo de serviços SOAP/REST, e PyPDF2 para extração textual de PDFs. O paralelismo foi explorado por meio do módulo subprocess, visando aumentar *throughput* e reduzir o tempo total de processamento nas etapas de coleta e predição.

Decisões tecnológicas associadas ao uso de *Hadoop* e Impala para armazenamento distribuído e consulta paralela foram adotadas devido à necessidade de processar grandes volumes de documentos jurídicos não estruturados com rastreabilidade, segurança e desempenho, no contexto de uma avaliação operacional em larga escala.

Requisitos não funcionais referentes à curadoria híbrida, rastreabilidade e conformidade legal (LGPD) foram definidos como restrições transversais e incorporados desde a concepção. Tais requisitos foram operacionalizados por regras de validação automática executadas por scripts de verificação e suportadas por interfaces internas de revisão humana para casos ambíguos. Logs estruturados com versionamento garantiram auditabilidade completa do fluxo de curadoria.

A avaliação da arquitetura foi executada em ambientes reais controlados na infraestrutura da PGFN, submetendo o sistema à ingestão e processamento de volumes representativos da carga institucional, viabilizando comparação objetiva com o processo manual anteriormente utilizado.

O componente de predição foi construído a partir de um *dataset* histórico rotulado contendo decisões e documentos processuais. O objetivo consistiu na implementação de modelos supervisionados para classificação jurídica e sumarização automática, ajustados por TRF em virtude da heterogeneidade linguística e estrutural entre tribunais. Após treinamento e validação, os modelos foram integrados ao pipeline operacional, sendo acionados automaticamente durante a etapa de predição. Essa etapa compreende extração textual dos PDFs, inferência do modelo correspondente ao TRF e persistência dos resultados na base analítica.

Com essa abordagem, a seção subsequente apresenta a arquitetura CADUNE-PGFN, detalhando seus componentes, fluxos internos e mecanismos de governança e curadoria.

IV. Arquitetura CADUNE

A arquitetura CADUNE-PGFN foi concebida para lidar com o ciclo completo de tratamento de documentos jurídicos não estruturados, desde a coleta até a disponibilização dos dados. Ela operacionaliza os princípios metodológicos descritos na Seção III, respondendo a requisitos de escalabilidade, rastreabilidade e conformidade legal em ambientes institucionais de grande porte. A arquitetura é estruturada em seis camadas funcionais: coleta automatizada, orquestração de processos, transformação e padronização dos dados (ETL), armazenamento em camadas, curadoria e validação, e, por fim, segurança, governança e disponibilização da informação. Cada uma dessas etapas é detalhada a seguir.

A. Fluxo Operacional do Sistema

A Figura 1 apresenta uma visão geral da arquitetura CADUNE-PGFN. O fluxo inicia-se com a coleta automática de documentos judiciais provenientes dos Tribunais Regionais Federais (TRFs), via *web scraping* e APIs. Em seguida, o *Rundeck* realiza a orquestração das tarefas, assegurando agendamento, rastreabilidade e controle de falhas.

O conteúdo extraído é submetido a rotinas de predição e classificação automática, cujos resultados alimentam o pipeline de transformação e padronização dos dados. Os dados tratados são armazenados em um *Data Lake* particionado em camadas (*Raw, Curated e Business*), garantindo governança, escalabilidade e segregação por nível de maturidade informacional. Após validação e curadoria, as informações são disponibilizadas para consumo institucional via APIs internas e *dashboards* analíticos.

Esse fluxo integrado assegura isolamento entre fontes externas e o ambiente interno de processamento, permitindo operação contínua, tolerante a falhas e auditável, mesmo sob alto volume de documentos jurídicos não estruturados.

B. Coleta Automatizada de Dados

O módulo de coleta do CADUNE-PGFN realiza a extração de documentos jurídicos não estruturados a partir dos sistemas

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

dos TRFs (PJe, WebTRF e *Web Services*). Dado o caráter heterogêneo das fontes algumas expostas via APIs (SOAP/REST) e outras acessíveis apenas por *web scraping* com *Selenium* adotaram-se estratégias específicas por tribunal, com coletores independentes executados em paralelo às 01h00.

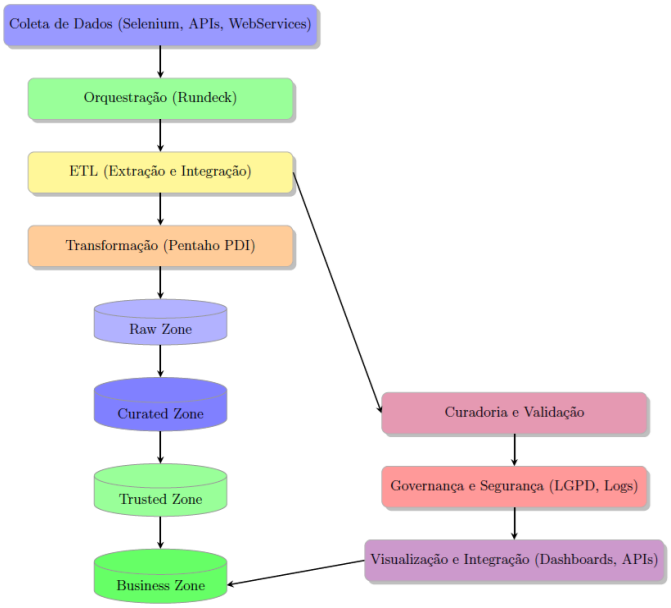


Figura 1. Arquitetura de processamento, curadoria e disponibilização de dados do CADUNE-PGFN.

Tal abordagem assegura resiliência e isolamento entre instâncias, impedindo que falhas em um TRF comprometam os demais. O módulo suporta paralelização, tratamento de exceções e *logs* estruturados, além de armazenamento temporário para reprocessamento e prevenção de perdas.

As tarefas são orquestradas pelo *Rundeck*, que provê agendamento, rastreabilidade e tolerância a falhas, viabilizando ingestão contínua frente à diversidade de formatos e origens do ecossistema jurídico federal.

C. Transformação e Padronização dos Dados (ETL)

Após a coleta, os documentos são transformados e padronizados com o *Pentaho Data Integration* (PDI), devido à sua integração com múltiplos formatos e sistemas legados. O processo ETL inclui etapas estruturais, com limpeza e normalização do texto; sintáticas, com padronização de datas, nomes e numeração; e semânticas, com enriquecimento e geração de metadados.

Verificações de integridade identificam duplicidades e inconsistências, e os dados resultantes são armazenados em JSON, CSV e SQL, alimentando o Data Lake. Essa etapa atua como ponte entre a ingestão bruta e a curadoria, convertendo documentos não estruturados em dados auditáveis para análises posteriores.

D. Armazenamento em Camadas (Data Lake)

O armazenamento na arquitetura CADUNE-PGFN adota um modelo de Data Lake segmentado em camadas, adequado a formatos heterogêneos e diferentes níveis de tratamento de documentos jurídicos, garantindo escalabilidade e governança.

A estrutura possui três zonas: *Raw Zone*, com dados no estado original para auditoria e reprocessamento; *Curated Zone*, com dados transformados e classificados pelas etapas de ETL; e *Business Zone*, destinada ao consumo institucional por dashboards, relatórios e APIs.

Essa organização assegura reprodutibilidade, controle do ciclo de vida e rastreabilidade. A infraestrutura utiliza HDFS para alta disponibilidade e tolerância a falhas, e o Impala para consultas analíticas de baixa latência.

E. Curadoria e Validação

A curadoria e validação na arquitetura CADUNE-PGFN utilizam um modelo híbrido com automação e revisão humana. O sistema verifica duplicação, consistência de metadados e classificação, encaminhando casos ambíguos para análise manual. Todas as ações são registradas em logs com controle de versão, garantindo rastreabilidade e conformidade com a LGPD.

F. Segurança e Governança

A arquitetura CADUNE-PGFN prioriza proteção de dados, conformidade regulatória e rastreabilidade, com segurança e governança atuando em todo o pipeline. O ambiente adota criptografia, controle de acesso por perfis, autenticação forte e segmentação de rede, com coleta em servidores externos controlados e processamento em ambientes internos. Logs estruturados registram todas as etapas, garantindo auditabilidade, versionamento e conformidade com a LGPD.

G. Disponibilização e Integração com Sistemas

A camada final da arquitetura CADUNE-PGFN é dedicada à disponibilização dos dados curados e à sua integração com os sistemas internos da instituição. O objetivo dessa etapa é transformar os dados tratados em insumos acionáveis para decisões e integrações institucionais, sem exposição indevida de informações sensíveis.

A disponibilização ocorre por meio de três canais principais:

- APIs internas, que permitem a consulta estruturada dos dados por sistemas corporativos da PGFN;
- *Dashboards* interativos, desenvolvidos com ferramentas de *Business Intelligence*, que fornecem visualizações dinâmicas para apoio à tomada de decisão;
- Relatórios automatizados, gerados periodicamente a partir da *Business Zone* para fins de planejamento, compliance e auditoria.

Essa estrutura garante que os dados originalmente não estruturados sejam efetivamente incorporados aos processos institucionais, ampliando seu valor informacional e promovendo uma cultura de decisão baseada em evidências.

V. Resultados

A. Comparativo Operacional: Antes e Depois da Arquitetura

Antes da arquitetura CADUNE-PGFN, o processamento era manual. Seis operadores, cada um responsável por um Tribunal Regional Federal (TRF), realizavam coleta, leitura, classificação e sumarização, processando entre 6 e 8 processos por dia. Isso resultava em cerca de 42 documentos diários, ou

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

aproximadamente 924 por mês.

Com a automação, o sistema passou a operar continuamente, iniciando as coletas às 01h00 e finalizando em até 30 minutos. A predição, antes sequencial e com duração de até 2 horas, foi paralelizada e passou a ser concluída entre 30 e 60 minutos. O volume médio atingiu cerca de 1.000 processos por dia, representando ganho de produtividade superior a 2.000% em relação ao modelo anterior, conforme a Tabela II.

TABELA II. Comparativo Operacional Antes e Depois da Arquitetura CADUNE-PGFN

Métrica	**Antes**	**Depois**
Modelo	Manual	Automatizado
Operadores	6	0
Processamento Diário	42 documentos	≈ 1.000 documentos
Processamento Mensal	≈ 924 documentos	≈ 22.000 documentos
Tempo de Coleta	Manual (horas)	30 minutos
Tempo de Predição	Até 2h sequenciais	30–60 min (paralelizado)
Ganho Estimado	--	>2000%

Os dados foram obtidos a partir de registros empíricos dos ambientes de execução do sistema. As métricas de tempo e volume foram coletadas por logs automatizados do *Rundeck* e analisadas em ciclos mensais, de janeiro a junho de 2025, durante a estabilização da arquitetura em produção. As estimativas de produtividade manual baseiam-se nas rotinas documentadas da equipe anteriormente responsável pelo processamento.

B. Comparativo com Soluções Tradicionais

A análise comparativa dos resultados obtidos evidencia ganhos operacionais significativos em relação ao modelo tradicional de processamento manual. No contexto avaliado, destacam-se os seguintes impactos mensuráveis:

- Redução aproximada de 70% no tempo total de execução das tarefas recorrentes;
- Melhoria superior a 60% nos indicadores internos de consistência e padronização dos dados;
- Aumento superior a 20 vezes na capacidade mensal de processamento de documentos.

A Tabela III sintetiza os principais impactos observados após a implementação da arquitetura CADUNE-PGFN no ambiente institucional analisado.

TABELA III. Resumo dos principais impactos após implementação da arquitetura

Indicador	**Valor**
Redução de Tempo	-70%
Consistência dos Dados	+60%
Capacidade de Processamento	>20x

C. Redução do Esforço Manual e Tempo de Processamento

A automação das tarefas de coleta, transformação e curadoria reduziu de forma expressiva o tempo médio de execução de processos recorrentes. Estimativas empíricas indicam uma diminuição aproximada de 70% no tempo total de coleta e padronização de documentos, liberando recursos humanos para atividades analíticas e estratégicas de maior valor institucional.

D. Aumento da Capacidade de Processamento

A escalabilidade proporcionada pelo uso de Hadoop/Impala e pela organização em *Data Lake* permitiu ampliar em mais de cinco vezes a capacidade mensal de ingestão e processamento de documentos jurídicos não estruturados, sem impacto perceptível na performance durante o período avaliado.

E. Melhoria na Qualidade e Consistência dos Dados

As técnicas de padronização e enriquecimento semântico aplicadas durante o processo de ETL resultaram em melhorias significativas na qualidade dos dados. Indicadores internos, como completude de metadados e redução de inconsistências semânticas, apresentaram ganhos superiores a 60%, conforme verificado por validações amostrais conduzidas pela equipe técnica da PGFN.

F. Rastreabilidade e Governança Informacional

A incorporação de *logs* estruturados e mecanismos de versionamento possibilitou ganhos relevantes em rastreabilidade documental. Todas as etapas do ciclo de vida dos dados tornaram-se auditáveis, permitindo a reconstrução do histórico de transformações e acessos, em conformidade com os princípios da Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD).

G. Integração com Sistemas de Apoio à Decisão

Os dados tratados passaram a alimentar painéis de *Business Intelligence* (BI) utilizados por equipes jurídicas e administrativas para monitoramento operacional, análise de tendências e suporte à decisão. A integração via APIs internas viabilizou a interoperabilidade com sistemas corporativos da PGFN, ampliando o uso institucional das informações curadas.

Os resultados apresentados na Tabela IV demonstram ganhos técnicos e operacionais relevantes, evidenciando como a automação estruturada pode transformar o processamento de documentos jurídicos em ambientes públicos de alta carga documental. Ao reduzir variabilidade humana, garantir conformidade e ampliar rastreabilidade, a arquitetura CADUNE-PGFN se configura como solução replicável em outros órgãos da administração pública com desafios semelhantes de curadoria digital.

VI. Conclusão

Este trabalho apresentou a arquitetura CADUNE-PGFN como uma solução para o tratamento automatizado de documentos jurídicos não estruturados no contexto da Procuradoria-Geral da Fazenda Nacional, fundamentada em modularidade, curadoria híbrida e governança informacional. A proposta enfrentou desafios relacionados ao volume, à heterogeneidade e à rastreabilidade dos dados produzidos pelos Tribunais Regionais Federais (TRFs).

A arquitetura foi concebida de forma iterativa e validada em ambiente operacional da PGFN. Os resultados evidenciaram ganhos operacionais, com redução do esforço manual, aumento

ISBN: 978-989-36481-2-4

TABELA IV. Resumo dos Resultados da Implementação CADUNE-PGFN

Dimensão / Métrica	**Antes (Manual)**	**Depois (Automatizado)**	**Ganho / Impacto Estimado**
Modelo Operacional	Manual	Automatizado	--
Equipe Necessária	6 operadores	0 operadores	-100%
Processamento Diário	42 documentos	≈ 1.000 documentos	+2.380%
Processamento Mensal	≈ 924 documentos	≈ 22.000 documentos	+2.380%
Tempo de Coleta de Documentos	Horas	30 minutos	-70%
Tempo de Predição	Até 2h sequenciais	30–60 min (paralelizado)	-50 a -75%
Qualidade e Consistência dos Dados	--	+60%	+60%
Capacidade Mensal de Processamento	--	>20x	+2.000%+
Escalabilidade / Volume Suportado	Limitada	Alto (Hadoop/Impala, Data Lake)	≈5x aumento na ingestão
Rastreabilidade e Governança	Parcial	Total (logs, versionamento)	Auditabilidade plena
Integração com BI / APIs	Não disponível	Disponível	Suporte à decisão em tempo real

da capacidade de processamento e fortalecimento da rastreabilidade e da conformidade regulatória, viabilizados pela separação funcional das camadas, uso de *Hadoop, Impala, Pentaho e Rundeck* e adoção de modelos de predição ajustados a cada tribunal.

A experiência demonstra que a automação estruturada contribui para a modernização de processos em ambientes públicos com alta carga documental, promovendo confiabilidade, transparência e eficiência no uso da informação. Embora os resultados estejam circunscritos ao contexto avaliado, a arquitetura apresenta potencial de replicação em outros órgãos com desafios semelhantes. Como trabalhos futuros, destacam-se a ampliação para novos domínios documentais, a incorporação de técnicas avançadas de aprendizado de máquina e a avaliação longitudinal dos impactos da solução.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e computacional do Laboratório LATITUDE, da Universidade de Brasília, a Secretaria Nacional de Assistência Social – SNAS/MDS, a Procuradoria Geral da Fazenda Nacional – PGFN, ao Projeto SISTER City – Sistemas Inteligentes Seguros e em Tempo Efetivo Real para Cidades Inteligentes ao projeto "Sistema de Controle e Unificação de Projetos para o Governo Distrito Federal – SISPRO-DF", ao projeto "Pesquisa, Desenvolvimento e Aplicação de Protótipo do Ambiente de Simulação Didático para Veículos Ciberseguros, Autônomos e Conectados (SD-CyberAuto)". Projeto "Pesquisa, Desenvolvimento e Aplicação – Metodologia para Apoio à Obtenção de Requisitos Éticos e de Privacidade" (Auxílio 514/2023) e a Fundação de Apoio do Distrito Federal - FAP/DF.

Referências Bibliográfica

[1] Tribunal Regional Federal, "Portal institucional do tribunal regional federal," 2024, acesso em: 12 fev. 2026. [Online]. Available: https://www.trf1.jus.br

[2] I. A. T. Hashem, I. Yaqoob, N. B. Anuar, S. Mokhtar, A. Gani, and S. U. Khan, "The rise of "big data"on cloud computing: Review and open research issues," Information Systems, vol. 47, pp. 98–115, 2015. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.is.2014.07.006

[3] Procuradoria-Geral da Fazenda Nacional, "Portal institucional da procuradoria-geral da fazenda nacional," 2024, acesso em: 12 fev. 2026. [Online]. Available: https://www.gov.br/pgfn

[4] P. S. A. Santos and Z. D. Miranda, "Digitalização de documentos: soluções de qualidade para acervos arquivísticos," Revista Fontes Documentais, vol. 2, 2023. [Online]. Available: https://periodicos.ufba.br/index.php/RFD/article/view/57583

[5] E. M. L. Chaves, "Preservação de documentos arquivísticos digitais a longo prazo em reposit´orios digitais confiáveis," Revista Ibero-Americana de Ciência da Informação, vol. 16, no. 1, pp. 50–66, 2023. [Online]. Available: https://periodicos.unb.br/index.php/RICI/article/view/44023

[6] W. S. Figueiredo, "Preservação arquivística: uma análise sobre a preservação digital nas instituições públicas brasileiras," 2019, trabalho de Conclusão do de Curso, Universidade Federal do Pará. [Online]. Available: https://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/4041

[7] N. B. Rabelo and C. M. S. Schmidt, "Contribuições e desafios para a gestão de documentos de arquivos digitais sob a perspectiva do interpares trust (2012–2019)," Inf. Prof., Londrina, vol. 10, no. 3, pp. 70–84, 2021. [Online]. Available: https://www.academia.edu/115524535/Contribui%C3%A7%C3%B5es e desafios para a gest%C3%A3o de documentos de arquivos digitais sob a perspectiva do InterPARES Trust 2012 2019

[8] H. C. Innarelli, "Gestão da preservação de documentos arquivísticos digitais: Proposta de um modelo conceitual," Ph.D. dissertation, Universidade de S˜ao Paulo, 2015. [Online]. Available: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/27/27151/tde-27052015-101628/pt-br.php

[9] G. F. Jahn, "Uma proposta de arquitetura para tratamento de dados não estruturados no âmbito dos institutos federais de educação," Master'sthesis, Universidade Federal de Pernambuco, 2018. [Online]. Available: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/28002

[10] N. Miloslavskaya and A. Tolstoy, "Data lakes: A survey of functions and systems," 2021, arXiv e-print. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2106.09592

[11] M. Joshi and V. K. Madisetti, "Intelligent ETL for Enterprise Software Applications Using Unstructured Data," Journal of Software Engineering and Applications, vol. 18, no. 1, pp. 44–65, 2025. doi: 10.4236/jsea.2025.181003.

Patrones de Diseño en el Desarrollo Low-Code: Una Revisión Sistemática

Design Patterns in Low-Code Development: A Systematic Review

Segundo E. Cieza-Mostacero[1], Milagros J. Rodríguez-Peña[1], Juan F. Pacheco-Torres[1], Claudia E. Mori-Ugarte[1]
[1] Grupo de Investigación Tendencia e Innovación en Ingeniería de Sistemas - Trujillo, Universidad César Vallejo
Trujillo, Perú
scieza@ucv.edu.pe, MRODRIGUEZP@ucv.edu.pe, JPACHECOT@ucv.edu.pe, cmoriu1@upao.edu.pe

***Resumen* — La revisión sistemática de la literatura tuvo como objetivo sintetizar la evidencia existente sobre los patrones de diseño en el desarrollo low-code y, para lograrlo, utilizó la base de datos Scopus, definiendo una estrategia de búsqueda con descriptores como "design pattern" o "low-code" que, posteriormente a la aplicación de criterios de inclusión / exclusión, se seleccionaron 21 artículos para dar respuesta a cinco preguntas de investigación que se plantearon en esta revisión. Los hallazgos incluyen la identificación de 15 patrones de diseño en el desarrollo low-code, destacando los orientados a los procesos e ingeniería por modelos; además, se realizó una lista de actividades que se deben tener en cuenta para el proceso de implementación, que, para que tenga éxito los elementos DSL y MDE deben tener sinergia entre ellos; adicionalmente a ello se identificaron limitaciones críticas que obstaculizan la transparencia y agilidad en la implementación de patrones. A pesar de ello, la revisión evidenció que existen una diversidad de dominios donde se pueden aplicar estos patrones dentro de entornos low-code.**

Palabras **Clave - patrón de diseño; low-code; software, desarrollo de software.**

***Abstract* — The systematic literature review aimed to synthesize the existing evidence on design patterns in low-code development. To achieve this, the Scopus database was used, defining a search strategy with descriptors such as "design pattern" or "low-code." After applying inclusion/exclusion criteria, 21 articles were selected to answer the five research questions posed in this review. The findings include the identification of 15 design patterns in low-code development, highlighting those oriented towards processes and model-driven engineering. Furthermore, a list of activities to consider for the implementation process was compiled, emphasizing that for successful implementation, the elements of Design Support (DSL) and Model-Driven Engineering (MDE) must be synergistic. Additionally, critical limitations hindering transparency and agility in pattern implementation were identified. Despite these limitations, the review demonstrated that there is a diversity of domains where these patterns can be applied within low-code environments.**

Keywords - design pattern; low-code; software, software development.

I. Introducción

La concepción inicial para desarrollar software se ubicó en la posibilidad de generar las líneas de código de manera manual, donde el programador que conocía las nomenclaturas, reglas y las sintaxis por cada lenguaje de programación era la figura central en la ejecución de proyectos de software, no obstante, todo este proceso, demandaba tiempo y sobre todo hacía que, en muchas veces, se cree código no optimizado, sin el uso de patrones de diseño idóneos, que hacía que muchos proyectos fracasen y más aún no sean escalables con el tiempo.

El desarrollo de software ha evolucionado con tal magnitud que han aparecido herramientas, tecnologías, framework, etc., que facilitan la implementación de soluciones tecnológicas en diferentes contextos, más aún con la inclusión de la Inteligencia Artificial (IA) que acelera, por ejemplo: La generación de código, detección automática de bugs en el código, automatización de pruebas, refactorización de código asistido, etc.

Los grandes modelos de lenguaje (LLM por sus siglas en inglés) han transformado la productividad y la calidad del desarrollo de software, modificando el rol tradicional de los programadores en la industria. Es así como, por ejemplo, algunas de estas herramientas (como ChatGPT y GitHub Copilot) reflejan esta transformación, puesto que no solo generan código, sino que también tienen incidencia en las competencias que deben adquirir los programadores en la actualidad [1]. Además, estas permiten que las personas con conocimientos un poco básicos en programación puedan desarrollar aplicaciones, mientras que ofrecen a programadores con más experiencia, mecanismos más eficientes para, por ejemplo: la detección de errores y sugerencias para la optimización del trabajo que se realiza [2].

La Inteligencia Artificial Generativa (GenAI por sus siglas en inglés) ha marcado un punto de inflexión en la evolución de las tecnologías de IA, transformando profundamente múltiples ámbitos, incluido el desarrollo de software. A través de modelos como: las Redes Generativas Antagónicas (GAN), las arquitecturas basadas en transformadores y diversas técnicas de aprendizaje profundo, se ha incrementado la eficiencia del proceso de creación de software mediante la automatización de actividades como: la generación de código, la identificación y corrección de errores, así como la adaptación personalizada de soluciones según los requerimientos del usuario [3].

Por lo tanto, con la inclusión de la IA, LLMS y GAI el desarrollo de software ha evolucionado y, según lo explicado anteriormente, dentro de todo los beneficios que pueden otorgan

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

para el programador, está como actividad clave: La generación de código, surge, por consiguiente, la necesidad de comprender los enfoques de low-code y no-code, así como las plataformas, marcos de trabajo y patrones de diseño que soporten estos enfoques modernos para dar soluciones tecnológicas de calidad y que sean a medida de las necesidades de las organizaciones.

Con la necesidad de crear aplicaciones sin escribir mucho código (low-code) o más aún sin escribir ninguna línea en absoluto (no-code) han hecho que el desarrollo de software evolucione, así como las plataformas que soporten estos enfoques. Los enfoques Low-Code/No-Code(LCNC) ayudan a las organizaciones a reducir tiempo y costos al acelerar el proceso de desarrollo, al mismo tiempo que elevan la calidad del software mediante una mayor integración entre las áreas de negocio y tecnología, favoreciendo además la automatización de tareas [4]. Es importante señalar que las plataformas modernas de LCNC superan a las anteriores de codificación manual en lenguajes de bajo o alto nivel, porque incluyen un desarrollo rápido en entornos basados en la nube, que permiten a cualquier persona sin experiencia en programación, desarrollar software mediante la integración de componentes de diversas fuentes [5]. Es evidente que estas plataformas generan mayor eficiencia, pero no necesariamente pueden garantizar la seguridad, así como los ciberataques que existen y que probablemente muchos profesionales de TI los subestiman [6].

Las plataformas de desarrollo de bajo código (LCDP por sus siglas en inglés) tienen el desafío de acelerar la creación de aplicaciones y busca disminuir la dependencia de los procedimientos tradicionales, puesto que, al ofrecer, por ejemplo, una interfaz visual para "arrastrar y soltar", todos los interesados pueden intervenir de forma activa en el desarrollo de software, lo que genera una "democratización" en la creación de soluciones tecnológicas adaptadas a las necesidades [7]the initialization of new prototypes and concepts in laboratory automation and life science software applications has required close collaboration between hardware and software experts, as well as lab personnel such as biologists, chemists, biotechnologists, or process engineers. This setup - still common today - often means that the ideas and requests of lab personnel must be translated into software applications by software developers, which frequently results in long development times. Low-Code Development Platforms (LCDPs. Estas plataformas constituyen una alternativa que posibilita la creación de software de manera más ágil y accesible mediante el uso de interfaces visuales y una mínima intervención de programación. No obstante, para garantizar una adopción efectiva, es necesario comprender en profundidad las capacidades y perfiles de los usuarios, incluyendo tanto a los desarrolladores tradicionales como a aquellos sin formación técnica [8]especially amid a shortage of skilled digital professionals. Low-code development platforms (LCDPs.

Por lo tanto, se ha declarado que uno de los puntos importantes en el desarrollo de software, es el uso de patrones de diseño, que es la representación estructurada de objetos y clases que interactúan entre sí y que se organizan de manera específica para abordar un problema de diseño general dentro de un contexto determinado [9]. Es decir, es una solución que se reutiliza y que generalmente sirve para resolver un problema que ocurre en el proceso de desarrollo de software. Los patrones de diseño (creacionales, estructurales y de comportamiento) son herramientas que cuando se aplican de manera correcta, permiten elevar la calidad de todo software porque tienen como propósitos: Resolver problemas comunes, mejorar la comunicación entre los programadores, buscar las mejores prácticas de desarrollo y documentar de forma automática la intención del diseño.

Con los cambios generados en el desarrollo de software por los enfoques Low-Code, permite generar preguntas como: ¿Qué pasa con los patrones de diseño de software?, ¿existirán cambios significativos con la inclusión estos enfoques?, etc. Por ello, la investigación de tipo Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) tiene por objetivo principal: Sintetizar la evidencia existente sobre los patrones de diseño en el desarrollo low-code, para ello se plantearon objetivos específicos por cada pregunta de investigación (RQ) que se muestran en la Tabla I).

TABELA I. Preguntas y Objetivos de la Investigación

N°	Preguntas de investigación	Objetivos
RQ1	¿Qué tipos de patrones de diseño se utilizan o proponen en el contexto del desarrollo low-code?	Identificar los tipos de patrones de diseño que se utilizan en el desarrollo low-code.
RQ2	¿Cómo se implementan y/o ejecutan los patrones de diseño dentro de las plataformas y herramientas low-code?	Listar las actividades para implementan y/o ejecutan los patronos de diseño low-code.
RQ3	¿Cuál es el papel juegan los enfoques dirigidos por modelos (MDE) y los lenguajes de dominio específico (DSL) en la definición y aplicación de patrones dentro del ecosistema low-code?	Describir el papel que juegan los MDE y los DSL en la definición y aplicación de patrones de diseño low-code.
RQ4	¿Qué limitaciones existen sobre el uso de patrones de diseño en iniciativas de desarrollo low-code?	Identificar las limitaciones que existen sobre el uso de patrones de diseño en iniciativas de desarrollo low-code.
RQ5	¿En qué dominios o áreas se han implementado con éxito patrones de diseño en soluciones low-code?	Listar los dominios o áreas donde se han implementado con éxito patrones de diseño en el desarrollo de soluciones low-code.

II. Marco Teórico y Antecedentes

A. *Patrón de Diseño*

Es la representación de una solución a problemas de software que generalmente ocurren en el proceso de desarrollo, su objetivo es diseñar software de calidad. El concepto se originó en la arquitectura de edificios, pero a mediados de los años 90, Gamma et al. lo adaptaron para aplicarlo al paradigma orientado a objetos, proponiendo 23 patrones, conocidos como Gang o Four (GoF), caracterizándose por ser estructurales, de creación y de comportamiento [10]. Por lo tanto, un patrón de diseño es una solución que se puede utilizar ante un problema común dentro del proceso de desarrollo de software; son como guías o plantillas que ya han sido probadas y verificadas por expertos y el programador utiliza con el objetivo de evitar la redundancia en la solución de problemas conocidos.

B. *Low-Code*

El concepto de "low-code" fue introducido inicialmente por Forrester Research en un informe publicado en 2014, donde se describía como un enfoque que permitía desarrollar aplicaciones de manera acelerada, requiriendo muy poca codificación manual y una mínima inversión en configuración, capacitación

ISBN: 978-989-36481-2-4

e implementación. No obstante, en estudios y reportes posteriores sobre plataformas de desarrollo low-code, el significado del término ha evolucionado de forma continua, manteniéndose en un estado de cambio y cierta ambigüedad [11]. Los enfoques Low-Code permite el despliegue, ejecución y gestión de aplicaciones de manera simplificada y muchas veces en un solo paso, a través del uso de la abstracción de programación de tipo declarativa y de alto nivel, tal como lo son los lenguajes basados en modelos y los metadatos [12].

C. Plataformas de Desarrollo Low-Code

Definición: Las Plataformas de Desarrollo Low-Code (LCDPs) son aquellas que facilitan el desarrollo escalable de aplicaciones, transformando los componentes Low-code reutilizables en recursos de frontera. Cabe señalar que, en estas plataformas, los componentes se desarrollan, comparten y combinan a través de entornos visuales, además, permite a los programadores construir nuevas aplicaciones aportando creatividad y eficiencia en este proceso [13].

Requisitos: Las plataformas de desarrollo Low-Code debe cumplir con 10 requisitos: Accesibilidad, Eficiencia, Flexibilidad, Interoperabilidad, Escalabilidad, Colaboración, Reusabilidad, Capacidad de respuesta, Extensibilidad y Portabilidad, los cuales deben permitir que la forma de crear software sea muy ágil para el programador [14]technology entry barriers often hinder widespread adoption and limit the rapid development of tailored applications. Existing low-code development platforms (LCDPs.

Características y Beneficios: Wang et al. [15] mencionaron características y beneficios de las LCDP: 1) Ofrecen interfaces visuales y procedimientos bastantes simplificados con requisitos mínimos en codificación. 2) Permiten construir aplicaciones de manera muy rápida a través del uso de interfaces gráficas y con un conocimiento muy básico en programación. 3) Poseen componentes de desarrollo "preconstruidos". 4) Aumentan la velocidad en el desarrollo de software. 5) Reducen costos en el proceso de desarrollo de software. 6) Reducen la carga de trabajo. 7) Permite que las personas que no son desarrolladores participen en el proceso de creación de aplicaciones. Las aplicaciones Low-Code requieren menos codificación manual, donde su proceso de desarrollo es rápido, permitiendo tenerlas funcionales y disponibles para su uso, así como también prototipos que sirven para validar requisitos de forma temprana y así evitar bucles innecesarios en el desarrollo de software [16].

D. Antecedentes

Aguzzi et al. [17] presentaron una herramienta visual de desarrollo de bajo código denominada "ScaFi Blocks", la cual buscó la creación de algoritmos de enjambre para un tipo de sistemas colectivos. Permitiendo disminuir las dificultades en el ámbito computacional, generando que usuarios que no conocen de programación puedan acceder a esta. En conclusión, se determinó que esta herramienta no solo permitió crear estos algoritmos, sino que mejoró la comprensión de forma intuitiva de los conceptos básicos de programación.

Otro estudio realizado por Smith y de Vries [18], buscó disminuir el tiempo en el otorgamiento de una concesión en una universidad a modalidad a distancia. Esto se logró utilizando una plataforma llamada "Power Automate", que logró: aminorar el trámite en un 92%, mejorar algunas actividades que se realizaban de forma manual y, mejorar la productividad en los administrativos de esta institución. Concluyendo que se deben seguir aplicando más casos parecidos a estos para fomentar el uso de estas herramientas.

La investigación realizada por Waszkowski [19], evaluó plataformas de desarrollo Low-Code con la finalidad de determinar su idoneidad para el "Desarrollo de software por no especialistas en TI" llamado también "Citzen Development". Propuso un índice llamado CD Score, que sirvió para comparar LCPs y, para lograrlo, se seleccionaron algunas plataformas líderes del mercado como: Mendix, OutSystems, Microsoft Power Apps, Zoho Creator, Google AppSheet y una del mercado local: Aurea. Los resultados destacaron una variabilidad significativa en las competencias de TI necesarias entre estas plataformas, considerando que, por ejemplo: Las fases de Diseño y Desarrollo de software aún necesitan de habilidades de TI como: modelamiento de datos y diseño de interfaz gráfica. Concluyendo que CD Score permite a los equipos de TI la comparación objetiva entre que LCDPs son adecuadas para ellos.

III. Metodología o Procedimiento

A. Diseño de la Revisión, Protocolo y Registro

La investigación se diseñó como una Revisión Sistemática de la Literatura (RSL) la cual tomó como base los lineamientos más importantes establecidos por la guía PRISMA [20], con el objetivo de sintetizar la evidencia existente sobre los Patrones de Diseño en el Desarrollo Low-Code. En un paso previo al inicio de la revisión, se hizo un protocolo que establecieron: 5 preguntas de investigación (Tabla I), criterios de inclusión/exclusión, el proceso de selección de estudios (todos utilizando la base de datos Scopus), así como lo métodos de extracción y análisis de los datos. La selección de artículos se realizó por una serie de pasos: 1) filtrado de descriptores en título y Abstract, 2) filtrado por resumen y 3) evaluación del documento completo (aquellos que responden a las preguntas de investigación). Dicho protocolo se sistematizó mediante una matriz de datos en una hoja de Ms. Excel y se compartió en Figshare [21].

B. Criterios de Inclusión / Exclusión

Los criterios que se establecieron en esta RSL cumplieron un punto clave para asegurar que el proceso de investigación sea riguroso, transparente y sobre todo válido. Estos delimitaron las publicaciones que no fueron consideradas, teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- CE1: No están en el idioma inglés.
- CE2: No son del tipo artículo.
- CE3: No son de acceso abierto.
- CE4: No se encuentran entre los años 2019 – 2025.
- CE5: No se encuentran en su versión final.
- CE6: No tienen el archivo PDF completo.
- CE7: No responden a las preguntas de investigación

C. Fuentes de Información y Estrategia de Búsqueda

ISBN: 978-989-36481-2-4

Las publicaciones que se utilizaron en esta RSL fueron extraídas únicamente de base de datos SCOPUS, la cual fue elegida porque asegura que las revistas cumplan con un control de calidad, es multidisciplinaria y porque su interfaz de búsqueda es versátil, práctica, así como fácil de utilizar. Se revisaron solo artículos en su versión final (no conferencias, no tesis, ni revisiones previas) que se encontraron desde el 2019 hasta el 2025 y, para poder encontrarlos se utilizó descriptores como "design pattern" o "low-code", que, combinados con operadores booleanos, permitió tener la cadena de búsqueda general que se muestra en la Fig 1. Cabe señalar que este proceso se ejecutó en febrero del 2026.

(TITLE-ABS ("design pattern*" OR "architectural pattern*" OR "pattern-based" OR "pattern language" OR "anti-pattern*" OR "best practice*" OR "reusable solution*")

AND TITLE-ABS ("low-code" OR "low code" OR "no-code" OR "no code" OR "LCNC" OR "citizen development" OR "model-driven" OR "model driven" OR MDD OR "model-driven engineering" OR MDE OR "software factory" OR "application platform as a service" OR aPaaS OR "visual development" OR "declarative development" OR "workflow automation" OR "business process management" OR BPM OR "domain-specific language*" OR DSL)

)

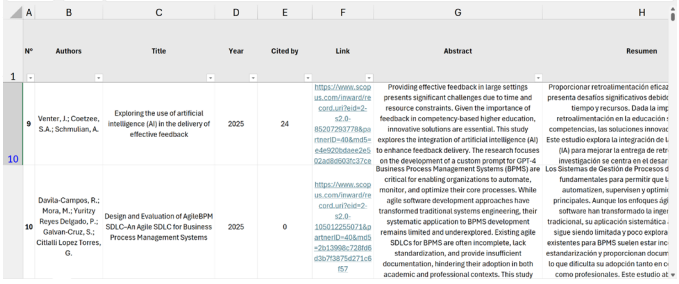
Figura 1. Cadena de búsqueda general para Scopus

D. *Proceso de Selección de Estudios General*

Este proceso se realizó utilizando las pautas y recomendaciones de la guía PRISMA 2020, destacando 4 fases: 1) evaluación de publicaciones por título y Abstract según descriptores, 2) aplicación de filtros, 3) Evaluación por Resumen y 4) Evaluación de texto completo. En la primera fase todos los metadatos de los artículos fueron extraídos de la base de datos Scopus en un archivo CSV. En la segunda fase, se aplicaron los filtros para cada uno de estos: solo publicaciones en inglés, de tipo artículo, acceso abierto, que se encuentren entre el 2019 y 2025, sean de publicación final. En la fase 3, se evaluó cada Abstract, utilizando para ello un archivo Excel (ya filtrado) definiendo aquellos que sean potencialmente legibles y pertinentes con el concepto de patrones de diseño y low-code. En la fase 4, se evaluaron los documentos con acceso a PDF completo por 3 revisores (integrantes de esta investigación) que teniendo en cuenta el rigor metodológico y científico se pudo obtener un conjunto de estudios incluidos para el análisis final. Cabe señalar que todo esto proceso se representa en el Diagrama PRISMA de esta RSL (Fig. 3).

E. *Proceso de Extracción*

La extracción de datos se inició con el diseño de una plantilla en Excel (un extracto de ella se muestra en la Fig. 2), donde los revisores definieron incluir campos o ítems como: N°. Au-



	A	B	C	D	E	F	G	H
1	N°	Authors	Title	Year	Cited by	Link	Abstract	Resumen
9	9	Venter, J.; Coetzee, S.A.; Schmulian, A.	Exploring the use of artificial intelligence (AI) in the delivery of effective feedback	2025	24	https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85207790778&partnerID=40&md5=e4e920bdaee2e502ac8d6603fc37ce	Providing effective feedback in large settings presents significant challenges due to time and resource constraints. Given the importance of feedback in competency-based higher education, innovative solutions are essential. This study explores the integration of artificial intelligence (AI) to enhance feedback delivery. The research focuses on the development of a custom prompt for GPT-4	Proporcionar retroalimentación eficaz presenta desafíos significativos debido tiempo y recursos. Dada la imp retroalimentación en la educación competencias, las soluciones innovad Este estudio explora la integración de (IA) para mejorar la entrega de retr investigación se centra en el desar
10	10	Davila-Campos, R.; Mora, M.; Yuritzy Reyes Delgado, P.; Galvan-Cruz, S.; Cittalli Lopez Torres, G.	Design and Evaluation of AgileBPM SDLC-An Agile SDLC for Business Process Management Systems	2025	0	https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-105012259071&partnerID=40&md5=2b13998c728fd6d3b7f3875d271c6f57	Business Process Management Systems (BPMS) are critical for enabling organizations to automate, monitor, and optimize their core processes. While agile software development approaches have transformed traditional systems engineering, their systematic application to BPMS development remains limited and underexplored. Existing agile SDLCs for BPMS are often incomplete, lack standardization, and provide insufficient documentation, hindering their adoption in both academic and professional contexts. This study	Los Sistemas de Gestión de Procesos d fundamentales para permitir que automatizen, supervisen y optimi principales. Aunque los enfoques ágil software han transformado la ingen tradicional, su aplicación sistemática sigue siendo limitada y poco explora existentes para BPMS suelen estar inc estandarización y proporcionan docum lo que dificulta su adopción tanto en c como profesionales. Este estudio at

Figura 2. Extracto de la plantilla Excel para el proceso de extracción

F. *Método de Síntesis*

La RSL utilizó un método de síntesis con enfoque mixto, que combinó el análisis cuantitativo y cualitativa. En la parte cuantitativa se utilizó la estadística descriptiva (frecuencias) considerando campos o ítems: Años y Cuartil de las publicaciones, utilizando solo gráficos para su representación. En la parte cualitativa se empleó una codificación temática genérica para la identificación de puntos en común en las respuestas que ofrecen las publicaciones por cada pregunta de investigación realizada. Cabe señalar que no se realizó ninguna triangulación ni metaanálisis debido a la heterogeneidad y diferentes puntos encontrados al realizar el análisis.

IV. Resultados

A. *Proceso de Selección de Estudios Específico*

En la fase de identificación, se utilizó la cadena de búsqueda general (Fig 1.) que arrojó 1142 artículos; posteriormente, en la fase de chequeo, se aplicaron los filtros: idioma inglés (1125), artículos (273), acceso abierto (118), desde el 2019 – 2025 (72), que sean de publicación final (71), Revisión de Abstract (34), Acceso a PDF (31) y finalmente, analizando los textos completos por cada integrante de esta investigación (a fin de evitar sesgos) se obtuvieron 21 estudios que respondieron a las preguntas de investigación, los cuales se registraron en el software de gestión de citas Zotero (Fig. 3). La exportación de estos artículos se encuentra en [22].

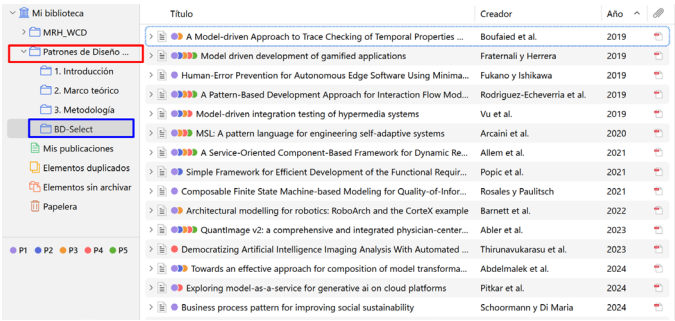


Figura 3. Software Zotero

El flujo completo de este proceso (identificación, chequeo e incluido) se aprecia en el diagrama PRISMA representada en la Fig. 4 que se muestra a continuación:

B. *Características de los estudios incluidos*

Los artículos incluidos, que en su mayoría fueron de tipo aplicadas y de desarrollo tecnológico, se caracterizan por poseer una notable diversidad de información, destacando aquellos orientados a los procesos, así como aquellos dirigidos por modelos (MDA y MDE) en la generación automática de software en plataformas low-code. En su mayoría, éstas lograron: reducir tiempos de desarrollo, mejoraron el proceso de mantenimiento, se anticiparon en la detección de errores comunes y, buscaron que se cumplan las concepciones referentes al desarrollo ágil.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Finalmente, se destaca que la población que intervienen va desde programadores o ingenieros de procesos hasta sectores como salud o robótica, lo que permite inferir que este tema es transversal en diversas áreas.

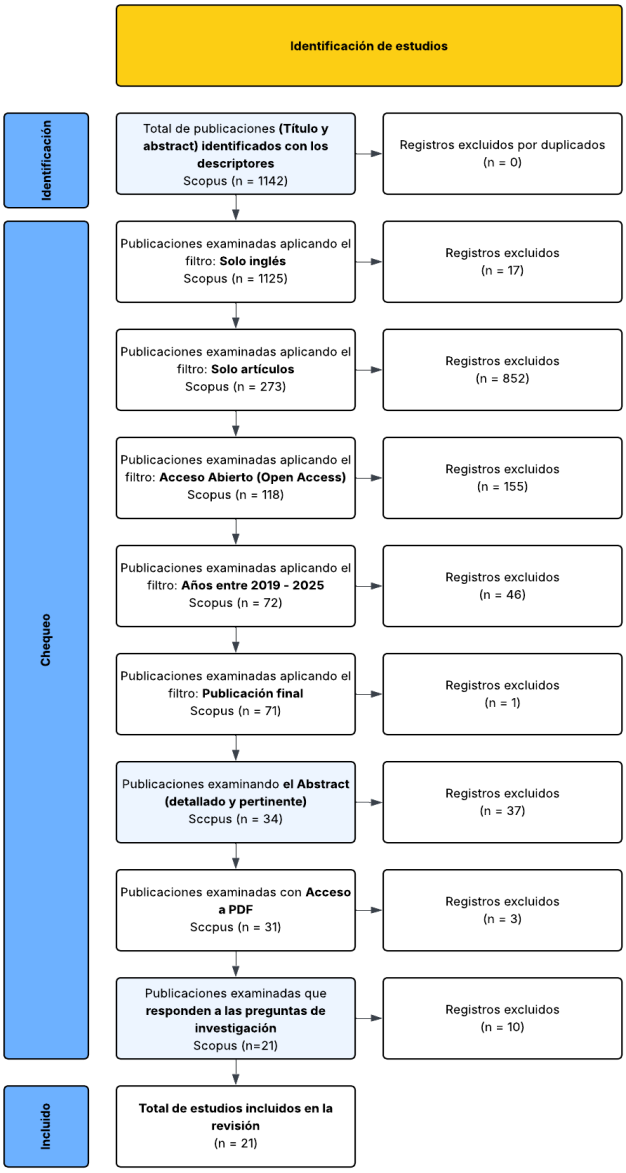


Figura 4. Diagrama Prisma

1) *Distribución de artículos por año:* En la Fig. 5 se observa que existe una variación relevante entre la cantidad de artículos analizados, observándose una fluctuación en la producción científica que inicia desde un pico alto (2019), a un punto mínimo y/o medio (2020 - 2022), seguido de un repunte (2023 - 2024) hasta llegar a un punto máximo (2025). Esta tendencia indica una mayor producción científica, relevancia o interés por los conceptos low-code.

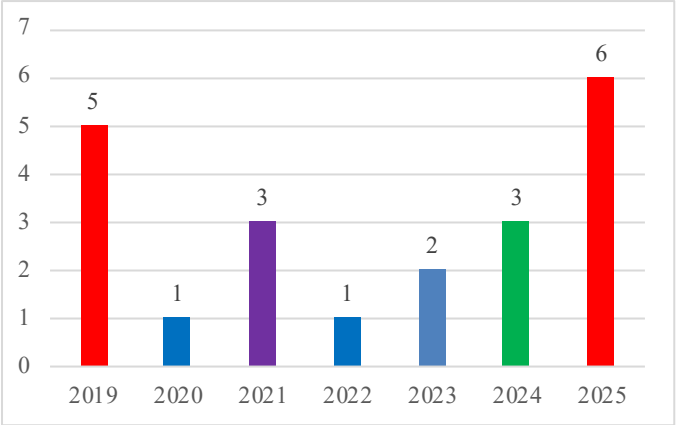


Figura 5. Distribución de artículos por años

2) *Distribución de artículos por cuartil:* La distribución que se observa en la Fig. 6 demuestra que existe una mayor presencia de artículos en Q1, seguida de Q3 para el análisis realizado, lo que evidencia una producción que recae en revistas de mayor impacto. En conclusión, existe una moderada concentración hacia cuartiles de mayor calidad.

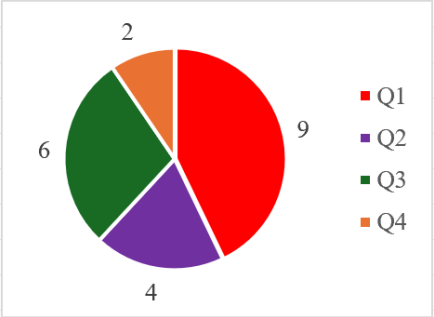


Figura 6. Distribución de Artículos por Cuartil (Q) de Revista

3) *Síntesis de estudios por pregunta de investigación:* En la Tabla II se presenta la relación entre las RQ y los estudios que aportaron para dar respuesta a cada una de éstas. Además, se aprecia una gran cantidad de referencias asociadas con las primeras preguntas (RQ1 - 18, RQ2 – 10, RQ3 – 13 y RQ4 - 13) lo que significa una mayor disponibilidad de información para conocer información sobre patrones de diseño en el contexto de desarrollo low-code. También se destaca que en la RQ5, solo 6 estudios demuestran los dominios o áreas donde los patrones de diseño se implementaron con éxito.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

TABELA II. Síntesis de Estudios por Pregunta de Investigación

N°	Preguntas de investigación	Estudios que responden
RQ1	¿Qué tipos de patrones de diseño se utilizan o proponen en el contexto del desarrollo low-code?	[23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39], [40]
RQ2	¿Cómo se implementan y/o ejecutan los patrones de diseño dentro de las plataformas y herramientas low-code?	[24], [25], [30], [31], [33], [34], [36], [38], [39], [40]
RQ3	¿Cuál es el papel juegan los enfoques dirigidos por modelos (MDE) y los lenguajes de dominio específico (DSL) en la definición y aplicación de patrones dentro del ecosistema low-code?	[23], [24], [25], [26], [30], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [40], [41]
RQ4	¿Qué limitaciones existen sobre el uso de patrones de diseño en iniciativas de desarrollo low-code?	[24], [25], [29], [30], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [41], [42], [43]
RQ5	¿En qué dominios o áreas se han implementado con éxito patrones de diseño en soluciones low-code?	[24], [25], [33], [34], [37], [38]

C. *Síntesis de Resultados por RQ*

1) *RQ1 - ¿Qué tipos de patrones de diseño se utilizan o proponen en el contexto del desarrollo low-code?:* Con el análisis de los 18 estudios que respondieron a a esta pregunta, se identificaron 15 patrones de diseño dentro del desarrollo low-code, divididos en 7 familias de patrón que van desde la "Arquitectura de Sistemas" hasta los orientados a la "Seguridad". En la Tabla III se muestra la propuesta realizada por esta RSL, destacando las familias Orientados a los procesos (6) seguido de los relacionados con la Ingeniería dirigida por modelos (3) y aquellos que buscan la verificación, trazabilidad y calidad (3).

TABELA III. Propuesta de Patrones en el Desarrollo low-code

N°	Familia	Patrón	# artículos
1	Arquitectura de sistemas	• Basado en microservicios • Basado en Model as a Service (MaaS)	2
2	Ingeniería dirigida por modelos	• Model Driven Architecture (MDA) • Mapeo del lenguaje de dominio • De Diseño en Model Driven Engineering (MDE)	3
3	Orientados a los procesos	• De diseño de procesos. • De mejora de procesos de negocio • De modelos de procesos de negocio • De flujo de trabajo ecológico	6
4	Verificación, trazabilidad y calidad	• Verificación por etapas • Rastreo simbólico y seguimiento de código	3
5	Orientados a la experiencia y feedback	• Enfoque No-Code para aplicaciones web. • Diseño centrado en el feedback	2
6	De Dominio (IoT)	• De mejora de IoT	1
7	Seguridad	• De ataque y mitigación	1

Una vez realizada la propuesta de familias y su correspondiente tipo de patrón, se tuvo la necesidad de describir el rol que cada uno de estos tiene con el desarrollo low-code, lo cual permita tener una base para conocer su finalidad dentro del proceso de creación de una aplicación. En la Tabla IV se muestra la descripción realizada:

TABELA IV. Familia de Patrones de Diseño y su Rol en low-code

N°	Familia	Rol del patrón en low-code
1	Arquitectura de sistemas	Son los que buscan que las aplicaciones se generen a través del consumo de servicios o modelos como servicio (de forma independiente).
2	Ingeniería dirigida por modelos	Estos patrones, que en su gran mayoría son "model-driven", tratan de estandarizar la forma de pasar de formularios, flujos o entidades a ejecutables.
3	Orientados a los procesos	Son aquellos que evitar el rediseño de flujos de procesos. Cabe señalar que muchas aplicaciones low-code son procesos (por ejemplo: solicitudes o aprobaciones).
4	Verificación, trazabilidad y calidad	Buscan garantizar la calidad cuando las "piezas de software" se generan de forma automática o son configuradas por los programadores.
5	Orientados a la experiencia y feedback	Estos patrones aceleran la entrega de software, incluyendo al usuario muchas veces, a fin de obtener un feedback de ellos.
6	De Dominio (IoT)	Tratan de orquestar los datos que provienen de sensores sin la necesidad de programar algo desde cero.
7	Seguridad	Buscan incorporar "seguridad por diseño" en la implementación de un software.

2) *RQ2 - ¿Cómo se implementan y/o ejecutan los patrones de diseño dentro de las plataformas y herramientas low-code?:* El análisis de 10 artículos que respondieron a esta pregunta permitió identificar que los patrones de diseño en el ecosistema low-code, primero se encapsulan o gestionan en modelos, catálogos, plantillas, motores de ejecución y controles de verificación, posteriormente el usuario a través de una configuración visual o de instanciación automática (flujos y conectores) permite obtener código o reglas listas (motor runtime) para ser utilizadas en el proceso de desarrollo de software. Cabe señalar que su implementación adecuada se asegura con condiciones previas, verificación por etapas y en muchos casos, pruebas orientadas por modelos, los cuales garantizan la trazabilidad en todo el proceso.

Los niveles identificados dentro del proceso de implementación y ejecución de los patrones de diseño fueron: de diseño y modelo, de catálogo, de orquestación de transformaciones, de generación e instanciación, de ejecución visual y, de verificación y trazabilidad. En la Tabla V se muestran estos niveles con sus entregables propuestos:

ISBN: 978-989-36481-2-4

TABELA V. PROPUESTA DE NIVELES Y ENTREGABLES EN EL PROCESO DE IMPLEMENTACIÓN Y EJECUCIÓN DE PATRONES EN LOW-CODE

N°	Niveles	Entregables
1	Niveles de diseño y modelo	• Modelos • Metamodelos • Reglas
2	Niveles de catálogo	• Fichas de patrón • Condiciones de aplicabilidad
3	Niveles de orquestación de transformaciones	• Reglas • Scripts
4	Niveles de generación e instanciación	• Componentes • Repositorios • Esqueletos de módulos
5	Niveles de ejecución visual	• Pipelines • Flujos configurados
6	Niveles de verificación y trazabilidad	• Reportes de validación • Matriz de trazabilidad

Además, se propone un flujo "de extremo o extremo" considerando actividades que se deben tener en cuenta en el proceso de implementación del ecosistema low-code:

1. Seleccionar el patrón desde algún repositorio.
2. Modelar o instanciar parámetros o restricciones.
3. Organizar transformaciones
4. Crear código con plantillas.
5. Configurar conectores, flujos o reglas de forma visual.
6. Activar el motor de ejecución
7. Verificar, comprobar y trazar el proceso.
8. Desplegar y monitorear a través de logs o revisión de los catálogos.

3) *RQ3 - ¿Cuál es el papel juegan los enfoques dirigidos por modelos (MDE) y los lenguajes de dominio específico (DSL) en la definición y aplicación de patrones dentro del ecosistema low-code?:* En el desarrollo de aplicaciones low-code, MDE y DSL son considerados como parte de la definición de la infraestructura que busca transferir las nociones conceptuales de los usuarios a la creación de aplicaciones con un esfuerzo mínimo de programación realizada manualmente.

Los Lenguajes Específicos de Dominio (DSL por sus siglas en inglés) tienen por objetivo la definición de patrones, lógica de negocio, a través de una notación de alto nivel, precisa y abstracta, misma que se adapta a un dominio específico (UML o IFML), formalizando los patrones de diseño que son comprendidos y reutilizados por los usuarios con o sin experiencia en desarrollo de software. Los conceptos relacionados a este concepto son: Encapsulamiento y precisión.

Los enfoques de Diseño en Model Driven Engineering (MDE) buscan aplicar los patrones de forma automatizada a través de la transformación de modelos (por ejemplo: SSTs) y la creación de código; lo que hace que los patrones definidos en DSL se materialicen en una implementación consistente y verificable, lo que reduce la intervención de los usuarios en el proceso de desarrollo de software. Los conceptos relacionados a este concepto son: Automatización y consistencia.

En la Tabla VI se muestra la comparación entre los elementos DSL y MDE, así como su influencia en el desarrollo de aplicaciones. Concluyendo que estos elementos permiten en conjunto definir que patrones de diseño abstractos, reusables y que se generen de forma automática, lo que reduce la complejidad que existe (en ciertos procesos) para un programador o usuario interesado.

TABELA VI. COMPARACIÓN DE FUNCIONES E INFLUENCIA DE DSL Y MDE

N°	Elemento	Función en low-code	Influencia en el desarrollo
1	DSL	Definición de patrones y lógica de negocio	Permite que programadores no tan expertos definan lógica.
2	MDE	Ejecución y transformación de modelos automáticos en aplicaciones reales	Disminuye el tiempo de entrega de aplicaciones.

4) *RQ4 - ¿Qué limitaciones existen sobre el uso de patrones de diseño en iniciativas de desarrollo low-code?:* Algunas de las limitaciones encontradas en 13 artículos de esta revisión se agrupan en las siguientes categorías: 1) Limitaciones técnicas y de automatización, 2) restricciones de las mismas plataformas low-code, 3) problemas en la abstracción y/o modelamiento, 4) conocimiento necesario para la aplicación correcta de los patrones y 5) limitaciones en el soporte nativo para patrones. En la Tabla VII se muestra algunas limitaciones por categoría:

TABELA VII. LIMITACIONES AGRUPADAS EN CATEGORÍAS

N°	Categoría	Ejemplo de limitación
1	Limitaciones técnicas y de automatización	• Cuando se trata de problemas complejos, la automatización completa es difícil. • Si existe modelos con defectos pueden generar errores en la generación de código.
2	Restricciones de las mismas plataformas low-code	• Los componentes predefinidos limitan la personalización. • El control de la arquitectura es inmanejable porque actual como "cajas negras". • Existe dependencia por el proveedor de la plataforma.
3	Problemas en la abstracción y/o modelamiento	• Existe notaciones visuales que no son precisas. • Si un patrón no está bien definido, es difícil transformarlo.
4	Conocimiento necesario para la aplicación correcta de los patrones	• Se necesita experiencia en arquitectura de software para la aplicación de los patrones de forma correcta.
5	Limitaciones en el soporte nativo para patrones.	• El soporte nativo para los patrones no existe cuando se requiere configuraciones específicas.

No obstante, aunque los patrones de diseño son vitales para que una aplicación o sistema sea escalable en el tiempo, conceptualización, diseño e implementación en entornos low-code aun presentan limitaciones, las cuales en la Tabla VIII se generó un resumen al respecto.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

TABELA VIII. Limitaciones Resumen Sobre el Uso de Patrones de Diseño

N°	Limitación	Impacto
1	Proceso de automatización incompleto	Es necesario el involucramiento de profesionales expertos para el entendimiento de la automatización.
2	Personalización del diseño	Genera un incremento en costo y tiempo en el diseño inicial de la aplicación.
3	Rigidez de los modelos	Existe un alto riesgo de replicar errores en toda la aplicación.

5) *RQ5 - ¿En qué dominios o áreas se han implementado con éxito patrones de diseño en soluciones low-code?:* Los patrones de diseño en soluciones low-code se aplicaron con éxito en diversos dominios, que van desde el concepto de desarrollo de aplicaciones web tradicionales o empresariales hasta los Sistemas IoT, aplicaciones con IA o de gamificación. Lo que demuestra una versatilidad del enfoque low-code en diferentes contextos. Ante eso, se elaboró la Tabla IX, la cual se muestra a continuación:

TABELA Ix. Dominios o Áreas de Implementación de Patrones de Diseño low-code

N°	Dominio / Área	Especificaciones
1	Desarrollo de software	• Interfaces de usuario • Administración de base de datos • Arquitecturas: Microservicios, SOA o aplicaciones full-stack
2	Procesos de negocio	• Gestión de tareas automáticas • Integración de datos
3	Sistemas basados en Hardware	• Sistemas embebidos • Sistemas de seguridad
4	Dominios específicos	• IoT • Automatización • Gamificación • IA

V. Discusión

La investigación permitió identificar que los patrones de diseño que se utilizan o proponen en el desarrollo low-code son aquellos que pertenecen a las siguientes familias: 1) orientados a los procesos, 2) ingeniería dirigida por modelos y 3) los relacionados con la verificación, trazabilidad y calidad. Esto es fundamentado porque: buscan reducir la complejidad del diseño de flujos (que muchas veces es repetitivo), mantener la coherencia y adaptabilidad de los modelos que se utilizan para el desarrollo de una aplicación y, garantizar la calidad del software sin la necesidad de poseer habilidades complejas en la programación tradicional. Por consiguiente, se infiere que estos patrones de diseño permitirán que las plataformas low-code sean más robustos y que sean sostenibles en el tiempo, además, de su contribución para que las organizaciones (que necesitan software) integren dentro de sus procesos el concepto de innovación digital.

Con respecto a las actividades "end – to- end" que se deben considerar para la implementación de un ecosistema low-code, estos inician desde seleccionar el patrón de diseño adecuado hasta la verificación, despliegue y monitoreo a través de logs. Este flujo debe permitir estructurar de manera adecuada el desarrollo de aplicaciones low-code, a fin de que estas sean consistentes, reproducibles y sobre todo alineadas del cliente o la organización. El proceso que se propone se muestra secuencial, pero puede ser iterativo según la necesidad o situación que se tenga, porque se busca que los patrones de diseño que se seleccionen sean adaptados de una manera adecuada al contexto de desarrollo, donde la generación de código (así como la transformación) permitan mantener coherencia técnica y que las configuraciones visuales de reglas o flujos, permitan minimizar los errores que comúnmente el programados suele encontrar (lo que genera que se pierda tiempo) durante la creación de un software. Además, las prácticas de trazabilidad son importantes durante este flujo, puesto que permiten identificar fallos de manera anticipada, así como controlar de manera adecuada la evolución del software. Finalmente, las actividades de despliegue y de supervisión, permiten retroalimentar y mejorar le software, lo que permite que estos sean escalables, así como que estén preparados para la aparición de nuevos requerimientos de manera ágil.

Se determinó que DSL y MDE forman parte de la base técnica que permiten que las plataformas low-code posean niveles altos de abstracción y automatización del desarrollo de software. Los DSL permiten que se programen lógica de negocio a través de estructuras simplificadas y orientadas a las necesidades de programadores no tan expertos en desarrollo. La MDE permite transformar modelos en software funcional mediante procesos que son automáticos (por ejemplo: generación de código y ejecución). Por lo tanto, la combinación de estos conceptos permite reducir la complejidad que existe en el desarrollo de software tradicional, agiliza su entrega y fomenta un entorno innovador sin depender de profesionales con perfiles altamente técnicos, lo que hace que muchos procesos sean eficientes y autónomos dentro del ecosistema low-code.

Desarrollar software en entornos low-code no es nada sencillo y hay que andar con pies de plomo para que el proyecto no termine descarrilándose. Se identificaron limitaciones como, por ejemplo, si la automatización no es completa, terminas dependiendo todo el rato de profesionales con mucha experiencia para resolver cosas que deberían ser automáticas, y eso al final frena un montón la salida de nuevas funciones del software. Además, cuando toca personalizar el diseño, los costos se disparan y los tiempos se estiran, sobre todo al principio (porque a muchas veces se tiene usuarios inexpertos y que necesitan adaptación), que es cuando todo es más incierto. Finalmente, se identificó fue que algunos modelos con los que se trabaja son tan rígidos que, si te equivocas en algo, ese error se replica solo por todo el software afectando su estabilidad y calidad desde la percepción del usuario.

Los patrones de diseño low-code se desenvuelven en áreas como: desarrollo de software, procesos de negocio, sistemas basados en hardware y dominios específicos, lo que hace suponer que esta diversidad es debido que estos posibilitan el abordaje de la complejidad inherente a cada dominio mediante la implementación de abstracciones visuales y componentes reutilizables. Esta arquitectura permite la construcción de soluciones funcionales con una mínima necesidad de codificación manual.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Como resultado, las plataformas de desarrollo low-code aceleran significativamente los ciclos de desarrollo, optimizan la interoperabilidad entre sistemas heterogéneos y ofrecen la flexibilidad necesaria para entornos donde la personalización y la automatización de procesos son críticas. Este paradigma no solo optimiza los flujos de trabajo de los equipos técnicos y de negocio, sino que también democratiza el desarrollo de aplicaciones, ampliando el espectro de la innovación al facilitar la participación de perfiles no estrictamente técnicos en la creación de soluciones digitales.

VI. Conclusiones

En esta revisión sistemática de la literatura se identificaron 15 patrones de diseño, los cuales se agruparon en 7 familias que abarcan desde la arquitectura de sistemas hasta aquellos que se encargan de la seguridad. Destacando los orientados a los procesos e Ingeniería dirigida por modelos (MDA y MDE). El proceso de implementación sigue una seria de pasos que van desde la selección de patrones en catálogos o repositorios hasta verificación y despliegue, tratando de asegurar la trazabilidad de los entregables (como metamodelos o reglas de transformación). Para que el ecosistema low-code tenga éxito, debe existir sinergia entre DSL y MDE, los cuales permiten automatizar los tiempos de entrega y los tecnicismos que posee el desarrollador de software.

No obstante, el uso o implementación de estos patrones de diseño en los entornos low-code enfrentar serias limitaciones como la complejidad de ciertos modelos, la dependencia que se pueda tener hacia algún proveedor y lo difícil que surge automatizar problemas complejos que aún requieren de un profesional experto. A pesar de la existencia de estas limitaciones, se determinó que los patrones de diseño low-code son versátiles y ha quedado demostrado en la exitosa implementación en dominios / áreas que incluyen el uso de microservicios, la gestión de procesos de negocios, IoT y el uso aplicaciones con IA, lo cual permite concluir que se trata de una estrategia clave para que la creación de un software moderno sea práctico, escalable y eficiente.

Agradecimientos

Los autores de la investigación agradecen a la Dirección de Investigación de la Universidad César Vallejo Virtual por el apoyo para el desarrollo de la RSL.

Referencias Bibliográficas

[1] M. Alenezi y M. Akour, «AI-Driven Innovations in Software Engineering: A Review of Current Practices and Future Directions», Appl. Sci., vol. 15, n.o 3, ene. 2025, doi: 10.3390/app15031344.

[2] G. Lulichac, F. O. Pantoja, y M. Torres, «La IA Generativa en el Desarrollo de Software: Impacto en Diversas Industrias», Innov. Softw., vol. 6, n.o 1, pp. 76-100, mar. 2025, doi: 10.48168/innosoft.s23.a259.

[3] F. Mar'i et al., «Exploring the Use of Generative AI in Software Development: A Preliminary Study», E3S Web Conf., vol. 645, p. 04002, 2025, doi: 10.1051/e3sconf/202564504002.

[4] K. Rokis y M. Kirikova, «Challenges of Low-Code/No-Code Software Development: A Literature Review», en Perspectives in Business Informatics Research, Ē. Nazaruka, K. Sandkuhl, y U. Seigerroth, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2022, pp. 3-17. doi: 10.1007/978-3-031-16947-2_1.

[5] F. Sufi, «Algorithms in Low-Code-No-Code for Research Applications: A Practical Review», Algorithms, vol. 16, n.o 2, feb. 2023, doi: 10.3390/a16020108.

[6] G. Hurlburt, «Low-Code, No-Code, What's under the Hood?», IT Prof., vol. 23, n.o 6, pp. 4-7, 2021, doi: 10.1109/MITP.2021.3123415.

[7] J. Austerjost, E. Knöchelmann, T. Kruse, J. Kilian, B. Quaas, y M. W. Olszowy, «Low code, high impact: Application of low-code platforms to enable and democratize the development of laboratory digitalization and automation applications», SLAS Technol., vol. 35, p. 100353, dic. 2025, doi: 10.1016/j.slast.2025.100353.

[8] A. Techmanska y C. Stöckmann, «Low-Code excellence: unveiling the skill set of modern digital architects», Behav. Inf. Technol., vol. 45, n.o 1, pp. 19-39, ene. 2026, doi: 10.1080/0144929X.2025.2506663.

[9] E. Gamma, Ed., Design patterns: elements of reusable object-oriented software. en Addison-Wesley professional computing series. Reading, Mass: Addison-Wesley, 1995.

[10] F. Wedyan y S. Abufakher, «Impact of design patterns on software quality: a systematic literature review», IET Softw., vol. 14, n.o 1, pp. 1-17, 2020, doi: 10.1049/iet-sen.2018.5446.

[11] Y. Liu et al., «An empirical study on low-code programming using traditional vs large language model support», J. Syst. Softw., vol. 234, p. 112727, abr. 2026, doi: 10.1016/j.jss.2025.112727.

[12] H. Khalajzadeh y J. Grundy, «Accessibility of low-code approaches: A systematic literature review», Inf. Softw. Technol., vol. 177, p. 107570, ene. 2025, doi: 10.1016/j.infsof.2024.107570.

[13] A. Viljoen, A. Hein, y H. Krcmar, «Low-code development platform ecosystems», Electron. Mark., vol. 36, n.o 1, p. 12, ene. 2026, doi: 10.1007/s12525-025-00848-x.

[14] C. Shim, J. Gim, Y. Kim, y Y. Chae, «DIZEST: A low-code platform for workflow-driven artificial intelligence and data analysis», SoftwareX, vol. 33, p. 102519, feb. 2026, doi: 10.1016/j.softx.2026.102519.

[15] P. Wang, Z. Wang, J. Duan, Y. Miao, y W. Tian, «Review of the development status of low-code programming software for robots», Digit. Eng., vol. 4, p. 100039, mar. 2025, doi: 10.1016/j.dte.2025.100039.

[16] E. Martinez y L. Pfister, «Benefits and limitations of using low-code development to support digitalization in the construction industry», Autom. Constr., vol. 152, p. 104909, ago. 2023, doi: 10.1016/j.autcon.2023.104909.

[17] G. Aguzzi, M. Cerioni, y M. Viroli, «Low-code design of collective systems with ScaFi-Blocks», Sci. Comput. Program., vol. 247, p. 103356, ene. 2026, doi: 10.1016/j.scico.2025.103356.

[18] L. Smith y M. de Vries, «Process Optimisation Using a Low-Code Platform: Digitising a Concession Management Process», South Afr. J. Ind. Eng., vol. 36, n.o 4, pp. 32-46, dic. 2025, doi: 10.7166/36-4-3179.

[19] R. Waszkowski, «Evaluating low-code development platforms with the CD score», Sci. Rep., vol. 15, n.o 1, p. 38548, nov. 2025, doi: 10.1038/s41598-025-22385-5.

[20] PRISMA, «PRISMA statement», PRISMA statement. Accedido: 11 de febrero de 2026. [En línea]. Disponible en: https://www.prisma-statement.org

[21] figshare, «Plantilla en Excel». figshare, 12 de febrero de 2026. doi: 10.6084/m9.figshare.31329382.v1.

[22] «Exportación del software Zotero». figshare, 12 de febrero de 2026. doi: 10.6084/m9.figshare.31329385.v1.

[23] C. Boufaied, D. Bianculli, y L. Briand, «A Model-driven Approach to Trace Checking of Temporal Properties with Aggregations.», J. Object Technol., vol. 18, n.o 2, p. 15:1, 2019, doi: 10.5381/jot.2019.18.2.a15.

[24] R. Rodriguez-Echeverria, J. C. Preciado, Á. Rubio-Largo, J. M. Conejero, y Á. E. Prieto, «A Pattern-Based Development Approach for Interaction Flow Modeling Language», Sci. Program., vol. 2019, n.o 1, p. 7904353, 2019, doi: 10.1155/2019/7904353.

[25] K. Allem, E.-B. Bourennane, y Y. Khelfaoui, «A Service-Oriented Component-Based Framework for Dynamic Reconfiguration Modeling Targeting SystemC/TLM», Int. J. Reconfigurable Comput., vol. 2021, n.o 1, p. 5584391, 2021, doi: 10.1155/2021/5584391.

[26] W. Barnett, A. Cavalcanti, y A. Miyazawa, «Architectural modelling for robotics: RoboArch and the CorteX example», Front. Robot. AI, vol. 9, oct. 2022, doi: 10.3389/frobt.2022.991637.

[27] T. Schoormann y M. Di Maria, «Business process pattern for improving social sustainability», Australas. J. Inf. Syst., vol. 28, nov. 2024, doi: 10.3127/ajis.v28.4949.

[28] R. Rosales y M. Paulitsch, «Composable Finite State Machine-based Modeling for Quality-of-Information-aware Cyber-physical Systems», ACM Trans Cyber-Phys Syst, vol. 5, n.o 2, p. 13:1-13:27, ene. 2021, doi: 10.1145/3386244.

[29] H. Pitkar, S. Bauskar, D. S. Parmar, y H. K. Saran, «Exploring model-as-

a-service for generative ai on cloud platforms», Rev. Comput. Eng. Res., vol. 11, n.o 4, pp. 140-154, dic. 2024, doi: 10.18488/76.v11i4.4017.
[30] J. Venter, S. A. Coetzee, y A. Schmulian, «Exploring the use of artificial intelligence (AI) in the delivery of effective feedback», Assess. Eval. High. Educ., vol. 50, n.o 4, pp. 516-536, may 2025, doi: 10.1080/02602938.2024.2415649.
[31] M. Rizwan, C. Reichenbach, R. Caldas, M. Mayr, y V. Krueger, «EzSkiROS: enhancing robot skill composition with embedded DSL for early error detection», Front. Robot. AI, vol. 11, ene. 2025, doi: 10.3389/frobt.2024.1363443.
[32] R. Fukano y M. Ishikawa, «Human-Error Prevention for Autonomous Edge Software Using Minimalistic Modern C++», Big Data Cogn. Comput., vol. 3, n.o 4, p. 52, dic. 2019, doi: 10.3390/bdcc3040052.
[33] S. Khalfaoui, H. Khalfaoui, y A. Azmani, «Microservices-Driven Automation in Full-Stack Development: Bridging Efficiency and Innovation With FSMicroGenerator», IEEE Access, vol. 13, pp. 125131-125156, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3589285.
[34] P. Fraternali y S. L. Herrera, «Model driven development of gamified applications», J. Web Eng., vol. 18, n.o 7, pp. 655-694, 2019, doi: 10.13052/jwe1540-9589.1874.
[35] L. Naimi, L. Benaddi, C. Ouaddi, A. Souha, H. Abdelmalek, y A. Jakimi, «Model-Driven Architecture for Accelerating the Development of Tourism Applications», IEEE Access, vol. 13, pp. 131696-131715, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3592552.
[36] H. Vu, T. Fertig, y P. Braun, «Model-driven integration testing of hypermedia systems», J. Web Eng., vol. 18, n.o 4-6, pp. 381-408, 2019, doi: 10.13052/jwe1540-9589.18465.
[37] P. Arcaini, R. Mirandola, E. Riccobene, y P. Scandurra, «MSL: A pattern language for engineering self-adaptive systems», J. Syst. Softw., vol. 164, p. 110558, jun. 2020, doi: 10.1016/j.jss.2020.110558.
[38] D. Abler et al., «QuantImage v2: a comprehensive and integrated physician-centered cloud platform for radiomics and machine learning research», Eur. Radiol. Exp., vol. 7, n.o 1, p. 16, mar. 2023, doi: 10.1186/s41747-023-00326-z.
[39] S. Popic, N. Teslic, y M. Z. Bjelica, «Simple Framework for Efficient Development of the Functional Requirement Verification-specific Language», Adv. Electr. Comput. Eng., vol. 21, n.o 3, pp. 11-20, ago. 2021, doi: 10.4316/AECE.2021.03002.
[40] H. Abdelmalek, I. Khriss, y A. Jakimi, «Towards an effective approach for composition of model transformations», Front. Comput. Sci., vol. 6, jun. 2024, doi: 10.3389/fcomp.2024.1357845.
[41] L. Fischer, H. Kausch, B. Rumpe, M. Stachon, S. Stüber, y L. Wollenhaupt, «Methodical and Formally Verified Model-Driven Architecture Refactoring.», J. Object Technol., vol. 24, n.o 2, p. 2:1, 2025, doi: 10.5381/jot.2025.24.2.a13.
[42] A. J. Thirunavukarasu et al., «Democratizing Artificial Intelligence Imaging Analysis With Automated Machine Learning: Tutorial», J. Med. Internet Res., vol. 25, n.o 1, p. e49949, oct. 2023, doi: 10.2196/49949.
[43] R. Davila-Campos, M. Mora, P. Y. Reyes, S. Galván-Cruz, y G. C. López, «Design and Evaluation of AgileBPM SDLC–An Agile SDLC for Business Process Management Systems», IEEE Access, vol. 13, pp. 142058-142088, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3594684.

Sistema de Tutor Inteligente Basado en Machine Learning y Deep Learning con Enfoque Cuantitativo.

Intelligent Tutoring System Based on Machine Learning and Deep Learning with a Quantitative Reasoning.

Darienzo Alberto Valencia Álvarez
Maestría en Inteligencia Artificial, Universidad de La Salle
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
dvalencia54@unisalle.edu.co

Elkin Nicolás Canaría Martínez
Maestría en Inteligencia Artificial, Universidad de La Salle
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
ecanaria74@unisalle.edu.co

Iván Andrés Calderón Suarez
Maestría en Inteligencia Artificial, Universidad de La Salle
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
icalderon23@unisalle.edu.co

Diana Janeth Lancheros Cuesta
Universidad de La Salle
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia
dilancheros@unisalle.edu.co

***Resumen* — Las deficiencias en razonamiento cuantitativo en la educación media colombiana limitan el acceso a disciplinas STEM. Este trabajo propone un modelo inteligente basado en Machine Learning y Deep Learning para predecir la probabilidad de acierto de los estudiantes en ejercicios cuantitativos. Utilizando datos públicos, se desarrollaron y validaron diversos modelos para identificar la arquitectura óptima. El resultado es una herramienta capaz de integrarse en sistemas de tutoría inteligente, permitiendo la personalización del aprendizaje y aportando una solución técnica para reducir brechas educativas en el país.**

Palabras **Clave - Sistemas de tutoría inteligente, Inteligencia artificial, Deep Learning, Machine Learning, Razonamiento cuantitativo, Aprendizaje personalizado, Modelado predictivo.**

***Abstract* — Deficiencies in quantitative reasoning among Colombian high school students limit access to STEM disciplines. This study proposes an intelligent model based on Machine Learning and Deep Learning to predict the probability of student success in quantitative tasks. Utilizing public datasets, various architectures were developed and validated to identify the optimal model. The resulting system is designed for integration into Intelligent Tutoring Systems (ITS), enabling personalized learning pathways and providing a technical solution to bridge educational gaps. This research contributes applied knowledge to the digital transformation of education and pedagogical innovation within the national context.**

Keywords - Intelligent Tutoring Systems (ITS), Student Modeling, Deep Learning, Quantitative Reasoning, Educational Data Mining (EDM), Predictive Modeling, Personalized Learning.

I. Introducción

El razonamiento cuantitativo es una competencia clave para afrontar los retos del siglo XXI, en especial en áreas como la ingeniería, la ciencia de datos y la toma de decisiones informadas. No obstante, en Colombia persisten dificultades en su aprendizaje y aplicación, vinculadas a prácticas pedagógicas poco flexibles que no responden a las necesidades individuales y favorecen la desmotivación y un aprendizaje superficial [1]. Esta problemática se relaciona, entre otros factores, con la limitada personalización del proceso educativo y la alta relación estudiante-docente, que en básica secundaria promedia 20,46 estudiantes por profesor según el DANE (2023) [2]. así como la influencia de variables emocionales como la ansiedad matemática, presente en el 74% de los estudiantes, quienes expresan temor a cometer errores al resolver problemas [1].

TABLA I. Ratio de estudiantes por docente según datos del DANE 2023 [2].

	Cantidad Total	Básica Secundaria		Media	
		% Aporte	Cantidad	% Aporte	Cantidad
Docentes	453.540	32,00%	145.133	13,80%	20.028
Alumnos	9.547.160	31,10%	2.969.167	11.90%	353.331
Ratio estudiantes por docente		20,46		17,64	

Como consecuencia, los resultados en pruebas estandarizadas reflejan una brecha persistente. En las pruebas Saber Pro (2022), solo el 4% de los estudiantes alcanzó el nivel superi-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

or en razonamiento cuantitativo [3]. A nivel internacional, los resultados PISA 2022 sitúan a Colombia aproximadamente un 19% por debajo del promedio de la OCDE [4]. Esta tendencia impacta directamente en la elección profesional, evidenciándose una disminución en los graduados de áreas de Ingeniería y Ciencias Naturales entre 2021 y 2023 [5] [6].

Ante este escenario, surge la necesidad de implementar soluciones basadas en inteligencia artificial orientadas a la transformación digital en el ámbito educativo. En este sentido, el objetivo de la presente investigación es proponer un modelo predictivo que permita estimar el nivel de dominio de los estudiantes en habilidades específicas del área de razonamiento cuantitativo, a partir del análisis de datos públicos. Metodológicamente, el estudio se enmarca en un enfoque cuantitativo y adopta elementos de Ciencia del Diseño, dado que construye y evalúa un artefacto predictivo orientado a su integración en un sistema de tutoría inteligente. La presente investigación muestra en la Sección II los trabajos relacionados; la Sección III la metodologia; la Sección IV los resultados; y la Sección V presenta las conclusiones.

II. Trabajos Relacionados

La literatura reciente coincide en que XGBoost supera a los enfoques tradicionales en la predicción y clasificación del desempeño académico, al ofrecer mayor precisión y robustez frente a la complejidad y variabilidad de los datos educativos. L. Ying en [7] propone un modelo XGBoost optimizado mediante grid search y validación cruzada que reduce significativamente el RMSE y supera a árboles de decisión y random forest en precisión y eficiencia. De manera coherente, G. Li y H. Zhou [8] muestran que, tras procesos adecuados de preprocesamiento y normalización de los datos, XGBoost mejora métricas como accuracy, precision, recall y F1-score, lo que evidencia su eficacia para la estimación del rendimiento estudiantil. En estudios más recientes, [9] y [10] confirman, a partir de datos de plataformas educativas y múltiples métricas de evaluación, que XGBoost es más efectivo que SVM y regresión logística, favoreciendo la identificación temprana de estudiantes en riesgo y el soporte a intervenciones pedagógicas. Asimismo, Y. Zoralioğlu et al. en [11] evidencia que la integración de XGBoost con técnicas de balanceo y selección de características (SMOTE y RFE) incrementa notablemente el rendimiento predictivo, alcanzando una exactitud del 97,2 % y un F1-score del 97,0 %. Finalmente, aunque desde un enfoque de árboles de decisión, [12]muestra que la optimización del procesamiento de datos mediante tecnologías Big Data mejora métricas clave como F1-score y AUC, reforzando la pertinencia de modelos basados en árboles para la predicción confiable del comportamiento y desempeño académico.

Los trabajos revisados evidencian el uso de modelos avanzados de aprendizaje automático para la predicción del rendimiento estudiantil y la personalización educativa: las GNN permiten modelar relaciones entre estudiantes y recursos, mejorando la precisión predictiva, la eficiencia y la adaptabilidad en sistemas de tutoría inteligente de acuerdo a S. Hakkal y A. Lahcen [13], mientras que los tutores inteligentes gamificados emplean modelos supervisados basados en la frecuencia de elementos cognitivos para ofrecer retroalimentación adaptativa e identificar riesgo académico mediante métricas estándar de desempeño [14]; de forma complementaria, T. Hayashida et al. en [15] proponen esquemas de clasificación multietapa que combinan distintos modelos de machine learning para abordar casos de desempeño fácilmente y difícilmente predecibles, facilitando la asignación de recursos personalizados en entornos educativos con IoT. En el contexto de tutores en línea y selección adaptativa de ejercicios, enfoques basados en XGBoost, como PDPBoost, muestran mejoras frente a métodos tradicionales y de deep learning, destacando por su rendimiento, interpretabilidad y eficiencia computacional [16], capacidades que también se reflejan en la predicción multidimensional del rendimiento y el análisis de importancia de variables para apoyar decisiones educativas reflejado en el estudio realizado por H. Cai et al. [17]; finalmente, la integración de XGBoost con técnicas de IA explicable como SHAP y modelos sustitutos refuerza la interpretabilidad y la confianza docente, permitiendo justificar predicciones clave, como la obtención de calificaciones altas, y favorecer intervenciones tempranas éticas y fundamentadas [18].

La investigación reciente en Sistemas de Tutoría Inteligente (ITS) y knowledge tracing se centra en modelos que permiten predecir el desempeño estudiantil, facilitar intervenciones tempranas y ofrecer diagnósticos interpretables. En este sentido, A. Sridhara et al. en [19] proponen un modelo basado en regresión y Deep Knowledge Tracing (DKT) para identificar estudiantes en riesgo y habilitar retroalimentación personalizada, logrando mejoras frente a enfoques previos con menor complejidad computacional, mientras que [20] presenta un enfoque secuencial interpretable (KIEDLKD) que integra interacción del conocimiento y memoria mediante redes recurrentes, mejorando métricas como AUC y precisión y aportando explicaciones útiles para la toma de decisiones pedagógicas. Este enfoque se alinea con el desarrollo de ITS basados en inteligencia artificial orientados a la personalización, el monitoreo continuo y la retroalimentación en tiempo real; al respecto, una revisión sistemática en educación en ingeniería realizada por B. Rodrigues et al. [21] reportan que los ITS apoyados en IA suelen mostrar mejoras cuando se evalúan con métricas predictivas, aunque persisten desafíos en integración pedagógica, escalabilidad y transparencia. Asimismo, M. Jhangiani y A. Agrawal [22] evidencian que los ITS con seguimiento paso a paso y retroalimentación inmediata superan a la enseñanza tradicional y subrayan la necesidad de integrar modelado del estudiante y machine learning para avanzar hacia una tutoría proactiva, ejemplificada en un modelo que estima la probabilidad de acierto por habilidad en razonamiento cuantitativo.

Los modelos de Machine Learning y Deep Learning en educación se enfocan en la personalización, la retroalimentación y la predicción del desempeño estudiantil para apoyar la toma de decisiones pedagógicas. En este marco, H. Sharma y H. Joshi [23] presentan un sistema de retroalimentación académica basado en una CNN 1D y un MLP optimizados con Firefly, que alcanza cerca del 99 % de exactitud, mientras que L. Cui [24] propone un tutor inteligente que combina deep learning y aprendizaje por refuerzo para adaptar recomendaciones según el progreso del estudiante. De manera complementaria, [25] y [26] examinan enfoques predictivos y de personalización mediante algoritmos clásicos y técnicas avanzadas como Deep Learning, RL y NLP, señalando desafíos relacionados con sesgos, privacidad y ética. A nivel institucional, B. K. Verma et al. [27] e I. Hasan et. al [28] evidencian que la integración de minería de datos, Machine Learning y sistemas de tutoría permite anticipar resultados académicos, identificar estudiantes en riesgo y reducir la deserción con precisiones superiores al 85

ISBN: 978-989-36481-2-4

%, lo que respalda la comparación de modelos para estimar la probabilidad de acierto en razonamiento cuantitativo y generar recomendaciones personalizadas a partir de métricas de la matriz de confusión.

Los avances recientes en Knowledge Tracing evidencian una transición desde la predicción secuencial del acierto hacia modelos que incorporan componentes metacognitivos, diagnósticos y adaptativos. En este sentido, MSKT integra habilidades metacognitivas en arquitecturas Transformer, mostrando mejoras en AUC y Accuracy y destacando que el desempeño depende tanto del conocimiento como del estilo de aprendizaje [29]. De forma complementaria, X. Sun et al. combinan DKVMN y XGBoost para estimar el desempeño inmediato y derivar una habilidad de aprendizaje dinámica basada en el comportamiento del estudiante [30], mientras que Y. Su et al. integran modelado cognitivo global y local con factores psicométricos y contextuales para mejorar la estimación de la probabilidad de acierto mediante enfoques de Machine Learning y Deep Learning [31]. Desde una perspectiva diagnóstica e interpretable, T. Huang et al. analizan modelos neurocognitivos con mecanismos de atención para evaluar el crecimiento longitudinal de habilidades [32], y Y. Su et al. proponen un modelo de diagnóstico cognitivo basado en grafos que explicita las relaciones entre estudiantes, ejercicios y conceptos, facilitando la adaptación a nuevos ítems y la visualización del progreso por habilidades [33]. Finalmente, en el ámbito de la adaptación pedagógica, J. Muangprathub et al. presentan marcos formales de diagnóstico y seguimiento para la recomendación de contenidos en ITS [34], mientras que P. Shashanka et al. desarrollan un sistema de tutoría inteligente que integra Reinforcement Learning y redes bayesianas en un ciclo de adaptación continua orientado a la detección temprana de dificultades [35].

III. Metodología

En esta sección se detalla el proceso experimental, desde el preprocesamiento de datos hasta la arquitectura de los modelos y la generación del mapa de evolución cognitiva. Se propone un sistema predictivo integrable a un tutor inteligente, evaluado por su capacidad para estimar con suficiente confiabilidad la probabilidad de éxito por habilidad.

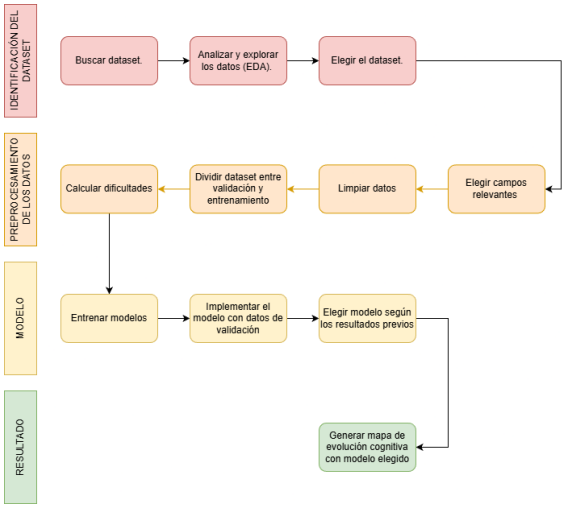


Figura 1. Diagrama metodológico del modelo.

A. *Selección y preparación del dataset*

Tras una revisión sistemática de data sets públicos (*EdNet, Junyi, Algebra y ASSISTments*), se seleccionó el conjunto de datos de **ASSISTments**. Los criterios de inclusión fueron: (i) volumen superior a 100,000 interacciones, (ii) relevancia directa con razonamiento cuantitativo y (iii) consistencia en el etiquetado de habilidades (*habilidades*).

El proceso de preparación de los datos inició con la selección de las variables más relevantes para el análisis, priorizando aquellas que aportaran información significativa sobre el comportamiento y desempeño de los estudiantes. Los campos seleccionados son *user_id*, *problem_id*, *correct* (refleja la efectividad de la respuesta), *ms_first_response_time*, *answer_type*, *order_id* y *list_skills*.

Posteriormente, se garantizó la calidad de los datos mediante un proceso de depuración que incluyó la eliminación de registros con valores nulos y el filtrado de problemas y estudiantes con menos de 10 respuestas o interacciones para mitigar el arranque en frío. También se descartaron tiempos de respuesta superiores al percentil 98 con el fin de evitar distorsiones por inactividad o errores de medición. Adicionalmente, se aplicó ingeniería de características excluyendo respuestas abiertas para asegurar la homogeneidad del conjunto de datos y transformando las habilidades en vectores categóricos.

La dificultad de los problemas se estimó mediante una combinación lineal de la proporción de errores y el tiempo promedio normalizado, asignando ponderaciones equitativas a ambos componentes, mientras que la dificultad de las habilidades se calculó siguiendo el mismo procedimiento, diferenciando entre ejercicios mono-habilidad y multi-habilidad. Finalmente, se modelaron las secuencias de ejercicios realizadas por cada estudiante, considerando únicamente interacciones a partir de la décima, y se generaron matrices que reflejan tanto la proporción de aciertos previos por habilidad como la presencia o ausencia de cada una en los ejercicios, permitiendo representar el desempeño acumulado de los estudiantes en función de sus competencias consolidadas y aquellas que requieren refuerzo.

Algoritmo 1. Cálculo de dificultad de ejercicios y habilidades

Require: Conjunto de registros D, ejercicios E, estudiantes S, problemas P, skills H

Fórmula: Dificultad = promedio [tiempo de respuesta estandarizado (0,1), proporción de errores]

```
Selección de columnas importantes o trascendentes
for registro □ D do
    if registro.list_skills = NULL or registro.ms_first_response_time = NULL then eliminar registro
    if registro.answer_type = "open response" then eliminar registro
for ejercicio □ E do
    if conteo(estudiantes(ejercicio)) < 10 then eliminar ejercicio
for estudiante □ S do
    if conteo(ejercicios(estudiante)) < 10 then eliminar estudiante
Filtrar los valores de ms_first_response_time sobre el percentil 98
 for problema □ P do
    Calcular la dificultad del problema
for skill □ H do
    if skill contiene ejercicios monoskill then calcular dificultad con ejercicios monoskill
    else calcular dificultad con ejercicios multiskill
for registro □ D do
    if secuencia(estudiante□) < 11 then eliminar registro
    else if secuencia(estudiante□) ≥ 11 then
        for registro′ □ D where estudiante = estudiante□ and secuencia′ > secuencia do
            calcular proporción de éxitos por skill
return: Matriz de dificultades con proporción previa de éxitos
```

B. *Arquitecturas de modelado y entrenamiento.*

Con el fin de seleccionar el modelo más adecuado, el conjunto de datos se dividió en un 70% para entrenamiento y prue-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

ba y un 30% para validación, entrenando diversos modelos de aprendizaje profundo y de aprendizaje automático tradicional para predecir el éxito o fracaso de un estudiante en una *habilidad*, considerando su historial de desempeño y la dificultad de cada *habilidad* y ejercicio. Cada modelo estimó la probabilidad de éxito por *habilidad* y, para cada ejercicio, se normalizaron las dificultades asociadas y se calculó una probabilidad global de éxito mediante el producto punto entre el vector de dificultades y las probabilidades estimadas. La evaluación se realizó utilizando métricas derivadas de la matriz de confusión, en particular los porcentajes de falsos positivos sobre negativos reales y de falsos negativos sobre positivos reales. Experimentalmente se exploraron dos enfoques complementarios: modelos de *Deep Learning* basados en arquitecturas Multilayer Perceptron (MLP), variando profundidad y número de neuronas. Por otro lado, se analizaron modelos clásicos de *Machine Learning*, específicamente XGBoost y Random Forest, en ambos casos con optimización de hiperparámetros mediante GridSearchCV para maximizar el rendimiento predictivo.

TABLA III. CONFIGURACIÓN UTILIZADAS PARA LOS DISTINTOS ENTRENAMIENTOS DE MODELOS DE DEEP LEARNING.

Tipo de modelo	**Modelo**	**Capas**	**Proporción de falsos negativos**	**Proporción de falsos positivos**
Deep Learning	MLP	50	29,54	29,28
Deep Learning	MLP	100	29,52	25,85
Deep Learning	MLP	50 25	29,49	29,60
Deep Learning	MLP	100 50	30,68	30,21
Deep Learning	MLP	100 50 25	31,08	29,96
Deep Learning	MLP	200 100 50	31,38	30,88
Deep Learning	MLP	200 100	30,99	30,85
Deep Learning	MLP	512 256 128	27,58	28,80
Deep Learning	MLP	1024 512 256	27,54	30,21
Deep Learning	MLP	512 256 128 64	24,18	36,79
Deep Learning	MLP	1024 512 256 128	32,85	29,26

TABLA IV. CONFIGURACIÓN UTILIZADAS PARA LOS DISTINTOS ENTRENAMIENTOS DE MODELOS DE MACHINE LEARNING.

Tipo de modelo	**Modelo**	**Hiperparámetros seleccionados**	**Proporción de falsos negativos**	**Proporción de falsos positivos**
Machine Learning	XGBoost	colsample_bytree: 1.0 gamma: 0 learning_rate: 0.1 max_depth: 7 min_child_weight: 1 n_estimators: 300 subsample: 1	24,33	25,59
Machine Learning	Random Forest	max_depth: None max_features: sqrt min_samples_leaf: 1 min_samples_split: 10 n_estimators: 300	29,59	26,97

Tras el análisis comparativo, XGBoost fue seleccionado como el modelo predictivo a utilizar. Este modelo demostró una estabilidad superior, menor riesgo de sobreajuste (*overfitting*) y el mejor equilibrio en la reducción simultánea de las tasas de falsos positivos y negativos (FPR y FNR) dentro del conjunto de modelos evaluados.

C. *Mapa de evolución cognitiva*

Se desarrolló un sistema de visualización denominado Mapa de Evolución Cognitiva para representar el progreso del estudiante en las habilidades evaluadas. Este mecanismo permite identificar tendencias de aprendizaje, fortalezas y áreas de refuerzo a partir del comportamiento histórico y las predicciones del modelo seleccionado.

La construcción del mapa inició con el cálculo de la dificultad de problemas y habilidades del data-set, seguido por el preprocesamiento. Luego, se consolidó el historial de cada estudiante mediante la proporción de aciertos, con un mínimo de diez interacciones para asegurar la validez del análisis. Sobre esta base, se implementó el modelo XGBoost optimizado para estimar la probabilidad de éxito por competencia y actualizarla cada cinco ejercicios. Finalmente, el mapa representa gráficamente el progreso por habilidad, permitiendo observar el desarrollo, la consolidación de competencias y las fluctuaciones del aprendizaje.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

Con el fin de validar la eficacia del modelo y su capacidad para reflejar la evolución cognitiva, se aplicó una prueba a dos perfiles estudiantiles, analizando habilidades con niveles de dominio alto, intermedio y bajo. A partir de ello se generaron mapas de calor de predicciones que muestran la evolución temporal de la probabilidad de éxito, donde el eje vertical corresponde a las habilidades y el eje horizontal a intervalos de cinco ejercicios, utilizando una escala cromática en la que los tonos verdes indican alta probabilidad de dominio y los rojizos dificultades persistentes.

El modelo podría integrarse en una arquitectura de tres capas (datos, inferencia y presentación) con un panel docente para visualizar probabilidades de éxito, mapas de evolución cognitiva y alertas pedagógicas. Esto facilitaría la identificación temprana de habilidades críticas y la planificación de refuerzos focalizados.

1) *Estudiante 96274:*

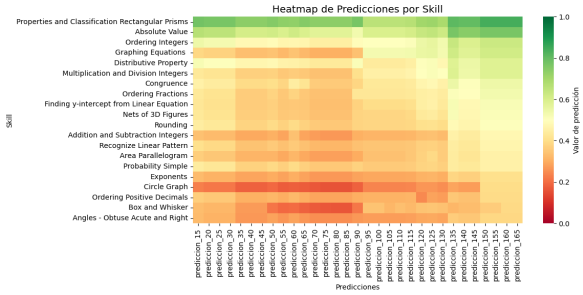


Figura 2. Mapa de evolución cognitiva para las 20 habilidades con mayor nivel de dominio para el estudiante con id 96274.

Dominio Superior: El mapa de la figura 2 revela una tendencia ascendente en las probabilidades de éxito. La evolución de tonalidades amarillas hacia verdes sugiere un aprendizaje progresivo y una consolidación de conceptos, manteniendo un dominio estable y cercano al umbral máximo.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

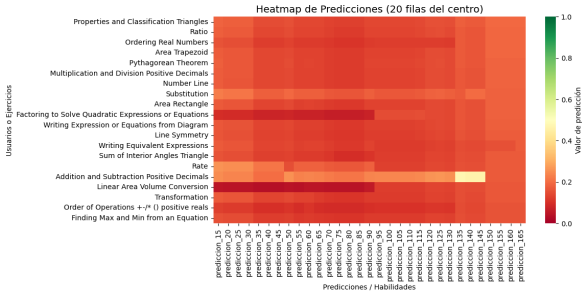


Figura 3. Mapa de evolución cognitiva para las 20 habilidades intermedias en nivel de dominio para el estudiante con id 96274.

Dominio Intermedio: En la figura 3, se observan valores de probabilidad variables sin una tendencia uniforme. Este comportamiento se interpreta como una fase de transición cognitiva.

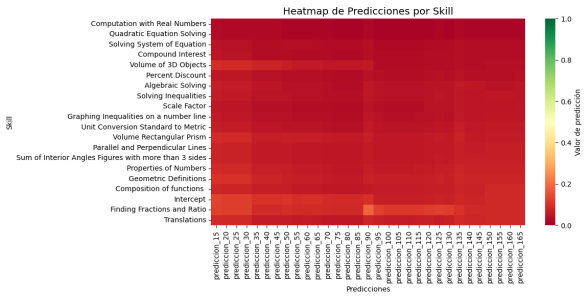


Figura 4. Mapa de evolución cognitiva para las 20 habilidades con menor nivel de dominio para el estudiante con id 96274.

Dominio Crítico: Estos resultados señalan áreas críticas de intervención que requieren estrategias de refuerzo para superar barreras en conceptos procedimentales.

2) Estudiante 78920

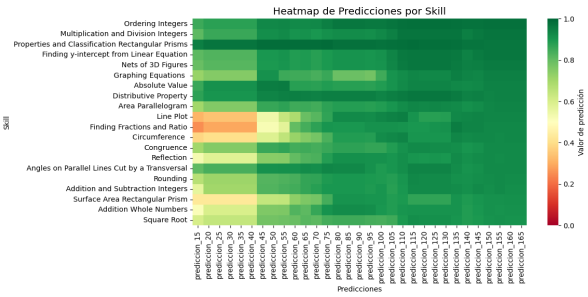


Figura 5. Mapa de evolución cognitiva para las 20 habilidades con mayor nivel de dominio para el estudiante con id 78920.

Dominio Superior: En el mapa de la figura 5 se observa una zona predominantemente verde que refleja un nivel de dominio avanzado y una capacidad de transferencia efectiva del conocimiento hacia nuevos ejercicios.

Dominio Intermedio: La figura 6 presenta una paleta heterogénea con oscilaciones vinculadas posiblemente a la variabilidad en la dificultad de los ítems. No obstante, el patrón indica una mejora gradual de las habilidades.

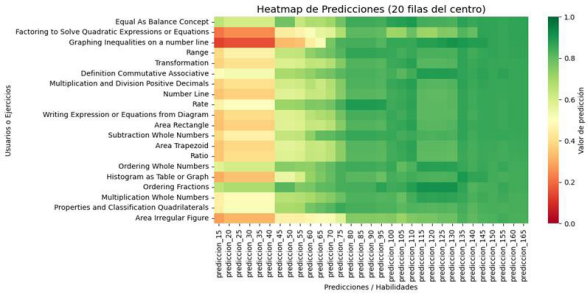


Figura 6. Mapa de evolución cognitiva para las 20 habilidades intermedias en nivel de dominio para el estudiante con id 78920.

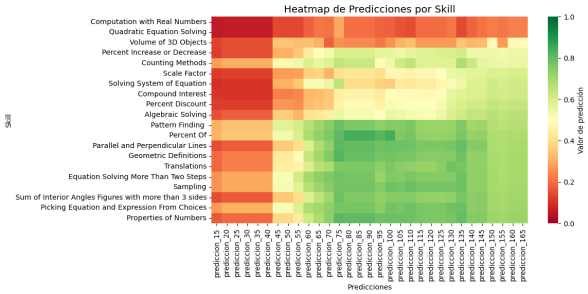


Figura 7. Mapa de evolución cognitiva para las 20 habilidades con menor nivel de dominio para el estudiante con id 78920.

Dominio Crítico: Aunque revela un predominio de tonos rojos y anaranjados, se aprecian indicios de avance hacia tonalidades más claras en etapas avanzadas, sugiriendo un esfuerzo del aprendiz por mitigar las dificultades iniciales.

V. Conclusiones

La investigación confirma la viabilidad de aplicar técnicas de *Machine Learning* y *Deep Learning* para predecir el desempeño en razonamiento cuantitativo. Los resultados muestran que XGBoost optimizado logra el mejor equilibrio entre precisión, estabilidad y capacidad de generalización en el dataset evaluado, además de mayor robustez que los MLP analizados. La comparación con otras arquitecturas, como LSTM o Transformers, queda como trabajo futuro.

El modelo propuesto redujo significativamente los FPR y FNR y mostró un desempeño consistente ante variaciones en la dificultad de los ejercicios, lo que respalda el uso de algoritmos de boosting en sistemas de tutoría inteligente para entornos de aprendizaje dinámicos

Los mapas de evolución cognitiva fortalecen la analítica del aprendizaje al facilitar la interpretación del progreso individual, la identificación de patrones de consolidación y la detección temprana de dificultades persistentes. Al traducir probabilidades en representaciones gráficas, apoyan decisiones pedagógicas oportunas y personalizadas.

En una fase posterior, será necesario validar el modelo con datasets de otros países, regiones o contextos culturales para examinar la transferibilidad de los hallazgos y fortalecer la validez externa del artefacto propuesto.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Referencias Bibliográfica

[1] «¿Los estudiantes en Colombia temen a las matemáticas? | EL ESPECTADOR». Accedido: 16 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.elespectador.com/educacion/los-estudiantes-en-colombia-temen-a-las-matematicas/

[2] «DANE - Educación formal». Accedido: 16 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/educacion/poblacion-escolarizada/educacion-formal

[3] Instituto Colombiano para la Evaluación de la Educación (Icfes), «Informe nacional de resultados Saber Pro y Saber TyT 2022», Bogotá, Colombia: Icfes, 2023.

[4] «Pruebas PISA 2022: Colombia, un sistema educativo resiliente que requiere cambios estructurales para mejorar su calidad - Pruebas PISA 2022: Colombia, un sistema educativo resiliente que requiere cambios estructurales para mejorar su calidad», Portal MEN - Presentación. Accedido: 16 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.mineducacion.gov.co/1780/w3-article-417751.html

[5] «Universidad de Antioquia». Accedido: 16 de marzo de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/institucional/data-udea/formacion/eleccion-programa-academico

[6] «Información Poblacional - SNIES». Accedido: 5 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: https://hecaa.mineducacion.gov.co/consultaspublicas/content/poblacional/index.jsf

[7] L. Ying, «Application of Xgboost algorithm in Prediction of Students Grades Performance», en *2021 IEEE International Conference on Computer Science, Electronic Information Engineering and Intelligent Control Technology (CEI)*, sep. 2021, pp. 93-96. doi: 10.1109/CEI52496.2021.9574453.

[8] G. Li y H. Zhou, «Modeling and Estimation Methods for Student Achievement Recognition Based on XGBoost Algorithm», en *2023 International Conference on Evolutionary Algorithms and Soft Computing Techniques (EASCT)*, oct. 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/EASCT59475.2023.10392502.

[9] S. Hakkal y A. A. Lahcen, «XGBoost To Enhance Learner Performance Prediction», *Comput. Educ. Artif. Intell.*, vol. 7, p. 100254, dic. 2024, doi: 10.1016/j.caeai.2024.100254.

[10] S. Sinha, O. P. Singh, H. Baruah, y U. Biswas, «XGBoost for Novel Predictive Model to Classify Student Performance Based on Academic Metrics», en *2024 IEEE Silchar Subsection Conference (SILCON 2024)*, nov. 2024, pp. 1-6. doi: 10.1109/SILCON63976.2024.10910908.

[11] Y. Zoralioğlu, M. F. Gül, F. Azizoğlu, G. Azizoğlu, y A. N. Toprak, «Predicting Academic Performance of Students Using Machine Learning Techniques», en *2023 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU)*, oct. 2023, pp. 1-6. doi: 10.1109/ASYU58738.2023.10296648.

[12] J. Jin, «Research and construction of student management platform for special needs students with decision tree model and big data technology», *Syst. Soft Comput.*, vol. 7, p. 200310, dic. 2025, doi: 10.1016/j.sasc.2025.200310.

[13] S. Hakkal y A. A. Lahcen, «Leveraging graph neural network for learner performance prediction», *Expert Syst. Appl.*, vol. 293, p. 128724, dic. 2025, doi: 10.1016/j.eswa.2025.128724.

[14] Z. Cen, L. Zheng, y Z. Zhan, «Design and Performance Validation of a Computational Thinking Gamified Intelligent Tutoring System Focusing on Thinking Process», en *2025 14th International Conference on Educational and Information Technology (ICEIT)*, mar. 2025, pp. 181-187. doi: 10.1109/ICEIT64364.2025.10975898.

[15] T. Hayashida, S. Wakitani, K. Tsutsumi, T. Kinoshita, I. Nishizaki, y S. Sekizaki, «WIP: Machine Learning Models for Predicting Student Performance in IoT-Enhanced Education», en *2024 IEEE Frontiers in Education Conference (FIE)*, oct. 2024, pp. 1-5. doi: 10.1109/FIE61694.2024.10893420.

[16] Z. Wang, Z. Liang, S. Kong, Y. Yan, B. Dai, y L. Wang, «PDPBoost: An XGBoost-Based Method for Predicting Programming Problem Difficulty», en *2025 10th International Conference on Computer and Communication System (ICCCS)*, abr. 2025, pp. 239-243. doi: 10.1109/ICCCS65393.2025.11069556.

[17] H. Cai, X. Chen, Y. Zhao, y H. Chen, «Multi-Dimensional Prediction of Student Learning Performance and Feature Importance Analysis Based on XGBoost Algorithm», en *2025 10th International Conference on Cloud Computing and Big Data Analytics (ICCCBDA)*, abr. 2025, pp. 41-45. doi: 10.1109/ICCCBDA64898.2025.11030420.

[18] A. Alnoman, «Explainable AI for Smart Education: A Case Study on Student Performance Prediction», en *2025 International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)*, oct. 2025, pp. 1-6. doi: 10.1109/INISTA68122.2025.11249657.

[19] A. Sridhara, N. Falkner, y T. Atapattu, «Leveraging Inference: A Regression-Based Learner Performance Prediction System for Knowledge Tracing», *IEEE Access*, vol. 11, pp. 123458-123475, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3329571.

[20] W. Gan, Y. Sun, y Y. Sun, «Knowledge interaction enhanced sequential modeling for interpretable learner knowledge diagnosis in intelligent tutoring systems», *Neurocomputing*, vol. 488, pp. 36-53, jun. 2022, doi: 10.1016/j.neucom.2022.02.080.

[21] B. Rodrigues, R. Pinto, y G. Gonçalves, «A Systematic Literature Review of AI-Driven Intelligent Tutoring Systems in Engineering Education: Emphasizing Personalization, Feedback, and Student Monitoring», *IEEE Access*, vol. 13, pp. 190152-190177, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3626473.

[22] M. Jhangiani y A. Agrawal, «Comparative Performance Analysis of Different Intelligent Tutoring (ITS) Systems in various domain», en *2023 International Conference on Innovative Computing, Intelligent Communication and Smart Electrical Systems (ICSES)*, dic. 2023, pp. 1-5. doi: 10.1109/ICSES60034.2023.10465370.

[23] H. Sharma y H. Joshi, «Enhancing Academic Feedback Systems with Deep Learning and Ensemble Methods», en *2025 First International Conference on Advances in Computer Science, Electrical, Electronics, and Communication Technologies (CE2CT)*, feb. 2025, pp. 50-57. doi: 10.1109/CE2CT64011.2025.10939665.

[24] L. Cui, «Research of Intelligent Tutoring System Based on Deep Learning Computer Technology», en *2023 International Conference on Applied Intelligence and Sustainable Computing (ICAISC)*, jun. 2023, pp. 1-7. doi: 10.1109/ICAISC58445.2023.10199414.

[25] Taufikin, Supa'At, M. Sharma, A. Chinmulgund, J. Kuanr, y G. Fatma, «The Future of Teaching: Exploring the Integration of Machine Learning in Higher Education», en *2024 International Conference on Knowledge Engineering and Communication Systems (ICKECS)*, abr. 2024, pp. 1-6. doi: 10.1109/ICKECS61492.2024.10616421.

[26] B. Rawat, Y. Joshi, y N. S. Bisht, «Investigating the Impact of Machine Learning in Personalized Education Systems», en *2024 First International Conference on Technological Innovations and Advance Computing (TIACOMP)*, jun. 2024, pp. 221-227. doi: 10.1109/TIACOMP64125.2024.00045.

[27] B. K. Verma, N. Srivastava, y A. K. Bharti, «Towards Smart Education Systems: A Hybrid Data Mining and Machine Learning Approach to Predicting Academic Outcomes», en *2025 International Conference on Technology Enabled Economic Changes (InTech)*, feb. 2025, pp. 895-900. doi: 10.1109/InTech64186.2025.11198559.

[28] I. Hasan, A. A. Ahhad, A. Sabari, S. M. R. Islam, M. T. Ehsan, y M. H. Rahman, «Revolutionizing Education with Machine Learning: Personalized Learning, Tutoring Systems, and Analytics Unveiled», en *2025 International Conference on Electrical, Computer and Communication Engineering (ECCE)*, feb. 2025, pp. 1-6. doi: 10.1109/ECCE64574.2025.11013048.

[29] J. Yin, J. Qiao, H. Xu, T.-T. Goh, y Y. Hu, «Metacognitive skills driven knowledge tracing», *Expert Syst. Appl.*, vol. 297, p. 129229, feb. 2026, doi: 10.1016/j.eswa.2025.129229.

[30] X. Sun, X. Zhao, B. Li, Y. Ma, R. Sutcliffe, y J. Feng, «Dynamic Key-Value Memory Networks With Rich Features for Knowledge Tracing», *IEEE Trans. Cybern.*, vol. 52, n.º 8, pp. 8239-8245, ago. 2022, doi: 10.1109/TCYB.2021.3051028.

[31] Y. Su *et al.*, «Global and local neural cognitive modeling for student performance prediction», *Expert Syst. Appl.*, vol. 237, p. 121637, mar. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.121637.

[32] T. Huang, J. Geng, H. Yang, S. Hu, Y. Chen, y J. Zhang, «Long short-term attentional neuro-cognitive diagnostic model for skill growth assessment in intelligent tutoring systems», *Expert Syst. Appl.*, vol. 238, p. 122048, mar. 2024, doi: 10.1016/j.eswa.2023.122048.

[33] Y. Su *et al.*, «Graph-based cognitive diagnosis for intelligent tutoring systems», *Knowl.-Based Syst.*, vol. 253, p. 109547, oct. 2022, doi: 10.1016/j.knosys.2022.109547.

[34] J. Muangprathub, V. Boonjing, y K. Chamnongthai, «Learning recommendation with formal concept analysis for intelligent tutoring system», *Heliyon*, vol. 6, n.º 10, p. e05227, oct. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05227.

[35] P. Shashanka, G. Srishanth, G. Anitha, G. H. Vardhan, y G. M. Krishna, «Smart Tutoring and Adaptive Learning - Leveraging AI to Personalize Education in Real-Time: A Model for Engaging, Individualized, and Effective Learning Experiences», en *2025 8th International Conference on Circuit, Power & Computing Technologies (ICCPCT)*, ago. 2025, pp. 630-635. doi: 10.1109/ICCPCT65132.2025.11176528.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Integração de Funcionalidades de Otimização e Previsão de Demandas em Sistemas de Apoio à Decisão para a Gestão da Atenção Primária à Saúde no SUS do Brasil

Integration of Optimization and Demand Forecasting Functionalities into Decision Support Systems for the Management of Primary Health Care in Brazil's Unified Health System (SUS)

Dimas Cassimiro Nascimento, Daliton da Silva, Igor Medeiros Vanderlei, Luis Filipe Alves Pereira
Universidade Federal do Agreste de Pernambuco
Garanhuns – Pernambuco, Brasil
{dimas.cassimiro,daliton.silva,igor.vanderlei, luis-filipe.pereira}@ufape.edu.br

Rian Gabriel Santos Pinheiro
Universidade Federal de Alagoas
Maceió – Alagoas, Brasil
rian@ic.ufal.br

***Resumo* — A gestão eficiente da Atenção Primária à Saúde (APS) no âmbito do sistema público brasileiro requer a integração de múltiplas dimensões analíticas, incluindo localização de unidades, previsão de demanda, alocação de profissionais e avaliação da eficiência operacional. Este artigo propõe uma abordagem unificada que combina funcionalidades de uma ferramenta computacional capaz de integrar: análise de indicadores de eficiência, sugestão de localização e realocação de unidades, previsão de demandas e otimização da alocação de profissionais. Por meio da definição de três *workflows* de alto nível, o trabalho estrutura sequências operacionais estratégicas, formaliza o fluxo de dados entre módulos e apresenta algoritmos de integração. Os *workflows* contemplam: (i) expansão da rede baseada em demanda prevista, (ii) otimização com realocação de recursos e (iii) planejamento de contratação orientado por demanda futura. A integração sistemática dessas funcionalidades permite transformar decisões isoladas em ciclos contínuos de planejamento, promovendo ganhos consistentes de eficiência operacional, melhor distribuição de recursos e maior capacidade de antecipação de demandas. Conclui-se que a abordagem proposta fornece um arcabouço metodológico robusto para apoiar gestores na tomada de decisão, contribuindo para uma gestão mais proativa, equitativa e orientada por dados na APS..**

***Palavras Chave* - Sistemas de Apoio à Decisão; Atenção Primária à Saúde; Otimização; Previsão de Demanda; Sistema Único de Saúde (SUS)**

***Abstract* — Efficient management of Primary Healthcare (PHC) within the Brazilian public health system requires the integration of multiple analytical dimensions, including facility location, demand forecasting, workforce allocation, and operational efficiency assessment. This paper proposes a unified approach that combines functionalities of a computational tool capable of integrating: efficiency indicator analysis, facility location and relocation suggestions, demand forecasting, and workforce allocation optimization. Through the definition of three high-level workflows, the study structures strategic operational sequences, formalizes data flow across modules, and presents integration algorithms. The workflows address: (i) network expansion based on forecasted demand, (ii) optimization with resource reallocation, and (iii) hiring planning driven by future demand. The systematic integration of these functionalities enables the transformation of isolated decisions into continuous planning cycles, promoting consistent gains in operational efficiency, improved resource distribution, and enhanced capacity to anticipate demand. We conclude that the proposed approach provides a robust methodological framework to support decision-making, contributing to more proactive, equitable, and data-driven management in PHC.**

Keywords - Decision Support Systems; Primary Health Care; Optimization; Demand Forecasting; Brazilian Unified Health System.

I. Introdução

Este A Atenção Primária à Saúde (APS) é a porta de entrada preferencial e o centro de comunicação do Sistema Único de Saúde (SUS), responsável por coordenar o cuidado e resolver até 85% das demandas de saúde da população [1]. No entanto, sua efetividade é frequentemente comprometida por desafios de gestão, como a distribuição desigual de unidades de saúde, a alocação inadequada de profissionais e a dificuldade em antecipar variações de demanda [2]. Estes problemas são particularmente agudos no contexto brasileiro, onde desigualdades regionais e socioeconômicas impõem barreiras adicionais à

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

prestação equitativa de serviços de saúde.

Ferramentas computacionais de apoio à decisão têm surgido para mitigar esses problemas, abordando questões específicas de forma isolada. Os trabalhos [3,4] focam na otimização da localização de unidades de saúde, enquanto outros desenvolvem modelos de previsão de séries temporais para antecipar demandas [5,6]. Por outro lado, outros propõem abordagens [7,8] para dimensionamento e alocação da força de trabalho. Embora valiosas individualmente, a aplicação desconexa dessas soluções limita seu potencial estratégico. A sinergia entre essas funcionalidades, onde a saída de um módulo informa e otimiza a entrada de outro, tem o potencial de gerar um ciclo virtuoso de planejamento e gestão, potencializando impactos positivos na eficiência e equidade do sistema.

A ferramenta computacional base, apresentada em trabalhos anteriores [9], integra essas funcionalidades de forma modular. Este artigo propõe uma integração sistemática das seguintes funcionalidades: (i) *análise de indicadores de eficiência*, que avalia o desempenho de municípios e Unidades Básicas de Saúde (UBS) com base em métricas como produção, cobertura e razão oferta/demanda; (ii) *otimização espacial*, que sugere locais para abertura de novas UBS ou realocação das existentes considerando fatores socioeconômicos e de acessibilidade geográfica; (iii) *previsão de demanda*, que projeta atendimentos futuros por tipo de serviço e unidade utilizando modelos de séries temporais; e (iv) *otimização da alocação de profissionais*, que distribui a força de trabalho entre UBS para maximizar a capacidade de atendimento e minimizar sobrecargas.

Neste contexto, são propostos três *workflows* operacionais distintos que combinam essas funcionalidades em sequências lógicas, visando a objetivos estratégicos específicos. Para cada *workflow*, são apresentados: uma descrição conceitual e seus potenciais impactos; um modelo formal do fluxo de dados, com definições matemáticas para as transformações entre etapas; um algoritmo que operacionaliza o processo; e exemplos baseados em cenários reais de aplicação.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte forma: a Seção 2 apresenta trabalhos relacionados que contextualizam esta proposta. A Seção 3 formaliza as funcionalidades base a serem integradas pelos *workflows* propostos. A Seção 4 detalha os três *workflows* propostos e discute os desafios práticos relacionados aos *workflows* propostos. Por fim, a Seção 5 conclui o trabalho e aponta direções futuras.

II. Trabalhos relacionados

A integração de sistemas de apoio à decisão na gestão de saúde pública tem sido objeto de crescente atenção na literatura, destacando a importância de abordagens sistêmicas e de modelagem por simulação que considerem a complexidade e as múltiplas dimensões da gestão em saúde, incluindo planejamento de capacidade e alocação de recursos. De forma complementar, revisões amplas sobre o uso da Pesquisa Operacional em saúde evidenciam o papel central da combinação de métodos analíticos para apoiar decisões estratégicas e operacionais [10].

No contexto específico da Atenção Primária à Saúde (APS), pesquisas recentes indicam que a articulação entre técnicas analíticas distintas pode contribuir significativamente para a melhoria da eficiência operacional e do planejamento de serviços. Revisões sistemáticas sobre projeção e planejamento da força de trabalho em saúde ressaltam tanto a diversidade de métodos empregados quanto a necessidade de maior integração entre modelos preditivos, analíticos e de otimização [11,12]. Esses desafios são particularmente relevantes em sistemas públicos de saúde, como o brasileiro, marcados por heterogeneidades regionais e limitações estruturais.

Aplicações específicas de otimização espacial no contexto da saúde pública incluem um estudo [13], que foca em maximizar a equidade na acessibilidade, e outro [14], que aborda a localização de unidades de saúde preventiva. Por sua vez, a previsão de demanda em serviços de saúde também tem sido amplamente investigada, sobretudo como instrumento de apoio ao planejamento de médio e longo prazo. Trabalhos recentes utilizam projeções baseadas em séries temporais e modelos econométricos para antecipar necessidades futuras do SUS, explorando o uso de ferramentas digitais e serviços analíticos integrados no contexto da APS [5,15]. Em âmbito internacional, modelos de previsão combinados com análise de lacunas entre oferta e demanda têm sido aplicados para apoiar o planejamento de sistemas de saúde em larga escala [16].

No que se refere à alocação de profissionais de saúde, a literatura inclui contribuições relevantes que propõem modelos matemáticos e de otimização para uma distribuição mais equitativa e eficiente da força de trabalho. Abordagens baseadas em problemas de satisfação de restrições [8] demonstram a viabilidade de soluções heurísticas para problemas complexos de alocação em serviços cooperativos de saúde. Ainda assim, observa-se que a maioria dos estudos concentra-se em funcionalidades isoladas, como previsão de demanda, alocação de recursos ou avaliação de desempenho, ou em combinações apenas parciais dessas abordagens.

O presente artigo diferencia-se dessa literatura ao propor uma estrutura integrada completa que combina quatro funcionalidades analíticas fundamentais por meio de *workflows* operacionais bem definidos. Enquanto a maior parte dos trabalhos existentes foca em problemas específicos, a abordagem aqui apresentada oferece um arcabouço metodológico abrangente para apoiar gestores na implementação de ciclos completos de planejamento, execução e avaliação na APS.

III. Definição formal das funcionalidades

Nesta seção, é proposta uma formalização matemática das quatro funcionalidades que serão integradas pelos *workflows* propostos. É importante notar que, embora apresentadas separadamente, a integração entre elas requer atenção especial às interfaces e transformações de dados entre módulos, conforme será detalhado na Seção 4.

A. Análise de Indicadores de Eficiência (IE)

Seja $U = \{u_1, u_2, ..., u_m\}$ o conjunto de Unidades Básicas de Saúde (UBS) e $M = \{m_1, m_2, ..., m_n\}$ o conjunto de municípios. Para cada unidade u_i, coletamos um vetor de k métricas no tempo $t: \mathbf{x}_{i,t} = \left(x_{i,t}^1, x_{i,t}^2, ..., x_{i,t}^k\right)$. O módulo de IE calcula um escore composto de eficiência $E_{i,t}$:

$E_{i,t} = f\left(\mathbf{x}_{i,t}; \mathbf{w}\right) = \sum_{j=1}^{k} w_j \cdot \dot{x}_{i,t}^j$ tal que w_j são pesos normalizados,

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

com $\sum w_j = 1$, e $\tilde{x}_i$ representam valores normalizados, por exemplo, min-max ou z-score. Exemplos de métricas incluem: número de atendimentos por profissional, taxa de cobertura populacional e Margem de Capacidade de Atendimento (MCA).

Este módulo serve como mecanismo de diagnóstico inicial nos *workflows*, identificando unidades que requerem atenção prioritária. Os escores gerados são utilizados para parametrizar decisões nos módulos subsequentes, como a definição de pesos para otimização espacial ou a priorização de unidades para realocação de profissionais.

B. Otimização Espacial (OE)

Dado o conjunto de pontos de demanda L, o conjunto de unidades existentes $F_f = U$ e o conjunto de locais candidatos $F_n = C$, definimos o conjunto total de instalações como $F = F_f \cup F_n$. O problema de localização-alocação [17], com restrição de capacidade e limite no número de novas unidades, é formulado como:

$$\textbf{Minimizar} \quad \sum_{i \in L} \sum_{j \in F} w_i d_{ij} x_{ij}$$

$$\textbf{sujeito a:}$$

$$\sum_{j \in F} x_{ij} = 1, \forall i \in L$$

$$\sum_{j \in F_n} y_j = p x_{ij} \leq y_j, \forall i \in L, j \in F_n$$

$$\sum_{i \in L} D_i x_{ij} \leq Cap_j, \forall\, j \in F_f$$

$$\sum_{i \in L} D_i x_{ij} \leq y_j Cap_j, \forall j \in F_n$$

A Função Objetivo minimiza a distância ponderada d_{ij} entre cada ponto de demanda $i \in L$ e a unidade de saúde $j \in F$ à qual ele é alocado. A integração deste módulo com os demais ocorre principalmente por meio dos parâmetros de entrada: as demandas $demanda_i$ podem ser obtidas do módulo de Previsão de Demanda, enquanto os pesos w_i podem ser derivados dos indicadores de eficiência ou de índices de vulnerabilidade socioeconômica.

C. Previsão de Demanda (PD)

Para uma série temporal de atendimentos $\{y_1, y_2, ..., y_T\}$ de uma UBS ou município, o módulo de PD [5,18] gera previsões para H passos à frente. Utilizamos a abordagem MIMO, do inglês *Multiple-Input Multiple-Output*, com uma rede neural recorrente, como RNN ou GRU:, $\left[\hat{y}_{T+1}, \hat{y}_{T+2}, ..., \hat{y}_{T+H}\right] = Modelo_\theta\left(y_{T-l+1}, ..., y_T\right)$ tal que l é o tamanho da janela de observação e θ são os parâmetros do modelo treinado. A função de perda pode ser ponderada para privilegiar horizontes de curto ou longo prazo.

A saída é um vetor de demandas previstas $\hat{\mathbf{d}} = \left[\hat{d}_1, ..., \hat{d}_H\right]$ para cada unidade e tipo de atendimento. É importante notar que estas previsões podem ser agregadas espacialmente, para alimentar o módulo OE, ou por categoria profissional, para alimentar o módulo OAP.

D. Otimização da Alocação de Profissionais (OAP)

Dado um conjunto de profissionais P, particionados por categoria k, e um conjunto de UBS U, o modelo MAX-MCA [7,19] busca maximizar a menor margem de capacidade de atendimento entre todas as unidades para cada categoria. A formulação matemática é:

$$\textbf{Maximizar } MCA_k$$

$$\textbf{sujeito a:}$$

$$\sum_{j \in U} x_{ij} = 1, \forall i \in P_k$$

$$MCA_k \leq \sum_{i \in P_k} \left(s_i \cdot x_{ij}\right) - dr_{j,k}, \forall j \in U$$

$$x_{ij} \in \{0, 1\}$$

, onde $x_{ij} = 1$ se o profissional i é alocado à UBS j, s_i é sua oferta mensal, e $dr_{j,k}$ é a demanda esperada da UBS j para a categoria k. A saída é uma matriz de alocação $X^* = \left[x_{ij}\right]$ que redefine qual profissional trabalha em qual UBS. As restrições garantem que cada profissional será alocado exatamente a uma UBS e que a margem de capacidade de atendimento será limitada pela diferença entre a oferta alocada e a demanda esperada em cada unidade.

IV. Workflows Propostos

Com base nas funcionalidades descritas na Seção III, propomos três workflows estratégicos para gestores do SUS.

A. Workflow 1: Expansão da Rede com Base em Demanda Prevista

O *Workflow* 1 tem como objetivo planejar a expansão da rede de UBS através da abertura de novas unidades em locais que atendam a futuros crescimentos de demanda e vulnerabilidades socioeconômicas. O processo combina previsão de demanda com otimização espacial para identificar áreas prioritárias para investimento em infraestrutura de saúde.

O *Workflow* 1 segue uma sequência lógica onde os dados são transformados progressivamente. Inicialmente, o módulo de previsão de demanda processa dados históricos para gerar projeções futuras. Estas projeções são então combinadas com indicadores socioeconômicos para criar pesos que refletem tanto a necessidade futura quanto a vulnerabilidade atual. Estes pesos alimentam o módulo de otimização espacial, que identifica os locais ótimos para novas unidades. Finalmente, o impacto da expansão pode ser avaliado através do módulo de indicadores de eficiência, fechando o ciclo de planejamento.

Exemplo 1. Um exemplo prático do *Workflow 1* ocorre em um município de porte médio que apresenta crescimento populacional acelerado, impulsionado pela expansão habitacional em áreas periféricas. A aplicação do módulo de Previsão de Demanda (PD), utilizando dados históricos de atendimentos e projeções demográficas do IBGE, indica um aumento acumulado superior a 30% na demanda por consultas médicas e de enfermagem nos próximos cinco anos em três bairros periféricos caracterizados por baixo Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) e alta vulnerabilidade social.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Ao integrar essas projeções com indicadores socioeconômicos no módulo de Otimização Espacial (OE), o *workflow* atribui maior peso a essas regiões, identificando-as como áreas críticas para expansão da rede. Como resultado, o modelo sugere a implantação de duas novas Unidades Básicas de Saúde estrategicamente localizadas para maximizar a cobertura populacional e reduzir as distâncias médias de deslocamento. A simulação posterior com o módulo de Indicadores de Eficiência (IE) demonstra uma melhora significativa nos índices de cobertura e uma redução projetada da sobrecarga nas UBS que concentram a maior parte da demanda especializada.

Algoritmo 1 Workflow 1: Expansão Baseada em Demanda Prevista

Entrada: Dados históricos de atendimento $\mathbf{Y}$, dados socioeconômicos $\mathbf{S}$, conjunto atual de UBS U, locais candidatos C, horizonte de planejamento H.
Saída: Conjunto ótimo de novos locais C^*, projeções de demanda $\hat{\mathbf{D}}$.

Etapa 1: Previsão de Demanda Agregada.
Para cada microrregião r (e.g., setor censitário), utilize o módulo PD para prever a demanda total de atendimentos nos próximos H meses/anos: $\hat{d}_r^{1:H} \leftarrow \text{PD}(\mathbf{Y}_r)$.
Para cada microrregião r, a demanda agregada no horizonte é definida como $D_r^{\text{futuro}} = \sum_{h=1}^{H} \hat{d}_r^h$. O mapa de demanda futura é então $\hat{\mathbf{D}} = \left\{D_r^{\text{futuro}}\right\}_{r \in R}$

Etapa 2: Cálculo de Pesos Socioeconômicos.
Combine a demanda futura $\hat{\mathbf{D}}$ com indicadores de vulnerabilidade de $\mathbf{S}$ (e.g., índice de saneamento, percentual de pobreza) para calcular um peso w_r para cada ponto de demanda: $w_r = \beta \cdot \tilde{D}_r + (1-\beta) \cdot \tilde{V}_r$, tal que $\tilde{\cdot}$ denota normalização.

Etapa 3: Otimização Espacial.
Execute o módulo OE, usando $\hat{\mathbf{D}}$ como estimativa de demanda e w_r como peso no objetivo. Defina o número de novas unidades p com base em orçamento ou meta de cobertura.
Obtenha o conjunto $C^* \subset C$ de locais para novas UBS.

Etapa 4: Simulação de Impacto (Opcional).
Simule a nova configuração da rede $U' = U \cup C^*$. Execute o módulo de IE para estimar a melhoria nos indicadores de eficiência e cobertura.

Retorne $C^*, \hat{\mathbf{D}}$.

Figura 1. Algoritmo 1.

B. *Workflow 2: Otimização com Realocação de Recursos*

O Workflow 2 tem como objetivo ajustar periodicamente a alocação de profissionais e, se necessário, realocar unidades físicas para responder a mudanças na demanda e corrigir ineficiências operacionais identificadas. Representa um processo de melhoria contínua que pode ser executado trimestral ou semestralmente.

O fluxo formal deste workflow inicia com uma análise diagnóstica que identifica unidades problemáticas através do módulo de indicadores de eficiência. Esta análise gera classificações que orientam as decisões subsequentes. O diagnóstico das causas determina se os problemas são relacionados à alocação de profissionais ou à localização física das unidades. Com base neste diagnóstico, o módulo de otimização da alocação de profissionais é executado para redistribuir recursos humanos de forma mais eficiente. Em casos em que problemas de localização são identificados, o módulo de otimização espacial é acionado para sugerir realocações físicas. A condição para realocação física é formalizada matematicamente, tal que A_i representa um índice de acessibilidade geográfica previamente definido e τ_A é o limiar mínimo aceitável.

Algoritmo 2 Workflow 2: Otimização com Realocação de Recursos

Entrada: Dados atuais de produção $\mathbf{Y}_{\text{atual}}$, alocação vigente de profissionais X_{atual}, localização atual das UBS U.
Saída: Nova alocação de profissionais X^*, possível conjunto de UBS para realocação U_r.

Etapa 1: Análise de Eficiência Corrente.
Calcule os indicadores de eficiência E_i para todas as UBS $u_i \in U$ usando dados recentes (último semestre).
Identifique o subconjunto de UBS *críticas*: $U_{\text{crit}} = \{u_i | E_i < \tau_E\}$ e o subconjunto *superdimensionadas*: $U_{\text{sup}} = \{u_i | E_i > \tau_S\}$, onde τ_E, τ_S são limiares.

Etapa 2: Diagnóstico das Causas.
Para cada $u_i \in U_{\text{crit}}$, avalie:
if demanda_atual$_i \gg$ capacidade_oferecida$_i$ **then**
  Causa provável: Subdotação de profissionais ou capacidade física insuficiente.
  Calcule o déficit de profissionais por categoria: $\Delta P_{i,k} = dr_{i,k} - \sum_{p \in P_k} s_p \cdot x_{pi}$.
else if demanda_atual$_i \ll$ capacidade_oferecida$_i$ **then**
  Causa provável: ociosidade estrutural da unidade. Considere realocação física ou redução de quadro.
end if

Etapa 3: Otimização de Profissionais.
Execute o módulo OAP, usando a demanda atual $dr_{j,k}$ (ou uma média móvel recente) como entrada.
A solução X^* realocará profissionais de U_{sup} para U_{crit}, maximizando a MCA mínima.

Etapa 4: Avaliação da Necessidade de Realocação Física.
if existem $u_i \in U_{\text{crit}}$ tais que $MCA_{i,k}^* < \tau_{MCA}$ e $A_i < \tau_A$ **then**
  Execute o módulo OE em modo **realocação**: permita realocar q unidades de U_{crit} para novos locais candidatos próximos.
  Obtenha U_r (unidades a realocar) e seus novos locais.
end if

Retorne X^*, U_r.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Figura 2. Algoritmo 2.

Exemplo 2. Um exemplo de aplicação do Workflow 2 ocorre quando, após uma análise trimestral de desempenho, o gestor municipal identifica, por meio do módulo de Indicadores de Eficiência (IE), três Unidades Básicas de Saúde com Margem de Capacidade de Atendimento (MCA) negativa, evidenciando sobrecarga, e duas UBS com MCA elevada, indicando ociosidade estrutural. A análise diagnóstica revela que as unidades sobrecarregadas estão localizadas em regiões com crescimento recente da população, enquanto as unidades ociosas atendem áreas com demanda estável ou em declínio. Ao executar o módulo de Otimização da Alocação de Profissionais (OAP), o workflow redistribui cinco enfermeiros e dois médicos das UBS ociosas para as unidades críticas, maximizando a MCA mínima da rede e reduzindo desigualdades na capacidade de atendimento. Entretanto, uma das UBS permanece com desempenho insatisfatório devido à sua localização em uma área de difícil acesso e baixa conectividade viária. Nesse caso, o módulo de Otimização Espacial é acionado em modo de realocação e sugere o deslocamento físico da unidade em aproximadamente 5 km, posicionando-a em um bairro mais central e densamente povoado.

C. Workflow 3: Planejamento de Contratação Baseado em Demanda Prevista

O Workflow 3 tem como objetivo dimensionar a necessidade de contratação futura de profissionais com base em projeções de demanda geradas pelo módulo de Previsão de Demanda (PD), integrando essa expansão da força de trabalho ao módulo de Otimização da Alocação de Profissionais (OAP).

A lógica central consiste em: (i) estimar a demanda futura por unidade e por categoria profissional ao longo de um horizonte H; (ii) executar o modelo OAP utilizando a demanda média mensal projetada, obtendo a margem mínima global projetada MCA_k^{proj} sob a configuração atual da força de trabalho; (iii) calcular o déficit global em relação a um limiar estratégico τ_{MCA} e dimensionar o número adicional de profissionais necessário para elevar a margem mínima da rede até esse patamar; e (iv) reexecutar o modelo OAP com o contingente ampliado, produzindo uma nova alocação ótima X^* e a margem mínima final MCA_k^*.

O fluxo formal inicia com a geração das projeções de demanda acumuladas no horizonte e sua conversão para valores médios mensais compatíveis com o modelo OAP. Em seguida, a otimização max-min é executada para identificar a margem mínima global da rede. Caso essa margem esteja abaixo do limiar desejado, calcula-se o número mínimo de profissionais adicionais necessários para eliminar o déficit global, considerando a produtividade média mensal da categoria. Por fim, a força de trabalho ampliada é reinserida no modelo OAP, garantindo coerência matemática entre o critério de decisão e a variável otimizada.

Exemplo 3. Considere um município no qual o módulo de Previsão de Demanda projeta, para os próximos três anos, crescimentos acumulados de 25% nas consultas médicas e 18% nos atendimentos de enfermagem, concentrados principalmente em unidades situadas em áreas de expansão urbana. As projeções acumuladas são agregadas no horizonte e convertidas para valores médios mensais compatíveis com o modelo OAP.

Algoritmo 3 Workflow 3: Planejamento de Contratação Baseado em Demanda Prevista

Entrada: Rede atual U, profissionais atuais P, alocação vigente X, dados históricos $\mathbf{Y}$, horizonte H, limiar desejado de margem τ_{MCA}.
Saída: Número de contratações por categoria ΔP_k, nova alocação X^*, MCA_k^*.

Etapa 1: Projeção de Demanda Futura.
Para cada unidade u_j e categoria de profissional k, compute $\hat{d}_{j,k}^{1:H} \leftarrow \mathrm{PD}(\mathbf{Y}_{j,k})$.
Agregue no horizonte: $\hat{D}_{j,k} \leftarrow \sum_{h=1}^{H} \hat{d}_{j,k}^{h}$.

Etapa 2: Avaliação da MCA Global Projetada.
Para cada categoria k, execute o módulo OAP usando a demanda média mensal projetada $\bar{d}_{j,k} \leftarrow \hat{D}_{j,k}/H$.
Obtenha a margem mínima projetada MCA_k^{proj} sob a força de trabalho atual.

Etapa 3: Dimensionamento da Contratação via MCA Global.
Para cada categoria k, calcule o déficit global $\delta_k \leftarrow \max\{0, \tau_{MCA} - MCA_k^{\text{proj}}\}$.
Seja $\bar{s}_k$ a oferta média mensal da categoria k; determine $\Delta P_k \leftarrow \left\lceil \frac{\delta_k}{\bar{s}_k} \right\rceil$.
Atualize o conjunto de profissionais: $P_k' \leftarrow P_k \cup P_{k,\text{novos}}$.

Etapa 4: Reotimização com Força de Trabalho Ampliada.
Execute novamente o módulo OAP usando P', U e $\bar{d}_{j,k}$.
Obtenha a nova alocação X^* e a margem mínima final MCA_k^*.

Retorne $\Delta P_k, X^*, MCA_k^*$.

Figura 3. Algoritmo 3.

Ao executar o OAP com a força de trabalho atual e a demanda média mensal projetada, obtém-se uma margem mínima global projetada igual a $MCA_{médicos}^{proj} = -12$ consultas por mês e $MCA_{enfermeiros}^{proj} = -185$ atendimentos por mês. Como MCA_k representa a menor margem entre todas as unidades da rede, esses valores negativos indicam que, na pior unidade, a capacidade instalada é insuficiente para absorver o crescimento previsto da demanda. A gestão municipal estabelece como meta estratégica uma margem mínima não negativa, isto é, $\tau_{MCA} = 0$. O déficit global por categoria é então calculado como $\delta_k = max\{0, \tau_{MCA} - MCA_k^{proj}\}$, o que resulta em $\delta_{médicos} = 12$ consultas por mês e $\delta_{enfermeiros} = 185$ atendimentos por mês.

Considerando produtividades médias mensais de $\bar{s}_{médicos} = 150$ consultas por médico e $\bar{s}_{enfermeiros} = 120$ atendimentos por enfermeiro, o número mínimo de contratações necessárias é obtido

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

como $\Delta P_{médicos} = \lceil 12/150 \rceil = 1 \, e \, \Delta P_{enfermeiros} = \lceil 185/120 \rceil = \lceil 1{,}54 \rceil = 2$. Após a inclusão de um médico e dois enfermeiros no conjunto P, o modelo OAP é reexecutado. A nova solução ótima produz $MCA^{*}_{médicos} = 6$ consultas por mês e $MCA^{*}_{enfermeiros} = 55$ atendimentos por mês. Isso implica que mesmo a unidade mais crítica passa a operar com folga operacional, aumentando a resiliência do sistema frente a variações na demanda.

Desafios Práticos. Diferenças de granularidade, inconsistências e atrasos na atualização dos dados podem impactar diretamente a confiabilidade das análises e decisões. Outro desafio relevante refere-se à calibração e validação dos modelos de previsão e otimização, especialmente em cenários com alta variabilidade de demanda. Além disso, a adoção prática requer capacidade computacional adequada e interfaces que facilitem a interpretação dos resultados por gestores.

V. Conclusões e Trabalhos Futuros

Este artigo propôs uma abordagem integrada para o uso estratégico de ferramentas analíticas na gestão da APS no SUS. A adoção de uma abordagem integrada e baseada em dados tem o potencial de transformar a gestão, tornando-a mais proativa, equitativa e eficiente, e contribuindo para os princípios do SUS de universalidade, integralidade e equidade no acesso aos serviços de saúde. Entretanto, o estudo apresenta limitações, como a dependência de dados de alta qualidade e a simplificação de aspectos complexos da realidade operacional da APS. Como trabalhos futuros, destacam-se a implementação e validação em cenários reais, por meio do desenvolvimento de uma plataforma que orquestre os workflows, bem como sua aplicação em municípios com diferentes perfis.

Agradecimentos

Agradecemos o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e o financiamento do Ministério da Saúde (Decit/SECTICS/MS) no projeto de pesquisa em execução.

Referências Bibliográficas

[1] Conselho Nacional de Secretários de Saúde (CONASS), Atenção Primária e Promoção da Saúde. Brasília, Brasil: CONASS, 2011. [Online]. Available: https://www.conass.org.br/biblioteca/atencao-primaria-e-promocao-da-saude/. Accessed: Feb. 18, 2026.

[2] L. A. Facchini, E. Tomasi, and A. S. Dilélio, "Qualidade da atenção primária à saúde no Brasil: avanços, desafios e perspectivas," Saúde em Debate, vol. 42, no. spe1, pp. 208–223, 2018.

[3] E. H. Lee and J. Jeong, "Facility location problem for senior centers in an upcoming super-aging society," Scientific Reports, vol. 15, no. 1, Feb. 2025.

[4] P. Fränti, S. Sieranoja, and T. Laatikainen, "Designing a clustering algorithm for optimizing health station locations," International Journal of Health Geographics, vol. 24, no. 1, Mar. 2025.

[5] L. F. A. Pereira, L. B. Ferreira, D. C. Nascimento, I. M. Vanderlei, D. Silva, V. B. Santos, M. S. Gomes, and I. A. A. Melo, "Design, integration, and evaluation of a demand forecasting service in the context of primary healthcare," in Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação. Porto Alegre, Brasil: SBC, 2025, pp. 506–514.

[6] L. F. A. Pereira, I. Y. N. Nascimento, V. B. Santos, R. G. S. Pinheiro, and D. C. Nascimento Filho, "Avaliação da evolução da eficiência operacional de municípios brasileiros na gestão de recursos para atenção primária à saúde," in Anais do XXV Simpósio Brasileiro de Computação Aplicada à Saúde. Porto Alegre, Brasil: SBC, 2025, pp. 737–747.

[7] M. Santos, G. Tenório, B. J. S. Barros, B. C. S. Nogueira, D. C. Nascimento, and R. G. S. Pinheiro, "A system for workforce sizing optimization to enhance service capacity in primary healthcare units," in Anais do XXII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação. Porto Alegre, Brasil: SBC, 2026, pp. 890–909.

[8] C. F. F. Costa Filho, D. A. Rivera Rocha, M. G. Fernandes Costa, and W. C. de Albuquerque Pereira, "Using constraint satisfaction problem approach to solve human resource allocation problems in cooperative health services," Expert Systems with Applications, vol. 39, no. 1, pp. 385–394, 2012.

[9] T. Pinheiro, M. Gomes, I. Vanderlei, D. Nascimento, T. Fabrício, R. Andrade, and D. Silva, "SmartApSUS: integrando dados, previsão e otimização para fortalecer a gestão da APS no Brasil," in Anais Estendidos do XL Simpósio Brasileiro de Bancos de Dados. Porto Alegre, Brasil: SBC, 2025, pp. 82–87.

[1] A. Rais and A. Viana, "Operations research in healthcare: a survey," International Transactions in Operational Research, vol. 18, no. 1, pp. 1–31, 2011.

[10] J. T. Lee, I. Crettenden, M. Tran, D. Miller, M. Cormack, M. Cahill, J. Li, T. Sugiura, and F. Xiang, "Methods for health workforce projection model: systematic review and recommended good practice reporting guideline," Human Resources for Health, vol. 22, 2024.

[11] D. F. Lopes et al., "The health workforce demand: a systematic literature review," Ciência & Saúde Coletiva, vol. 26, no. suppl. 1, pp. 2431–2448, 2021.

[12] Z. Tao, Y. Cheng, T. Dai, and M. W. Rosenberg, "Spatial optimization of residential care facility locations in Beijing, China: maximum equity in accessibility," International Journal of Health Geographics, vol. 13, no. 1, Sep. 2014.

[13] W. Gu, X. Wang, and S. E. McGregor, "Optimization of preventive health care facility locations," International Journal of Health Geographics, vol. 9, no. 1, p. 17, 2010.

[14] D. P. da Silva Almeida, P. L. Oliveira Junior, G. A. Prazeres et al., "Implementation of a digital tool for population management in primary health care," Revista de Saúde Pública, vol. 57, p. 6s, 2024.

[15] N. Monsef, E. Suliman, E. Ashkar, and H. Y. Hussain, "Healthcare services gap analysis: a supply capture and demand forecast modelling, Dubai 2018–2030," BMC Health Services Research, vol. 23, 2023.

[16] A. Salami, B. Afshar-Nadjafi, and M. Amiri, "A two-stage optimization approach for healthcare facility location-allocation problems with service delivering based on genetic algorithm," International Journal of Public Health, vol. 68, Feb. 2023.

[17] D. C. Nascimento, I. M. Vanderlei, and D. Silva, "Conceptual modeling of algorithm parameterization and results considering volatile data requirements: a case study in the context of primary healthcare," in Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação. Porto Alegre, Brasil: SBC, 2025, pp. 399–408.

[18] L. J. Bourgeois III, "On the measurement of organizational slack," Academy of Management Review, vol. 6, no. 1, pp. 29–39, 1981.

Caracterização de Doenças Cardíacas por Integração de Sinais Fisiológicos e Dados Clínicos

Characterization of Heart Diseases through the Integration of Physiological Signals and Clinical Data

Eduardo Roldão Nonato Perondini, André Luis Debiaso Rossi
Laboratório Recogna, Departamento de Computação (DCo)
Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Bauru, Brasil
{eduardo.perondini, andre.rossi}@unesp.br

Danilo Medeiros Eler
Departamento de Matemática e Computação (DMC)
Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Presidente Prudente, Brasil
danilo.eler@unesp.br

***Resumo* — Este trabalho investiga a detecção precoce de doenças cardiovasculares por meio da integração de sinais de eletrocardiograma (ECG) e dados clínicos. Utilizando fundamentos da Teoria do Caos e sistemas dinâmicos, a análise da variabilidade da frequência cardíaca permitiu distinguir padrões patológicos, como a Fibrilação Atrial e a Insuficiência Cardíaca, por meio de ferramentas de visualização como o Gráfico de Poincaré e a Reconstrução do Espaço de Fase. Em paralelo, a exploração de dados estruturados identificou indicadores de risco fundamentais, com destaque para a variável *Oldpeak* na identificação de infartos. A aplicação de categorias paralelas demonstrou como múltiplos fatores convergem para o desfecho clínico. Conclui-se que a união entre o processamento de sinais e a ciência de dados proporciona um suporte robusto para diagnósticos precisos e para a evolução da predição na cardiologia contemporânea.**

Palavras **Chave - Informática em Saúde; Processamento de Sinais Biomédicos; Variabilidade da Frequência Cardíaca; Teoria do Caos, Sistemas Dinâmicos; Análise Exploratória; Aprendizado de Máquina.**

***Abstract* — This study investigates the early detection of cardiovascular diseases through the integration of electrocardiogram (ECG) signals and clinical data. Using principles from Chaos Theory and dynamical systems, heart rate variability analysis enabled the distinction of pathological patterns, such as Atrial Fibrillation and Heart Failure, through visualization tools including the Poincaré Plot and Phase Space Reconstruction. In parallel, the exploration of structured data identified key risk indicators, with particular emphasis on the variable *Oldpeak* in the identification of myocardial infarction. The application of parallel categories demonstrated how multiple factors converge toward the clinical outcome. It is concluded that the integration of signal processing and data science provides robust support for accurate diagnoses and for the advancement of predictive approaches in contemporary cardiology.**

Keywords - Health Informatics; Biomedical Signal Processing; Heart Rate Variability; Chaos Theory; Dynamical Systems; Exploratory Data Analysis; Machine Learning.

Introdução

Usualmente, o diagnóstico precoce de condições cardiovasculares é realizado por meio da análise dos sinais de eletrocardiograma (ECG), o que permite a identificação de anormalidades antes do surgimento de complicações súbitas [1]. Apesar da grande acessibilidade do equipamento devido ao seu baixo custo, o seu uso, por si só, não garante diretamente um diagnóstico, uma vez que são necessárias interpretações dos sinais que permitam classificar as doenças cardiovasculares com base nas anormalidades rítmicas dos sinais de ECG [2].

A partir disso, existem inúmeras áreas que tentam propor ferramentas que auxiliem no diagnóstico de sinais de ECG, seja por meio do estudo das dinâmicas não-lineares dos sinais de eletrocardiograma ou até algoritmos de aprendizado de máquina para classificação automatizada dos pacientes [3]-[6]. O estudo das dinâmicas não-lineares dos sinais se embasa em uma abordagem matemática capaz de lidar com sistemas totalmente descritíveis, mas que apresentam flutuações randômicas em certas condições [7]. Essa abordagem recebe o nome de Teoria do Caos e lida com padrões que emergem ao longo da evolução temporal do sistema, o qual é sensível às condições iniciais [7], [8]. Apenas uma pequena mudança nas variáveis de estado, em um certo instante, é capaz de causar uma grande alteração no comportamento futuro do sistema [9]. Dessa forma, os sinais do sensor de ECG podem ser descritos por esse tipo de sistema, permitindo a análise e a extração de características por métodos não lineares [10].

Por outro lado, além da análise dos sinais de ECG, a in-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

terpretação de dados clínicos também é comumente realizada para o diagnóstico de uma doença cardiovascular, em que essas características se traduzem como fatores de riscos ou causas de quaisquer complicações [11]. Assim, a detecção precoce é um problema atual bastante desafiador, que leva os especialistas a tentar compreender e identificar os múltiplos fatores que contribuem para a ocorrência das doenças cardíacas na população de risco [12]. Os principais atributos analisados pelo corpo clínico de um hospital para detecção de doenças cardiovasculares são descritos pela Tabela 1, em que essas informações serão utilizadas e analisadas por meio da base de dados *Heart Failure Prediction* [13] para o entendimento dos fenômenos que contribuem para o surgimento de doenças cardíacas.

Assim, o presente artigo visa analisar duas bases de dados distintas, *Heart Failure Prediction* [13] e os dados de ECG disponibilizados por [14], para contribuir para o entendimento da manifestação dos fenômenos que levam os pacientes para o desenvolvimento de doenças cardíacas e de outras complicações como infarto. As metodologias que compõem as análises estão descritas nas Seções II e III; os resultados obtidos são apresentados na Seção IV; por fim, na Seção V, são apresentadas as interpretações dos resultados e a conclusão do trabalho.

II. Fundamentação Teórica

A. Sistemas Dinâmicos e a Reconstrução do Espaço de Fase

Os **sistemas dinâmicos** fundamentam a análise de sinais por métodos não-lineares [15], sendo governados por variáveis dependentes do tempo. Esses sistemas são classificados em:

(i) Determinísticos ou Estocásticos: Dependendo se podem ser descritos por formulações exatas ou apenas por probabilidades de variação, respectivamente [16], [17].

(ii) Lineares ou Não-Lineares: Dependendo da proporcionalidade (ou ausência dela) na relação de mudança entre as variáveis de estado [18], [19].

O espaço de fase é um meio abstrato multidimensional que representa todos os estados possíveis de um sistema. Quando as variáveis de estado são desconhecidas, utiliza-se o Teorema de Takens para reconstruir esse espaço a partir de uma série temporal univariada através de um processo autoregressivo [9].

Considerando r como a dimensão de incorporação e τ como o atraso temporal (*lag*), gera-se uma matriz de trajetória R, composta por vetores r-dimensionais, em que :

$$\mathcal{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_1 \\ \vdots \\ \mathbf{R}_{n-(r-1)\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 & x_{1+\tau} & \cdots & x_{1+(r-1)\tau} \\ x_2 & x_{2+\tau} & \cdots & x_{2+(r-1)\tau} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n-(r-1)\tau} & x_{n-(r-2)\tau} & \cdots & x_n \end{bmatrix}$$

A determinação correta dos parâmetros r e τ é crucial para a fidelidade da reconstrução do espaço de fase em sinais biomédicos [9], [20].

B. Poincaré Plot

A representação de Poincaré é crucial para a análise de sistemas dinâmicos, pois permite a avaliação da evolução do sistema no espaço de fase [9], [21]. Sua análise possibilita a identificação de certos padrões ocultos no comportamento do sistema [21], [22].

Para a construção da representação de Poincaré, são necessárias algumas variáveis originadas dos sinais de ECG, tais como: os intervalos RR atuais (), os intervalos RR anteriores () e os desvios padrão associados ao conjunto de dados (*SD1* e *SD2*). A Fig. 1 ilustra a forma como a representação de Poincaré é construída.

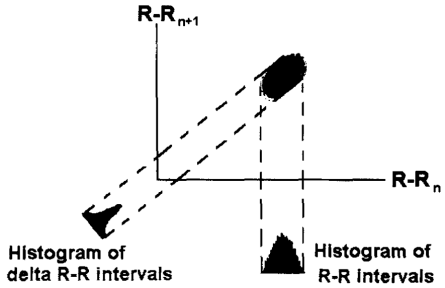


Figura 1. Representação de Poincaré para a avaliação da Variabilidade de Batimentos Cardíacos utilizando os intervalos de e [22].

Uma das grandes motivações da representação de Poincaré está relacionada ao Teorema de Takens [23], que estabelece que é possível reconstruir o atrator de um sistema dinâmico por meio do mapeamento dos valores de medidas escalares no espaço de fase utilizando atrasos temporais τ e diferentes dimensões de incorporação r [21], [22]. Assim, a representação de Poincaré é capaz de formar diferentes padrões de clusterização, de acordo com a variabilidade do batimento cardíaco, permitindo a categorização de doenças pela diversidade nas distribuições dos dados dos intervalos RR [10], [21].

III. Metodologia

A. Base de Dados

O presente trabalho investigou duas bases de dados: o *Heart Failure Dataset* (HFD) [13] e o *ECG Dataset* [14]. Apesar de ambas tratarem do mesmo tema, relacionado à avaliação de doenças cardiovasculares, elas diferem quanto ao tipo de informação: dados clínicos (HFD) e sinais eletrocardiográficos (ECG).

A HFD é composta por 918 instâncias com 11 atributos, descritos na Tabela I. Esses atributos são amplamente utilizados na rotina clínica como fatores de risco, sendo que alguns deles são considerados fatores modificáveis, como colesterol, pressão sanguínea e índice glicêmico [24]. Além disso, a soma desses fatores de risco pode levar ao acúmulo de pontuações que indicam, em uma previsão de 10 anos, o potencial de desenvolvimento de doenças cardíacas associado a maus hábitos cultivados ao longo do tempo [24], [25]. Adicionalmente, a base contém a informação referente à presença ou ausência de doença cardíaca.

Por outro lado, a base de dados de ECG é composta por quatro sinais de tamanho n=300, correspondentes a quatro

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

TABELA I. Descrição dos atributos clínicos para o diagnóstico de doenças cardíacas [13].

Atributos	Descrição
Idade (Age)	Idade do paciente, expressa em anos.
Sexo (Sex)	Sexo biológico do paciente: **M** para masculino e **F** para feminino.
Tipo de Dor no Peito (Chest PainType)	Tipo de dor no peito apresentada: **TA** (Angina Típica), **ATA** (Angina Atípica), **NAP** (Dor Não Anginosa) ou **ASY** (Assintomático).
Pressão Arterial de Repouso (RestingBP)	Pressão arterial medida em repouso, em milímetros de mercúrio (mmHg).
Colesterol (Cholesterol)	Concentração de colesterol sérico, em miligramas por decilitro (mg/dl).
Glicemia em Jejum (FastingBS)	Açúcar no sangue em jejum: **1** se a glicemia for superior a 120 mg/dl, **0** caso contrário.
Eletrocardiograma de Repouso (RestingECG)	Resultado do ECG de repouso: **Normal**, **ST** (anormalidade na onda ST-T, como inversão da onda T ou elevação/depressão do ST > 0.05 mV) ou **LVH** (hipertrofia ventricular esquerda segundo os critérios de Estes).
Frequência Cardíaca Máxima (MaxHR)	Maior frequência cardíaca alcançada durante o teste de esforço, variando entre 60 e 202 bpm.
Angina Induzida por Exercício (ExerciseAngina)	Presença de angina induzida por esforço físico: **Y** (Sim) ou **N** (Não).
Oldpeak (ST)	Valor numérico que representa a depressão do segmento ST, medido em unidades de desvio.
Inclinação do Segmento ST (ST Slope)	Inclinação do segmento ST no pico do exercício: **Up** (ascendente), **Flat** (plana) ou **Down** (descendente).

condições cardíacas distintas, variando entre: Ritmo Sinusal Normal (NSR), Arritmia Cardíaca (ARR), Fibrilação Atrial (AFF) e Insuficiência Cardíaca Congestiva (CHF). Em geral, a base de ECG é composta por quatro séries temporais com 300 registros para cada patologia, totalizando 1200 instâncias com 55 medições diferentes ao longo do tempo.

B. *Fluxo de Análise*

1) *HF Dataset:* Para a análise exploratória dos dados clínicos, diversas representações visuais foram utilizadas. A busca se embasou na identificação de padrões presentes entre os atributos das instâncias, permitindo encontrar correlações, o que é importante no contexto do aprendizado de máquina. Com isso, inúmeras técnicas de representação foram consideradas, desde análises mais simples como Boxplot até coordenadas paralelas. Na Seção IV, apresentam-se todos os gráficos gerados e discute-se os padrões identificados pelas técnicas de visualização.

2) *ECG Dataset:* Os dados de eletrocardiograma possuem 55 medições diferentes composto no mesmo dataframe. Entretanto, para garantir as análises por meio de sistemas dinâmicos, somente 3 dessas 55 medições foram utilizadas ao longo do tempo, sendo as colunas **ECG signal**, **NN50** e **SDRR** escolhidas para análises e comparações fenomenológicas. Após isso, a série temporal **ECG_signal** de cada condição cardíaca foi utilizada para reconstrução do espaço de fase e para a plotagem da representação de Poincaré, com o objetivo de identificar atratores que caracterizam as diferentes condições cardíacas.

IV. Resultados e Discussão

A. *Extração de Características de Sinais e a Variabilidade da Frequência Cardíaca*

Inicialmente, as primeiras análises realizadas para os sinais de eletrocardiograma consistem em identificar padrões da velocidade da frequência cardíaca em diferentes patologias. Neste caso, as patologias presentes no banco de dados de ECG são: NSR, AFF, CHF e ARR. A Fig. 2 apresenta inúmeros *violinplots* separando a influência de cada patologia segundo o intervalo de batimentos cardíacos por minuto (BPMs).

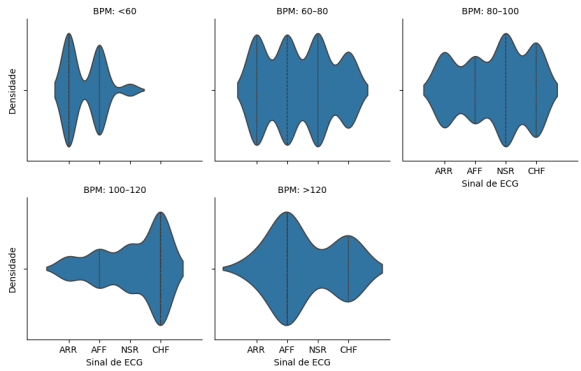
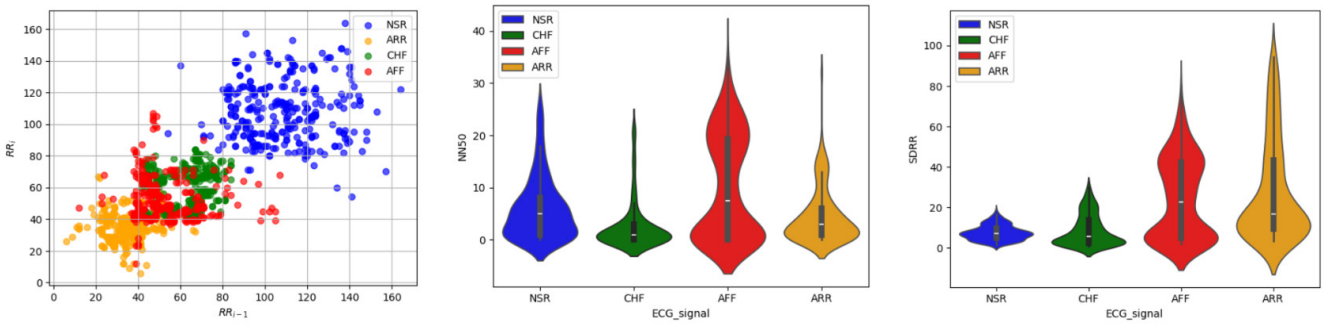


Figura 2. Distribuições da presença das diferentes condições cardíacas de acordo com o intervalo de batimentos cardíacos por minuto.

Pode-se identificar recorrências de certas condições conforme a frequência cardíaca, permitindo que um limiar seja traçado quanto à presença das patologias em relação ao ritmo cardíaco. Além disso, essa visualização abre espaço para que outras técnicas de extração de características sejam aplicadas, como as análises da variabilidade da frequência cardíaca por métodos de dinâmicas não lineares, como explicadas na Seção II.

Dessa forma, por meio dos intervalos RR de cada segmento de ECG, separando por condição cardíaca, extrai-se a representação de Poincaré para a reconstrução do espaço de fase das séries temporais. Assim, abre-se margem para inter-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4



(a) Representação de Poincaré dos intervalos RR de cada condição cardíaca.

(b) *Violinplot* da métrica de `NN50` quanto às 4 patologias cardíacas.

(c) Desvio padrão da métrica de `NN50` para as 4 patologias.

Figura 3. Representações gráficas das métricas extraídas dos intervalos RR para diferentes condições cardíacas: (a) representação de Poincaré, (b) *violinplot* do NN50 e (c) desvio padrão da NN50.

pretações biológicas quanto ao comportamento dos atratores que cada patologia forma. A Fig. 3.a apresenta os atratores formados pelas patologias cardíacas através da representação de Poincaré. Esse tipo de visualização funciona como um extrator de características, permitindo que essas distribuições representem os sistemas dinâmicos (fenômenos) de cada doença, possibilitando que inúmeras técnicas de classificação sejam aplicadas aos dados. Assim, observa-se que a condição de NSR, isto é, o estado de normalidade do ritmo cardíaco, apresenta-se bem separada em relação às demais doenças cardíacas. Por outro lado, existe um certo limiar de separação entre as patologias, mas com potenciais fatores de confusão caso algoritmos de clusterização fossem aplicados em uma tarefa de aprendizado convencional.

Seguindo com as análises por sistemas dinâmicos, as Figs. 3b e 3c apresentam duas variáveis medidas pelo sensor de ECG que indicam características sobre a variabilidade cardíaca das quatro condições estudadas. A variável NN50 é descrita como o número de pares de intervalos NN sucessivos que diferem em mais de 50 milissegundos, indicando a atividade do sistema nervoso parassimpático. Alterações nesses valores podem indicar dois aspectos: níveis mais altos de NN50 estão associados ao relaxamento e à boa forma física do coração; já em níveis mais baixos, pode-se sugerir estresse ou fadiga no órgão do sistema circulatório, indicando potenciais doenças relacionadas ao coração.

A variável SDRR é definida, simplesmente, como o desvio padrão do NN50. Assim, pode-se avaliar a homogeneidade das amostras de NN50, em que maiores variações indicam que a dinâmica entre os pulsos NN tem característica caótica, uma vez que apresentam valores com maior variabilidade. Dessa forma, condições cardíacas como a AFF são mais complicadas de serem analisadas por cardiologistas, uma vez que os sinais expressam maior caoticidade e complexidade em relação às demais patologias.

B. *Análise Exploratória com Dados Clínicos*

Agora, quanto aos dados de presença (1) ou ausência (0) de infarto, em que as instâncias possuem os atributos apresentados pela Tabela I. A análise exploratória desta segunda base de dados foi composta pela avaliação de características e correlações entre os atributos, de modo a procurar por características que sejam relevantes em um caso de classificação, na perspectiva do aprendizado de máquina tradicional. Dessa forma, a primeira análise, representada pela Fig. 4.a, apresenta a relação da variação de idade separada pelos tipos de dores no peito, quanto à presença ou ausência de casos de infarto. Nesse resultado, destacam-se os gráficos de *boxplot* quanto ao tipo de dor Angina Atípica (ATA), visto que a literatura demonstra que essa dor ocorre comumente em idosos, apresentando assim uma maior concentração nas idades . Seguindo esse mesmo princípio, dores Não Anginosas (NAP) também se apresentam mais predominantes em idades mais elevadas, além de possuírem uma confiabilidade muito maior em casos de infarto, à medida que a sua barra de erro é menor do que em pacientes não infartados.

Por outro lado, Anginas Típicas (TA) apresentam-se mais presentes em adultos do que em idosos, viabilizando um tipo de sinal para casos de pessoas jovens que sofreram infarto. O segundo quartil do *boxplot* da TA gira em torno de 46 anos de idade, mostrando que cuidados quanto a essa dor podem ser iniciados a partir desse referencial. Além disso, a presença dessa dor em pacientes mais jovens pode indicar doenças cardiovasculares, uma vez que é mais raro encontrar casos assim tão precocemente em uma população.

Seguindo com as análises dos atributos das instâncias do *HF Dataset*, temos a variável *Oldpeak*, que é uma medida sobre a depressão do segmento ST induzida pelo exercício em relação ao repouso, utilizada para avaliar a presença de isquemia miocárdica, sendo normalmente obtida por meio do teste ergométrico. Avaliar a distribuição dessa métrica quanto aos diferentes estados de presença ou ausência de infarto é importante, pois auxilia diretamente na interpretação dos sinais de eletrocardiograma. A Fig. 5 apresenta os tipos de depressão do segmento ST que estão diretamente relacionados com o valor numérico de Oldpeak. Comparando as distribuições dos valores numéricos presentes no banco de dados em relação à presença ou ausência de casos de infarto, temos que a Fig. 4.b apresenta uma clara diferença nas distribuições de valores, em que a média (μOldPeak) dos infartados demonstra ser 3,09 vezes maior que a dos pacientes que não sofreram infarto.

Em paralelo à análise do *Oldpeak*, temos as Figs. 4.c e 4.d que apresenta a relação da variação dos atributos de *ST_Slope*,

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

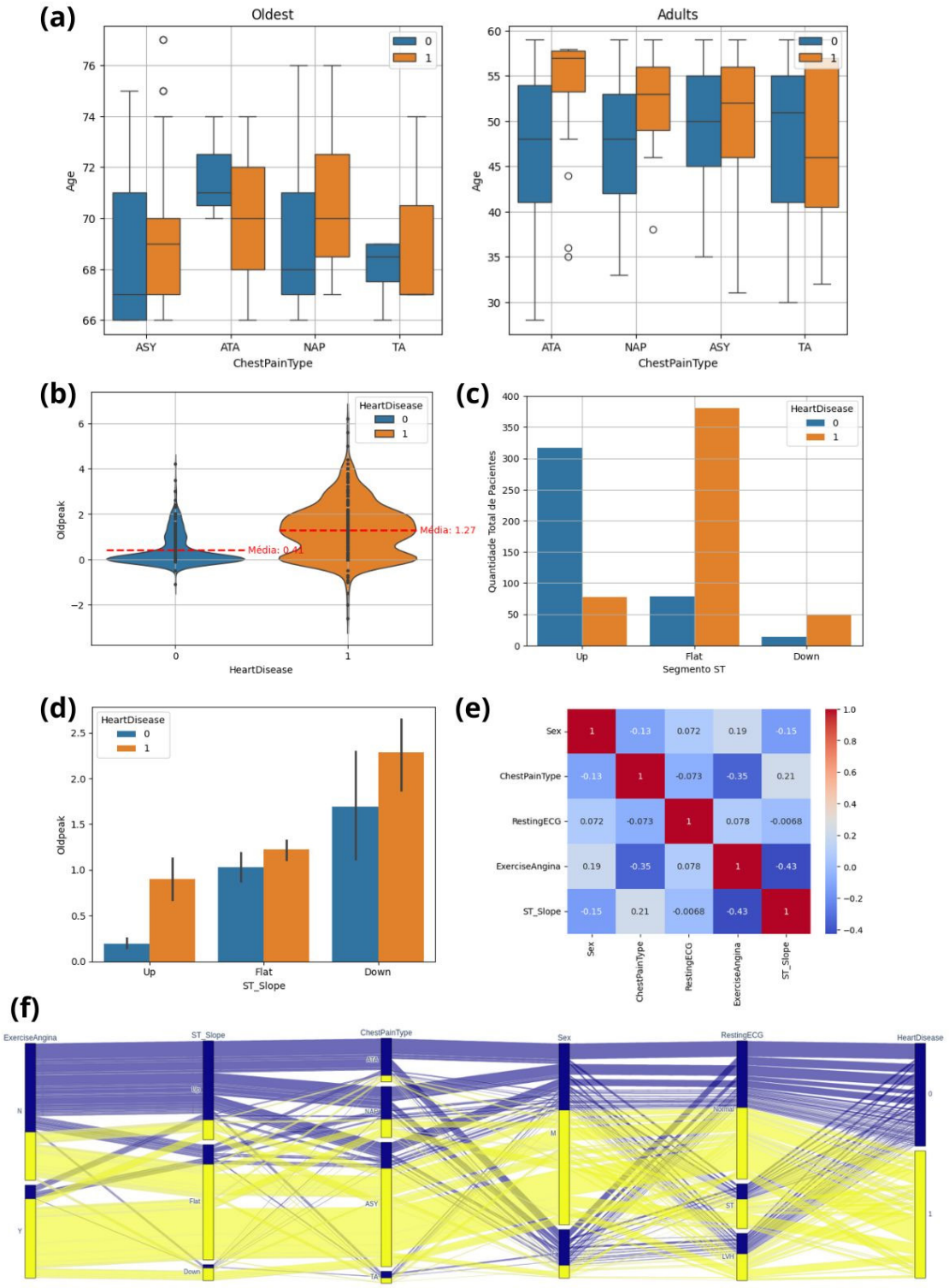


Figura 4. **(a)** Avaliação da variação dos tipos de dor no peito conforme a idade dos pacientes que sofreram (1) ou não (0) infarto; **(b)** *violinplot* dos valores numéricos de *Oldpeak* para cada classe de pacientes; **(c)** e **(d)** influência do valor de *Oldpeak* conforme os diferentes tipos de depressão do segmento ST no eletrocardiograma; **(e)** mapa de calor apresentando a medida de correlação entre os atributos categóricos do *HF Dataset*; e **(f)** gráfico de categorias paralelas para visualização dos pesos que influenciam na categorização das instâncias nas classes [0,1], quanto à presença ou ausência de infarto do miocárdio.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

descrito como o tipo de depressão causada no segmento ST pela Fig. 5. Esses gráficos se relacionam, demonstram como a presença de diferentes manifestações das depressões dos segmentos influenciam em um valor numérico do *Oldpeak* mais elevado. Dessa forma, nota-se que os dois resultados apresentam que depressões do tipo *flat* possuem maiores casos de infarto e com maior confiança, uma vez que a barra de erro é menor. Ademais, depressões do tipo *up* apresentaram não desencadear o infarto em comparação com os demais tipos, além de possuírem níveis de *Oldpeak* mais baixos. Já a depressão do tipo *down* não mostrou ter significância suficiente, à medida que possui poucas amostras que representem essas classes desse atributo, não permitindo uma análise precisa.

Por fim, a última análise para a base de dados HF foi realizada na tentativa de buscar correlações entre os atributos nominais, isto é, variáveis categóricas, de modo a procurar por padrões na presença de infarto em pacientes. Essa análise contou com a representação visual de coordenadas paralelas categóricas, por meio da biblioteca *plotly.express* e da função *px.parallel_categories*. Inicialmente, antes de qualquer visualização gráfica, é necessário buscar meios para ordenar as variáveis com maiores correlações. Dessa forma, foi criado um *heatmap* para identificar potenciais correlações entre os atributos, como uma técnica de engenharia de dados para definir um novo banco de dados que será analisado. Assim, a Fig. 4.e apresenta o mapa de calor gerado pela biblioteca *seaborn* para ordenação da representação visual.

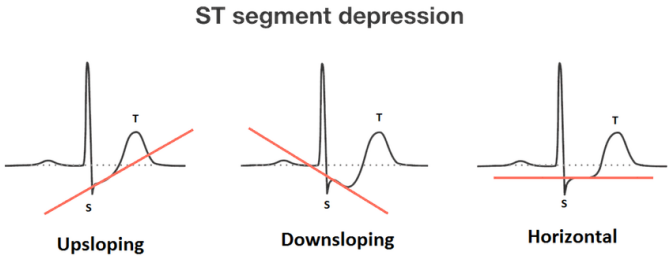


Figura 4. Representação dos tipos de depressão do segmento ST [26].

Com essa ordenação, foi possível construir a representação de modo que as categorias paralelas conduzissem às classes de presença (1) ou ausência (0) de infarto nos pacientes, conforme ilustrado na Fig. 4.f. Por meio dessa representação, pode-se observar os principais pesos que levaram as instâncias a serem categorizadas entre as classes [0,1]. Observa-se, a partir desse gráfico, que possíveis desbalanceamentos entre as classes podem enviesar os modelos ou as análises, comprometendo a interpretação dos resultados. Por exemplo, nota-se um número menor de casos de depressão do segmento ST do tipo *flat* em pacientes do sexo masculino quando comparado aos do sexo feminino. Entretanto, não é possível estabelecer conclusões a esse respeito, uma vez que há desbalanceamento no banco de dados quanto à quantidade de pacientes do sexo feminino em relação ao masculino. Outro caso de destaque, nesse mesmo gráfico, é a maior quantidade de casos assintomáticos (ASY), o que pode enviesar modelos de aprendizado de máquina quanto à predição da presença de infarto, uma vez que essa categoria apresenta mais casos positivos (1) em comparação às demais.

Dessa forma, essa representação auxilia na análise da correlação entre os atributos categóricos, permitindo a identificação de padrões e de possíveis enviesamentos a serem considerados pelos modelos. Essa etapa de investigação é crucial para o treinamento de modelos de aprendizado de máquina voltados à predição dessas classes clínicas.

V. Conclusões

Este trabalho apresentou possibilidades de ferramentas de extração de características e análise do comportamento de sinais de eletrocardiograma e dados clínicos para o diagnóstico precoce de patologias cardiovasculares. Por meio da aplicação da Teoria do Caos e da reconstrução do espaço de fase, comprovou-se que a dinâmica não linear e a variabilidade dos intervalos RR, quantificadas pelas métricas **NN50** e **SDRR**, são indicadores robustos para diferenciar condições como Fibrilação Atrial e Insuficiência Cardíaca Congestiva. Complementarmente, a análise do *HF Dataset* ratificou o valor diagnóstico do *Oldpeak*, cujos valores médios em pacientes infartados foram aproximadamente 3,09 vezes superiores, bem como das depressões do segmento ST do tipo *flat*. Apesar dos desafios inerentes ao desbalanceamento de dados, a abordagem multidisciplinar proposta oferece uma base sólida para o desenvolvimento de modelos de aprendizado de máquina aplicados à medicina de precisão, contribuindo para otimizar a tomada de decisão clínica baseada em evidências.

Para os próximos passos desta pesquisa, o foco será na manipulação das características extraídas para o espaço de fase dos sinais de ECG, de modo a confirmar a presença de agrupamentos para cada patologia em um processo de aprendizado não supervisionado por meio de algoritmos de clusterização (e.g., *K-means*). Dessa forma, utilizando uma base de dados maior de sinais de eletrocardiograma, inicialmente sem a presença das classes, será possível avaliar a eficiência de classificação dos algoritmos de clusterização e, posteriormente, compará-los com as classes reais. Assim, busca-se integrar a análise de características baseada em dinâmicas de sistemas não lineares com ferramentas de aprendizado de máquina.

Agradecimentos

O presente trabalho foi parcialmente financiado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES).

Referências Bibliográficas

[1] M. Hammad, A. Maher, K. Wang, F. Jiang e M. Amrani, "Detection of abnormal heart conditions based on characteristics of ECG signals," *Measurement*, vol. 125, pp. 634–644, 2018.

[2] V. Jahmunah, S. L. Oh, J. K. E. Wei, E. J. Ciaccio, K. Chua, T. R. San e U. R. Acharya, "Computer-aided diagnosis of congestive heart failure using ECG signals – A review," *Physica Medica*, vol. 62, pp. 95–104, 2019.

[3] P. M. Tripathi, A. Kumar, R. Komaragiri e M. Kumar, "A review on computational methods for denoising and detecting ECG signals to detect cardiovascular diseases," *Archives of Computational Methods in Engineering*, vol. 29, no. 3, pp. 1875–1914, 2022.

[4] M. H. Vafaie, M. Ataei e H. R. Koofigar, "Heart diseases prediction based on ECG signals classification using a genetic-fuzzy system and dynamical model of ECG signals," *Biomedical Signal Processing and Control*, vol. 14, pp. 291–296, 2014.

[5] X. Liu, H. Wang, Z. Li e L. Qin, "Deep learning in ECG diagnosis: A review," *Knowledge-Based Systems*, vol. 227, p. 107187, 2021.

[6] A. L. Goldberger, "Non-linear dynamics for clinicians: Chaos theory,

fractals, and complexity at the bedside," *The Lancet*, vol. 347, no. 9011, pp. 1312–1314, 1996.
[7] E. Ott, *Chaos in Dynamical Systems*. Cambridge: Cambridge University Press, 2002.
[8] V. Gupta, M. Mittal e V. Mittal, "Chaos theory: An emerging tool for arrhythmia detection," *Sensing and Imaging*, vol. 21, no. 1, p. 10, 2020.
[9] S. K. Nayak, A. Bit, A. Dey, B. Mohapatra e K. Pal, "A review on the nonlinear dynamical system analysis of electrocardiogram signal," *Journal of Healthcare Engineering*, vol. 2018, p. 6920420, 2018.
[10] E. Gospodinova, P. Lebamovski, G. Georgieva-Tsaneva e M. Negreva, "Evaluation of the methods for nonlinear analysis of heart rate variability," *Fractal and Fractional*, vol. 7, no. 5, p. 388, 2023.
[11] W. Wiharto, H. Kusnanto e H. Herianto, "Interpretation of clinical data based on C4.5 algorithm for the diagnosis of coronary heart disease," *Healthcare Informatics Research*, vol. 22, no. 3, pp. 186–195, 2016.
[12] A. Kumar, K. U. Singh e M. Kumar, "A clinical data analysis-based diagnostic system for heart disease prediction using ensemble methods," *Big Data Mining and Analytics*, vol. 6, no. 4, pp. 513–525, 2023.
[13] Fedesoriano, "Heart Failure Prediction Dataset." Disponível em: https://www.kaggle.com/fedesoriano/heart-failure-prediction. Acesso em: 07 set. 2025.
[14] A. Lanka, "ECG of Cardiac Ailments Dataset," 2023. Disponível em: https://www.kaggle.com/dsv/5917467.
[15] T. Jackson e A. Radunskaya, *Applications of Dynamical Systems in Biology and Medicine*, vol. 158. Springer, 2015.
[16] J. Jaeger e N. Monk, "Bioattractors: Dynamical systems theory and the evolution of regulatory processes," *The Journal of Physiology*, vol. 592, no. 11, pp. 2267–2281, 2014.
[17] J. Honerkamp, *Stochastic Dynamical Systems: Concepts, Numerical Methods, Data Analysis*. John Wiley & Sons, 1996.
[18] S.-M. Chow, "Practical tools and guidelines for exploring and fitting linear and nonlinear dynamical systems models," *Multivariate Behavioral Research*, vol. 54, no. 5, pp. 690–718, 2019.
[19] S. H. Strogatz, *Nonlinear Dynamics and Chaos: With Applications to Physics, Biology, Chemistry, and Engineering*. Chapman and Hall/CRC, 2024.
[20] Y. Fang, M. Chen e X. Zheng, "Extracting features from phase space of EEG signals in brain–computer interfaces," *Neurocomputing*, vol. 151, pp. 1477–1485, 2015.
[21] M. B. Tayel e E. I. AlSaba, "Poincaré plot for heart rate variability," *International Journal of Biomedical and Biological Engineering*, vol. 9, no. 9, pp. 708–711, 2015.
[22] P. Kamen e A. M. Tonkin, "Application of the Poincaré plot to heart rate variability: A new measure of functional status in heart failure," *Australian and New Zealand Journal of Medicine*, vol. 25, no. 1, pp. 18–26, 1995.
[23] J. P. Huke, "Embedding nonlinear dynamical systems: A guide to Takens' theorem," 2006.
[24] G. C. R. Consortium, "Global effect of modifiable risk factors on cardiovascular disease and mortality," *New England Journal of Medicine*, vol. 389, no. 14, pp. 1273–1285, 2023.
[25] J. K. Sandhu et al., "Predicting the risk of heart failure based on clinical data," *Human-centric Computing and Information Sciences*, vol. 12, p. 57, 2022.
[26] E. Burns e R. Buttner, "The ST Segment." *Life in the Fast Lane*, 2024. Disponível em: https://litfl.com/st-segment-ecg-library/.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Modelo Probabilístico del Deshielo a partir de la Cobertura de Nieve y LST con Imágenes Landsat 8 en la Sierra Nevada de Santa Marta

Probabilistic Melt Model Based on Snow Cover and LST Using Landsat 8 Images in the Sierra Nevada de Santa Marta

Andrés Hernández
Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones.
Facultad de Ingeniería.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia.
jeahernandezn@udistrital.edu.co

Javier Medina
Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones.
Facultad de Ingeniería.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia.
rmedina@udistrital.edu.co

***Resumen* — Este artículo presenta un diagnóstico del deshielo en la Sierra Nevada de Santa Marta a partir de Landsat 8. El objetivo es estimar, entre fechas consecutivas, la probabilidad y la fracción o área esperada de pérdida de nieve integrando mapas de cobertura nival y temperatura superficial. La metodología combina tres pasos: clasificación supervisada de nieve en cinco clases mediante k de vecinos más cercanos; estimación y armonización de la temperatura superficial usando el producto térmico y un cálculo complementario desde la banda B10 con metadatos MTL para cubrir vacíos; y ajuste de un modelo probabilístico con regresión logística usando temperatura y tasa de cambio térmico, con calibración temporal para obtener probabilidades confiables. Como resultados, la clasificación alcanzó una precisión global de 99.90% y un Kappa de 0.9872; adicionalmente, el modelo produjo probabilidades por píxel coherentes con un AUC cercano a 0.80 para estimar la fracción y área esperada de deshielo por par de fechas.**

Palabras **Clave – Landsat 8; deshielo; LST; k-NN; regresión logística.**

Abstract* — *This article presents a diagnosis of snowmelt in the Sierra Nevada de Santa Marta based on Landsat 8 data. The objective is to estimate, between consecutive dates, the probability and expected fraction or area of snow loss by integrating snow cover and surface temperature maps. The methodology combines three steps: supervised classification of snow into five classes using k-nearest neighbors; estimation and harmonization of surface temperature using the thermal product and a complementary calculation from the B10 band with MTL metadata to fill gaps; and fitting a probabilistic model with logistic regression using temperature and thermal change rate, with temporal calibration to obtain reliable probabilities. As a result, the classification achieved an overall accuracy of 99.90% and a Kappa of 0.9872; additionally, the model produced consistent probabilities per pixel with an AUC close to 0.80 for estimating the expected fraction and area of thawing per date pair

Keywords – Landsat 8; melt; LST; k-NN; logistic regression.

I. Introducción

El estudio de las zonas nevadas alrededor del mundo parte del principio de alta reflectancia en el espectro visible, el cual permite diferenciar visualmente y absorber con fuerza en el SWIR (Short-Wave Infrared), diferenciándose de otras coberturas a partir del uso de índices como el NDSI (Normalized Difference Snow Index) [1], [2]; el cual se ha convertido en una referencia práctica en productos operativos y en validaciones cruzadas, ya que resume el contraste Verde–SWIR asociado a la respuesta espectral de la nieve [3], [2]. Cuando el interés es temporal, Landsat aporta una base sólida por su continuidad, cobertura global y amplio historial en estudios de dinámica terrestre y cambios de cobertura [4], [5].

En paralelo, la información térmica (TIR) ayuda a describir condiciones favorables para la ablación, y su uso como predictor compacto se alinea con la tradición de los enfoques tipo temperature-index o degree-day, donde la temperatura explica una parte relevante del derretimiento cuando no se modela explícitamente el balance de energía [6], [7]. En ambientes montañosos el reto es práctico: nubes y sombras generan vacíos y degradan la calidad tanto en lo óptico como en lo térmico, por lo que se requieren máscaras de calidad y estrategias de completado y armonización para sostener la comparabilidad entre fechas [8], [9].

Con ese contexto, este artículo se centra en cómo pasar de mapas de nieve y temperatura a un diagnóstico probabilístico de deshielo entre fechas consecutivas. Para ello, se integran tres componentes: un clasificador supervisado k-NN para obtener mapas de cobertura nival consistentes [10], [11]; un flujo térmico basado en conversiones radiométricas Landsat, desde DN (niveles digitales) a radiancia y luego a temperatura de brillo [12], [13], [14]; y una regresión logística calibrada, cuyo aporte principal es entregar probabilidades interpretables que pueden

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

agregarse para estimar fracción y área esperada de deshielo, evaluando su confiabilidad con Brier score y diagramas de confiabilidad [15], [16]. Finalmente, se reporta el AUC (Área bajo la curva) para describir capacidad de discriminación siguiendo criterios estándar basados en curvas ROC [17], sin desviarse de la estimación probabilística y su traducción a métricas espaciales de fracción y área.

II. Materiales y métodos

Se trabajó con escenas Landsat 8 en un conjunto de fechas donde existía de manera paralela, información óptica para la clasificación de nieve e información térmica para la temperatura superficial. Landsat es, en la práctica, una referencia para monitoreo de cambio terrestre y análisis multitemporal por la estabilidad de su misión y la continuidad de sus adquisiciones [4], [5].

El análisis se desarrolló en la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), un macizo montañoso tropical donde la presencia de nieve es altamente variable en el tiempo y se concentra en sectores de alta elevación. A continuación, se presenta una figura con la ubicación del área de estudio y el polígono de recorte utilizado, sobre el cual se estandarizó todo el procesamiento.

Figura 1. Localización del área de estudio

Para mantener un dominio espacial consistente y reducir el volumen de datos, todas las escenas se recortaron a la zona de estudio y se dejaron alineadas espacialmente, de modo que cada píxel fuera comparable entre fechas bajo la misma huella y resolución. Posteriormente, las fechas se organizaron como pares consecutivos. Con el fin de evitar intervalos demasiado largos que mezclen procesos físicos distintos y aumenten la ambigüedad temporal, se filtraron los pares cuya diferencia de días superaba noventa. Lo anterior dado que en datos geoespaciales el número real de observaciones no equivale al número de píxeles [18].

Finalmente, la Tabla I resume todas las fechas emparejadas disponibles (nieve y temperatura) y los pares consecutivos construidos a partir de ellas, junto con la diferencia de días entre cada par. Con base en esa disponibilidad temporal se definió una partición en tres etapas: entrenamiento (2014–2018) para ajustar el patrón general con la mayor cantidad de pares útiles y relativamente continuos; calibración (2019) para reescalar las probabilidades en un período distinto al entrenamiento; y prueba (2020) para evaluar generalización en un año posterior. La partición temporal se asignó según el año de la fecha t (inicio del par). El número de pares en 2020 es limitado por la disponibilidad de escenas emparejadas y por el filtrado de intervalos largos, aplicado para mantener comparabilidad entre pares.

Tabla I. Fechas, pares consecutivos y partición

Par	*Fecha inicial (t)*	*Fecha Final (t+1)*	*Diferencia días*	*Split*
1	17/01/2014	2/02/2014	16	TRAIN
2	2/02/2014	18/02/2014	16	TRAIN
3	18/02/2014	22/03/2014	32	TRAIN
4	22/03/2014	25/05/2014	64	TRAIN
6	4/01/2015	5/02/2015	32	TRAIN
7	5/02/2015	21/02/2015	16	TRAIN
8	21/02/2015	9/03/2015	16	TRAIN
11	22/12/2015	7/01/2016	16	TRAIN
12	7/01/2016	23/01/2016	16	TRAIN
13	23/01/2016	8/02/2016	16	TRAIN
14	8/02/2016	24/02/2016	16	TRAIN
15	24/02/2016	27/03/2016	32	TRAIN
17	12/01/2018	28/01/2018	16	TRAIN
18	28/01/2018	1/03/2018	32	TRAIN
20	28/11/2018	30/12/2018	32	TRAIN
21	30/12/2018	15/01/2019	16	TRAIN
22	15/01/2019	16/02/2019	32	CAL
24	1/12/2019	2/01/2020	32	CAL
25	2/01/2020	3/02/2020	32	TEST
26	3/02/2020	6/03/2020	32	TEST
27	6/03/2020	22/03/2020	16	TEST

III. Metodología

A. Clasificación supervisada de cobertura nevada (k-NN)

Se definieron cinco clases: (1) Nieve, (2) Nieve-Sombra, (3) Nieve en roca, (4) Lama y (5) Roca. Esta partición se adoptó por un criterio práctico: separar coberturas que en la zona tienden a confundirse, especialmente por efectos de iluminación y mezcla espectral en bordes nieve–roca. A partir de ROIs por clase se extrajeron vectores de características espectrales y se entrenó un clasificador k de vecinos más cercanos. Se fijó k = 11 tras una evaluación iterativa de k y métricas (precisión, recall, F1 y precisión macro) sobre las muestras etiquetadas. Este enfoque es un método clásico y muy usado en clasificación supervisada, porque decide la etiqueta de un píxel comparándolo con ejemplos de entrenamiento cercanos en el espacio de características [10], [11]. En este trabajo el método responde bien, dado que las clases están bien representadas en los datos y las diferencias espectrales entre coberturas son suficientemente marcadas [10], [11].

La evaluación del clasificador se reporta con Exactitud Global, coeficiente Kappa, matriz de confusión y métricas por clase, como precisión y sensibilidad. Este conjunto de indicadores es estándar en clasificación temática: la Exactitud Global resume el desempeño general, el coeficiente Kappa aporta una medida adicional de acuerdo más allá del azar, y la matriz de confusión permite ver de forma directa en qué clases ocurren los errores y qué coberturas tienden a confundirse entre sí [19], [20]. En la interpretación del coeficiente Kappa, un valor superior a 0.8 se considera bueno dado que refleja mejor consistencia.

B. Validación independiente con NDSI (umbral NDSI mayor o igual a 0.4)

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Para una validación externa, independiente del entrenamiento del k de vecinos más cercanos, se calculó el índice NDSI [1], [2]. En este índice, a variable rGreen representa la reflectancia en la banda verde y rSWIR representa la reflectancia en la banda del infrarrojo de onda corta. El NDSI se calculó como:

$$NDSI = (rGreen - rSWIR) / (rGreen + rSWIR) \quad (1)$$

Luego, se construyó una máscara binaria aplicando un umbral de NDSI mayor o igual que 0.4, en línea con enfoques de estimación de nieve basados en NDSI [3], [2]. Esta máscara se comparó con la clasificación obtenida por k de vecinos más cercanos, reduciendo primero la salida multiclase a un esquema binario de nieve y no nieve. Como medida de acuerdo, se calculó el coeficiente Kappa por fecha [20]. Esta validación resulta especialmente pertinente en ambientes de montaña, donde la presencia de sombras topográficas y la mezcla espectral entre nieve y roca afectan la separabilidad de la nieve en productos ópticos; por ello, el análisis fecha a fecha permite identificar intervalos con mayor discrepancia dentro de la serie temporal [1],[2].

C. Temperatura superficial (LST): producto térmico + apoyo con B10 (Level-1 + MTL) y armonización.

La temperatura superficial derivada de sensores térmicos depende de una cadena de procesamiento que incluye correcciones radiométricas, consideraciones de emisividad y condiciones atmosféricas, aspectos ampliamente discutidos en la literatura de LST satelital [9]. En el caso de Landsat, la banda térmica permite obtener temperatura de brillo y, a partir de allí, aproximaciones consistentes de temperatura para análisis comparativos entre fechas, siempre que se mantenga un procedimiento homogéneo de conversión y control de calidad [9], [12], [13], [14].

1) *Procesamiento desde B10 (Level-1 + MTL):* Para estimar la temperatura a partir de la banda térmica cruda, se procesó B10 (Level-1) usando los parámetros del archivo MTL, siguiendo las conversiones estándar documentadas por Landsat [12], [13]. El flujo aplicado fue:

Radiancia:

$$L_l = M_L \cdot Q_{cal} + A_L \quad (2)$$

Temperatura grados Kelvin:

$$T_K = K_2/\ln(K_1/L_l + 1) \quad (3)$$

Conversión a Celsius:

$$T_{°C} = T_K - 273.15 \quad (4)$$

Uso complementario de LST procesada y manejo de vacíos: En Landsat, la identificación de nubes y sombras, así como el control de calidad, se apoya en aproximaciones tipo Fmask y reglas espectrales u objetuales [8]. Por esta razón, además de la capa térmica principal, se utilizó la estimación obtenida desde B10 (Level-1) como una fuente alternativa para reconstrucción local en píxeles faltantes.

Interpolación/armonización guiada por NDVI y NDSI: Se aplicó una estrategia de completado y armonización para tratar vacíos en la capa térmica. Cuando una escena presentaba píxeles faltantes, estos se reemplazaron con valores estimados de forma independiente desde B10 de nivel 1, manteniendo un respaldo térmico consistente por fecha. Posteriormente, se aplicó una interpolación espacial guiada por NDVI y NDSI para que el relleno conservara patrones y transiciones coherentes entre coberturas, especialmente en zonas de contacto entre vegetación, nieve y superficies rocosas. Esta decisión se apoya en relaciones documentadas entre NDVI y propiedades radiativas relevantes para la estimación térmica, así como en evidencia del vínculo entre LST y cobertura vegetal [21] [22] [9]. En zonas enmascaradas, el valor reconstruido de ST se usa con fines operativos de continuidad y no equivale a observación directa del producto térmico original.

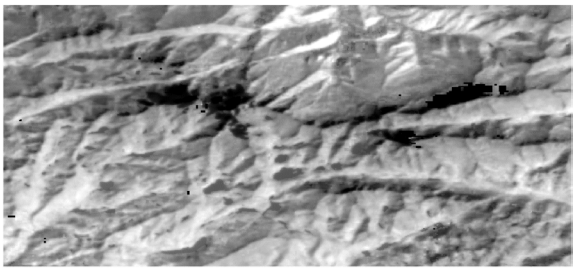


Figura 2. Land Surface Temperature con vacios

D. Definición del evento "deshielo" entre fechas

El evento de deshielo se definió como la pérdida de nieve entre dos fechas consecutivas. En términos operativos, para cada píxel se evalúa si estaba clasificado como nieve en la fecha inicial y deja de estarlo en la fecha siguiente. Esta definición se expresa con una función indicadora, que toma el valor de uno cuando se cumple la condición y cero en caso contrario:

$$Melt(x) = 1 \ \{Snow_t(x) = 1 \wedge Snow_{t+1}(x) = 0\} \quad (5)$$

Para evitar inconsistencias, el entrenamiento se restringió a píxeles con nieve en la fecha inicial y variables térmicas válidas (temperatura y tasa), de modo que el cálculo sea comparable entre fechas y no dependa de píxeles afectados por máscaras de calidad [8].

E. Modelo probabilístico de deshielo (GLM logit) y lógica física

El deshielo, definido como presencia o ausencia del evento Melt, se modeló mediante un modelo lineal generalizado binomial con enlace logit, es decir, una regresión logística. Este enfoque es apropiado cuando la variable respuesta es binaria, porque transforma la probabilidad a una escala lineal y permite estimar de forma directa cómo cambian esas probabilidades cuando varían los predictores [11]. Los predictores se definieron a partir de la temperatura superficial en la fecha inicial y su cambio entre fechas, expresado como una tasa:

$$dTempRate = (Temp_{t+1} - Temp_t)/\text{diferencia días} \quad (6)$$

Esta elección relaciona el deshielo principalmente con temperatura, ya sea por acumulación en el tiempo o por su comportamiento entre fechas. En la práctica, estos enfoques son útiles cuando no se dispone de todas las variables necesarias para resolver explícitamente el balance de energía, pero se requiere un predictor compacto que represente condiciones favorables para ablación [6], [7]. En esta investigación, la temperatura y su tasa de cambio funcionan como un resumen físico razonable del

ISBN: 978-989-36481-2-4

ambiente térmico asociado a la pérdida de nieve.

El modelo se expresa como:

$$\text{logit}(p) = b_0 + b_1 \text{TempC} + b_2 \text{dTempRate} \quad (7)$$

Donde p es la probabilidad de que ocurra el deshielo en el pixel entre la fecha inicial y la fecha siguiente.

F. Calibración temporal (probabilidades confiables)

Dado que el objetivo aplicado incluye estimar fracción y área esperada de deshielo a partir de probabilidades, se calibraron las probabilidades utilizando un año completo fuera del entrenamiento (calibración en 2019). Se aplicó un calibrador logístico sobre el logit de la probabilidad cruda:

$$P_{cal} = s(a + b\,(\text{logit}(p_{raw})) \quad (8)$$

La calibración probabilística se justifica porque el Brier score es una regla de puntuación propia para probabilidades [15] y su análisis motiva el uso de diagramas de confiabilidad como diagnóstico de sobreconfianza o subconfianza [16]. En aprendizaje supervisado, también se reconoce que los modelos pueden producir probabilidades mal escaladas, por lo que se han propuesto métodos de transformación de puntajes y estrategias de calibración para mejorar la calidad probabilística [23], [24], junto con desarrollos posteriores en calibración [25] [26].

G. Validación: discriminación, calibración y validación por fracción/área

Se estableció un flujo de trabajo consistente, iniciando con:

1) *Discriminación: ROC-AUC en TEST 2020, siguiendo la interpretación estándar de ROC [17].*
2) *Calibración: Brier score y reliability diagrams, sustentados en verificación probabilística [15], [16], [26].*
3) *Validación por fracción/área: En cada par del TEST se calculó fracción observada (x), fracción esperada (X) y área observada/esperada.*

$$\text{Fracción observada: } \text{MeltObs}_f = \#\text{Melt}/\#\text{Valid} \quad (9)$$

$$\text{Fracción esperada: } \text{Meltexp}_f = \text{mean}(p) \quad (10)$$

$$\text{Área obs/esperada: } \#\text{Melt} * A_{pix} \;\&\; \text{Sum } p_i * A_{pix} \quad (11)$$

Este tercer nivel permite estimar magnitudes agregadas (fracción/área) coherentes con probabilidades bien calibradas [15], [16], [26]. Dado que los píxeles no son independientes espacialmente, se reportan resultados por pares temporales y métricas agregadas, como se recomienda en estrategias de validación para datos con estructura temporal/espacial [18].

IV. Resultados

A. Clasificación de nieve (k-NN)

El clasificador multiclase obtuvo una Precisión Global de 99.90% y un coeficiente Kappa de 0.9872. En general, las métricas por clase muestran un desempeño alto y estable: la clase 1 (Nieve) presentó recall de 0.99077 y precisión de 0.99306, mientras que la clase 5 (Roca) alcanzó recall de 1.00000 y precisión de 0.99958. El valor más bajo de recall se observó en la clase 2 (Nieve-Sombra), con 0.91837, lo que sugiere que esta clase concentra la mayor parte de la dificultad relativa, consistente con escenarios donde la iluminación reduce contrastes espectrales y acerca su respuesta a coberturas vecinas [3], [1], [2]. Estas métricas se reportan junto con la matriz de confusión y la evaluación por clase, y se complementan con una verificación externa por fecha basada en NDSI, para contextualizar el desempeño más allá de una única cifra global.

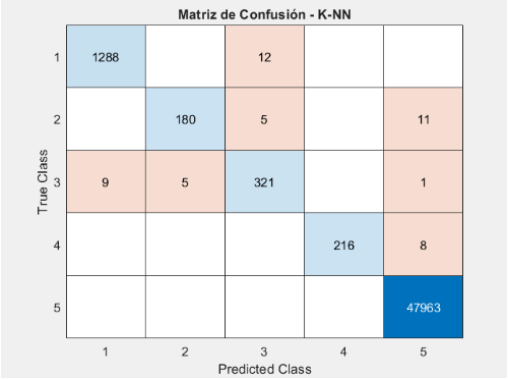


Figura 3. Matriz de confusion k-NN

Tabla II. Exactitud Global , Kappa y Precisión/Recall por clase

Precisión Global:		99.90%
Coeficiente Kappa:		0.9872
Clase	***Recall***	***Precisión***
1	0.99077	0.99306
2	0.91837	0.97297
3	0.95536	0.9497
4	0.96429	1
5	1	0.99958

B. Validación con NDSI (umbral 0.4)

La serie temporal del coeficiente Kappa entre la máscara NDSI y la clasificación binaria derivada del k-NN de la fig. 4, presenta variabilidad entre fechas. El comportamiento observado indica que existen escenas con alta concordancia y otras donde el acuerdo disminuye, lo cual es coherente con el hecho de que el rendimiento del NDSI se afecta en condiciones de sombra topográfica y mezcla espectral entre nieve y roca [3], [1], [2]. Esta variación por fecha permite reconocer que la consistencia de la delimitación de nieve no es uniforme en toda la serie, sino que depende de las condiciones de escena presentes en cada adquisición.

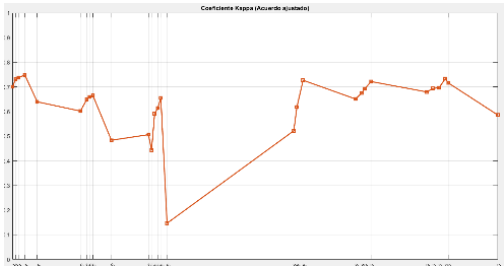


Figura 4. (NDSI vs k-NN)

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

C. Resultados de LST y completado de vacíos

En las escenas térmicas se observaron vacíos asociados a enmascaramiento por nubes, sombras y criterios de calidad. Tras la reconstrucción y el completado, se obtuvo una LST final continua en el dominio de análisis, eliminando los valores faltantes que aparecían como ceros en la salida original. Esto permite calcular de forma consistente la temperatura inicial y su cambio entre pares consecutivos dentro del mismo marco espacial [8], [9]. En la fig. 5 se muestra una imagen de LST con vacíos completos.

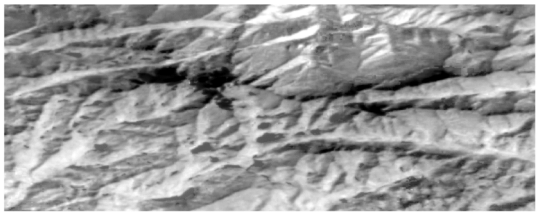


Figura 5. LST final sin vacios

D. Modelo probabilístico de deshielo

El desempeño del modelo se reporta desde tres ángulos complementarios: la discriminación, medida con el AUC [17], la calidad probabilística, evaluada con el Brier score y el diagrama de confiabilidad [15], [16] y el objetivo aplicado del diagnóstico, cuantificado como el error absoluto medio al estimar la fracción esperada de deshielo (MAE de fracción), que es la magnitud que luego se traduce a área al sumar probabilidades sobre los píxeles de nieve inicial.

En la fig. 6, e muestra el diagrama de confiabilidad obtenido tras la calibración. La línea punteada representa el comportamiento ideal. En este caso, la curva se ubica por debajo de la diagonal en gran parte del rango medio y alto, lo que indica que, para esos intervalos de probabilidad, el modelo tiende a sobreestimar la ocurrencia del evento. Aun así, la curva mantiene una tendencia creciente y ordenada, lo que sugiere consistencia interna en el escalamiento de probabilidades.

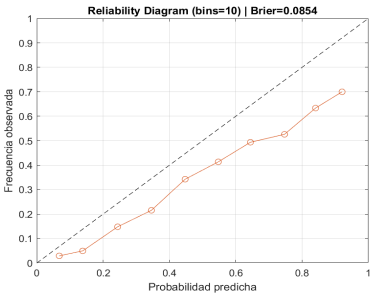


Figura 6. Diagrama de confiabilidad del modelo calibrado y valor de Brier

La Tabla III resume, para cada par de fechas evaluado, el área de nieve inicial disponible para análisis (Snow0Area), el deshielo observado (MeltObs) y el deshielo esperado por el modelo antes y después de calibración (MeltExpRAW y MeltExpCAL), tanto en kilómetros cuadrados como en fracción.

Tabla III. Tabla de validación de área por par

Par	Snow0Area_km2	MeltObs_km2	MeltExpRAW_km2	MeltExpCAL_km2	MeltExpCAL_frac
25	8.824	0.901	1.295	1.109	0.126
26	8.496	0.975	1.908	1.686	0.198
27	7.985	0.760	2.032	1.820	0.228

Adicionalmente, se generan mapas ráster por par de fechas, donde cada píxel válido dentro del dominio de nieve inicial queda asociado a una probabilidad de deshielo para ese intervalo. En la fig. 7, se presenta un ejemplo de salida: los píxeles con valor NoData corresponden a zonas fuera del dominio válido, mientras que los píxeles con valores distintos de NoData representan la probabilidad estimada de pérdida de nieve.

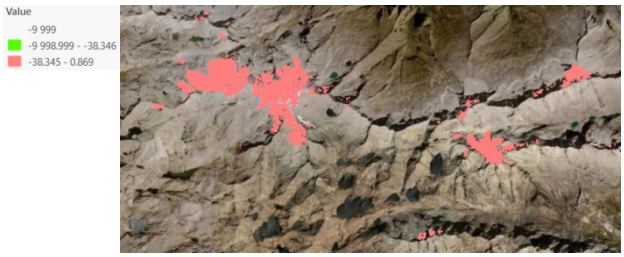


Figura 7. Ejemplo de mapa de probabilidad de deshielo generado por el modelo para un par de fechas (probabilidades calibradas).

V. Discusión

La clasificación de nieve presentó un desempeño alto (precisión global de 99.90% y Kappa de 0.9872) y el principal foco de dificultad se concentró en nieve con sombra, consistente con escenarios donde la iluminación reduce el contraste espectral y aumenta confusiones con coberturas vecinas [3], [1], [2].

En temperatura, el resultado clave fue obtener una LST final sin vacíos operativos, permitiendo calcular de forma consistente la temperatura inicial y su tasa de cambio en los pares evaluados. Esto define el dominio efectivo del análisis (nieve inicial con temperatura utilizable), por lo que el reporte de Snow0Area y las fracciones de la Tabla III es esencial para interpretar los resultados.

En el modelo probabilístico, el diagrama de confiabilidad y la validación por pares evidencian sobreestimación en rangos medios y altos antes de calibrar, mientras que la calibración acerca las fracciones y áreas esperadas a las observadas, mejorando el uso práctico de probabilidades integradas (suma de probabilidades) [15], [16]. El AUC resume discriminación [17], pero el desempeño aplicado se interpreta mejor con calibración y validación por par. Finalmente, los resultados se analizan por pares de fechas para respetar la estructura espacial y temporal de los datos, en línea con recomendaciones de validación con dependencia [18].

VI. Conclusiones

Se concluye que la clasificación de nieve es sólida en el marco del estudio, sustentada por su desempeño cuantitativo

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

(Precisión Global de 99.90% y coeficiente Kappa de 0.9872), junto con métricas por clase y la matriz de confusión, que muestran un comportamiento consistente.

En temperatura, el procesamiento sistemático de la banda térmica permitió generar salidas comparables entre fechas, y el completado de vacíos redujo discontinuidades que limitaban la comparación temporal. No obstante, este completado se considera una solución práctica para continuidad espacial y operativa; por tanto, debe tenerse cuidado en zonas donde el sensor no tuvo observación directa.

En el componente de deshielo, el enfoque probabilístico permitió pasar de una decisión binaria por píxel a métricas agregadas más interpretables, como fracción y área esperada, coherentes con el objetivo diagnóstico del estudio. Asimismo, se observó que intervalos temporales muy largos entre imágenes afectan la interpretación del cambio, por lo que controlar la separación temporal entre pares resulta determinante para mantener comparaciones físicamente razonables.

Como trabajo futuro, se propone incorporar variables adicionales como topografía, precipitación y albedo, y ampliar la evaluación temporal para analizar estabilidad y sensibilidad del modelo. También es recomendable fortalecer la validación externa con productos de referencia o datos de campo y reportar incertidumbre por escena, con el fin de mejorar la robustez del diagnóstico sin sobreestimar el alcance de los hallazgos.

Referencias Bibliográficas

[1] J. Dozier, "Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper," Remote Sens. Environ., vol. 28, no. 1, pp. 9–22, 1989, doi: 10.1016/0034-4257(89)90101-6.

[2] V. V. Salomonson and I. Appel, "Estimating fractional snow cover from MODIS using the normalized difference snow index," Remote Sens. Environ., vol. 89, no. 3, pp. 351–360, 2004, doi: 10.1016/J.RSE.2003.10.016.

[3] D. K. Hall, G. A. Riggs, V. V. Salomonson, N. E. DiGirolamo, and K. J. Bayr, "MODIS snow-cover products," Remote Sens. Environ., vol. 83, no. 1–2, pp. 181–194, 2002, doi: 10.1016/S0034-4257(02)00095-0.

[4] M. A. Wulder et al., "Current status of the Landsat program, science, and applications," Remote Sens. Environ., vol. 225, pp. 127–147, 2019, doi: 10.1016/J.RSE.2019.02.015.

[5] D. P. Roy et al., "Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research," Remote Sens. Environ., vol. 145, pp. 154–172, 2014, doi: 10.1016/J.RSE.2014.02.001.

[6] R. Hock, "Temperature index melt modelling in mountain areas," J. Hydrol., vol. 282, no. 1–4, pp. 104–115, 2003, doi: 10.1016/S0022-1694(03)00257-9.

[7] R. J. Braithwaite, "Positive degree-day factors for ablation on the Greenland ice sheet," J. Glaciol., vol. 41, no. 137, pp. 153–160, 1995, doi: 10.1017/S0022143000017846.

[8] Z. Zhu and C. E. Woodcock, "Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery," Remote Sens. Environ., vol. 118, pp. 83–94, 2012, doi: 10.1016/j.rse.2011.10.028.

[9] Z.-L. Li et al., "Satellite-derived land surface temperature: Current status and perspectives," Remote Sens. Environ., vol. 131, pp. 14–37, 2013, doi: 10.1016/J.RSE.2012.12.008.

[10] T. M. Cover and P. E. Hart, "Nearest neighbor pattern classification," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 13, no. 1, pp. 21–27, 1967, doi: 10.1109/TIT.1967.1053964.

[11] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman, The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2009.

[12] U.S. Geological Survey, Landsat 8 (L8) data users handbook. Sioux Falls, SD, USA: U.S. Geological Survey, 2019.

[13] J. A. Sobrino, J. C. Jiménez-Muñoz, and L. Paolini, "Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5," Remote Sens. Environ., vol. 90, no. 4, pp. 434–440, 2004, doi: 10.1016/j.rse.2004.02.003.

[14] J. C. Jiménez-Muñoz, J. A. Sobrino, D. Skoković, C. Mattar, and J. Cristóbal, "Land surface temperature retrieval methods from Landsat-8 thermal infrared sensor data," IEEE Geosci. Remote Sens. Lett., vol. 11, no. 10, pp. 1840–1843, 2014, doi: 10.1109/LGRS.2014.2312032.

[15] G. W. Brier, "Verification of forecasts expressed in terms of probability," Mon. Weather Rev., vol. 78, no. 1, pp. 1–3, 1950, doi: 10.1175/1520-0493(1950)078<0001:VOFETI>2.0.CO;2.

[16] A. H. Murphy, "A new vector partition of the probability score," J. Appl. Meteorol., vol. 12, no. 4, pp. 595–600, 1973, doi: 10.1175/1520-0450(1973)012<0595:ANVPOT>2.0.CO;2.

[17] T. Fawcett, "An introduction to ROC analysis," Pattern Recognit. Lett., vol. 27, no. 8, pp. 861–874, 2006, doi: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.

[18] D. R. Roberts et al., "Cross-validation strategies for data with temporal, spatial, hierarchical, or phylogenetic structure," Ecography, vol. 40, no. 8, pp. 913–929, 2017, doi: 10.1111/ecog.02881.

[19] R. G. Congalton, "A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data," Remote Sens. Environ., vol. 37, no. 1, pp. 35–46, 1991, doi: 10.1016/0034-4257(91)90048-B.

[20] J. Cohen, "A coefficient of agreement for nominal scales," Educ. Psychol. Meas., vol. 20, no. 1, pp. 37–46, 1960, doi: 10.1177/001316446002000104.

[21] A. A. van de Griend and M. Owe, "On the relationship between thermal emissivity and the normalized difference vegetation index for natural surfaces," Int. J. Remote Sens., vol. 14, no. 6, pp. 1119–1131, 1993, doi: 10.1080/01431169308904400.

[22] Q. Weng, P. Fu, and F. Gao, "Generating daily land surface temperature at Landsat resolution by fusing Landsat and MODIS data," Remote Sens. Environ., vol. 145, pp. 55–67, 2014, doi: 10.1016/J.RSE.2014.02.003.

[23] A. Niculescu-Mizil and R. Caruana, "Predicting good probabilities with supervised learning," in Proc. 22nd Int. Conf. Mach. Learn. (ICML), 2005, pp. 625–632, doi: 10.1145/1102351.1102430.

[24] B. Zadrozny and C. Elkan, "Transforming classifier scores into accurate multiclass probability estimates," in Proc. 8th ACM SIGKDD Int. Conf. Knowl. Discov. Data Min. (KDD), 2002, pp. 694–699, doi: 10.1145/775047.775151.

[25] C. Guo, G. Pleiss, Y. Sun, and K. Q. Weinberger, "On calibration of modern neural networks," in Proc. 34th Int. Conf. Mach. Learn. (ICML), Proc. Mach. Learn. Res., vol. 70, pp. 1321–1330, 2017. [Online]. Available: https://proceedings.mlr.press/v70/guo17a.html

[26] T. Gneiting and A. E. Raftery, "Strictly proper scoring rules, prediction, and estimation," J. Amer. Stat. Assoc., vol. 102, no. 477, pp. 359–378, 2007, doi: 10.1198/016214506000001437.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Comparación e implementación en Matlab de la fusion de imágenes satelitales Ikonos usando redes neuronales y ACP

Comparison and implementation in Matlab of the fusion of Ikonos satellite images using neural networks and PCA

Javier Medina
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería, Doctorado en Ingeniería Grupo GEFEM, Bogotá D. C., Colombia
rmedina@udistrital.edu.co

Erika Upegui
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería, Grupo GEFEM, IEEE-UD/GRSS
Bogotá D. C., Colombia
esupeguic@udistrital.edu.co

***Resumen* — Este artículo tiene como objetivos implementar y evaluar en Matlab dos metodologías que permiten mejorar la resolución espacial sin pérdida significativa de la resolución espectral de una imagen multiespectral (MULTI) y pancromática (PAN) Ikonos. En el primer método se usa el algoritmo Análisis de Componentes Principales (ACP). A partir de la imagen MULTI se obtienen las componentes principales CP1, CP2 y CP3. Luego se ajusta la CP1 a la imagen PAN obteniendo ACP1-PAN, para ser remplazada por la componente CP1, luego se realiza inversa de componentes principales con los componentes ACP1-PAN, CP2 y CP3 obteniendo así la imagen fusionada N-MULTIACP. En la segunda metodología se usa redes neuronales, alexnet, darknet19 y vgg19 usando las dos imágenes MULTI y PAN para generar tres imágenes fusionadas N-MULTIA, N-MULTID y , N-MULTIV. Finalmente se presentan los resultados de los dos métodos usando los índices: Coeficiente de Correlación, ERGAS, RASE y Qu para su evaluación. Se obtiene que el método de ACP es mejor espacialmente y las imágenes obtenidas usando redes neuronales degrada en menor valor la riqueza espectral.**

Palabras **Clave Analísis de Componentes principales; Aprendizaje profundo; fusión de imágenes satelitales.**

***Abstract* — This article aims to implement and evaluate in Matlab two methodologies that improve the spatial resolution of Ikonos multispectral (MULTI) and panchromatic (PAN) images without significant loss of spectral resolution. The first method uses the Principal Component Analysis algorithm (PCA). From the MULTI image, the principal components CP1, CP2, and CP3 are obtained. CP1 is then fitted to the PAN image, yielding ACP1-PAN, which is replaced by CP1. Inverse principal component analysis is then performed on the ACP1-PAN, CP2, and CP3 components, resulting in the fused image N-MULTIACP. The second methodology uses neural networks (alexnet, darknet19, and vgg19) with the two MULTI and PAN images to generate three fused images: N-MULTIA, N-MULTID, and N-MULTIV. Finally, the results of both methods are presented using Correlation Coefficient, ERGAS, RASE, and Qu indices for evaluation. It is found that the PCA method is spatially better and the images obtained using neural networks degrade the spectral richness to a lesser extent.**

Keywords - Principal Component Analysis; deep learning; Fusion of satellite images.

I. Introducción

La fusión de imágenes de teledetección de muy alta resolución o pansharpening consiste en añadir o inyectar la información espacial que contiene la imagen pancromática a las bandas espectrales de la imagen Multiespectral, preservando las características espectrales de ésta. Sin embargo, en este proceso se introducen distorsiones, además de las inherentes al registro de los datos Multiespectral (MULTI) y Pancromática (PAN). En este contexto, para intentar evitar este inconveniente, a lo largo de la última década se han desarrollado multitud de algoritmos de pansharpening [1]. Sin embargo, no existe en la actualidad ninguno que se postule como la solución óptima para la fusión de imágenes.

Actualmente la inteligencia artificial (IA) es una disciplina en auge que ha redefinido muchos de los procesos que se realizan en la industria, presentando aplicaciones muy diversas, las cuales abarcan el reconocimiento de objetos mediante visión artificial, reconocimiento y síntesis de voz, comprensión lectora, sistemas de traducción, comprensión del lenguaje, etc. [2]. La IA no es un término nuevo, pues existe desde hace muchos años; sin embargo, lo que ha cambiado en las últimas épocas es la potencia computacional, con la cual se pueden computar modelos mucho más complejos en un menor tiempo [3]. Se la define como un conjunto de algoritmos cuyo propósito es crear máquinas que emulen las capacidades de los seres humanos. Visto de otra manera, es un software que puede ser entrenado para reconocer patrones y realizar predicciones, en algunos casos de manera más precisa que los seres humanos [4]. Dentro de la IA, encontramos términos como el machine learning (ML) y el deep learning (DL) [5].

Machine Learning (ML) o aprendizaje automático, es una

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

rama de la IA que busca generalizar comportamientos de un conjunto de datos de entrada, es decir, que su objetivo es predecir comportamientos futuros basados en encontrar patrones dentro de grandes conjuntos de datos [6]. A su vez, el DL o aprendizaje profundo, forma parte del machine learning [7], cuyo objetivo es que los sistemas imiten el comportamiento y el razonamiento de las personas automáticamente; en otras palabras, que el ser humano esté involucrado lo menos posible en el proceso. Este objetivo se basa en el uso de redes neuronales artificiales (ANN), las cuales simulan la sinapsis del cerebro humano [8]. En la figura 1 se puede apreciar la estructura tradicional de una red neuronal artificial, en la que se incluyen la capa de entrada, capas ocultas y la capa de salida

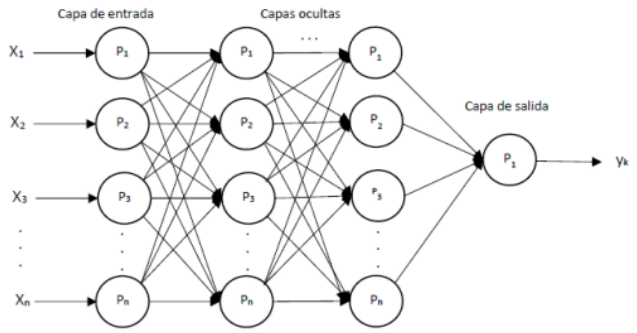


Figura 1. Estructura de una red neuronal artificial [9]

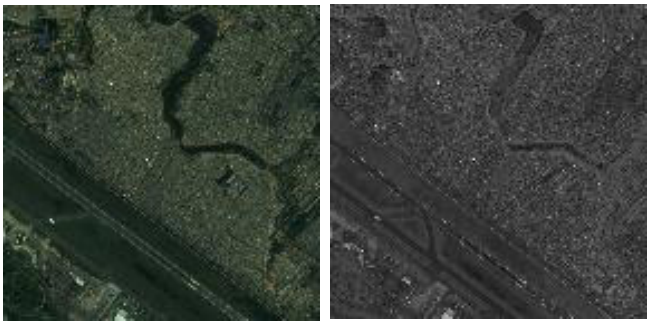
El objetivo principal de este artículo es evaluar la eficiencia de la fusión de imágenes con dos métodos Análisis de Componentes Principales con tres redes darknet19, vgg19 y alexnet con análisis de componentes principales para fusionar una sub-escena de una imagen RGB del satélite Ikonos con una imagen pancromática del mismo sensor, para generar una imagen fusionada N-RGB. Se exponen los resultados de la fusión de imágenes usando deep learning y ACP. La implementación se realizado en Matlab usando los toolbox de Wavelet, Procesamiento Digital de Imágenes, Mapping en Matlab y Deep Learning en MATLAB se realiza principalmente a través de Deep Learning Toolbox, que permite diseñar, entrenar, simular y desplegar redes neuronales profundas (CNN, RNN, LSTM Ofrece herramientas interactivas como **Deep Network Designer** para crear arquitecturas, soporta transferencia de aprendizaje con modelos preentrenados y permite la aceleración en GPU/nube se realizan los dos métodos anteriormente descritos. La evaluación de la fusión se realiza a través de cuatro indicadores, a saber, el índice de calidad Universal Qu , el índice RASE, Coeficiente de correlación y ERGAS espacial y espectral. Obteniendo mejores resultados a nivel espacial con ACP y degrada en menor valor la riqueza espectral usando las redes darknet19, vgg19 y alexnet.

II. Materiales y Metodos

Para abordar la metodología de los dos métodos propuestos, se comenzará con la descripción de las imágenes satelitales correspondientes a la zona de estudio.

A. Zona de Estudio

El área de estudio se localiza en Colombia, específicamente en el sector nor-occidental de Bogotá D. C., (parte del aeropuerto)es una zona cubierta por una sub-imagen Ikonos tanto pancromática (PAN) como multiespectral (MULT) como se ve en la figura 2. La sub-imagen PAN tiene una resolución espacial de un (1) metros, y fue tomada el 21 de abril de 2017; su sistema de referencia corresponde a UTM/WGS 84. La sub-imagen MULTI cuenta con 4 canales, pero solo tres canales son usados en esta investigación (R-rojo, G-verde y B-azul) y tiene una resolución espacial de cuatro (4) metros; fue adquirida la misma fecha que la PAN y tiene el mismo sistema de referencia. Las dos imágenes fueron recortadas con un ancho de 2048 y un alto de 2048 pixeles (ver figura 2).



a) b)

Figura 2. a) Sub-imagen MULTI y b) sub-imagen PAN de tamaño 2187x2217 pixeles

Técnicamente, para que la fusión tenga éxito se deben cumplir tres requisitos, a saber, [10].

1. La Georreferenciación o corregistración de las imágenes involucradas, debe ser la misma. Es decir, la ubicación de los objetos en el espacio debe coincidir.
2. La extensión de las imágenes debe ser la misma, en otras palabras, la cantidad de líneas y columnas debe ser igual.
3. El tamaño del pixel, también debe ser igual en todas las bandas involucradas.

Los dos métodos fueron implementados en Matlab R20201, usando el toolbox de procesamiento y Mapping toolbox. Los pasos seguidos para implementación se describen a continuación:

B. Método de fusion de imagenes udando Análisis de Componetes Principales

El análisis en componente principales, también denominado transformación PCA (de sus siglas en inglés Principal Component Analysis) o transformada de Karhunen-Loève o Hotelling [11], crea nuevas imágenes a partir de las imágenes originales, llamadas componentes principales (CP), no correlacionadas entre sí, que reorganizan la información original. Con las componentes principales se elimina esa información redundante entre componentes, de forma que la primera CP se define como la dirección a lo largo de la cual la varianza de los datos tiene su máximo. Es decir, la esencia del análisis en componentes principales es la transformación de un conjunto de variables correlacionadas en un nuevo conjunto de variables no correlacionadas. Tal y como se puede observar en la figura 3, el proceso a seguir para desarrollar este método de fusión es el que se presenta a continuación. En primer lugar, se obtienen

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

tantas componentes principales como bandas tenga la imagen multiespectral. De este modo, la CP1 contiene información espacial, y las CP restantes la información espectral. A continuación, se iguala el histograma de la imagen pancromática al de la primera componente principal CP1, es decir, a aquella que contiene información relativa al conjunto de las bandas.

La imagen pancromática modificada (una vez ajustado su histograma) sustituye a la primera componente principal CP1. Aplicando a estas bandas la transformación inversa se obtienen las bandas de la imagen fusionada (ver figura 3).

Una de las ventajas de este método es que no está limitado a imágenes de 3 bandas, sino que puede utilizarse para un número ilimitado de bandas. Sin embargo, introduce distorsión espectral en la imagen fusionada. Esto es así pues se parte de la base de que tras la transformación PCA, la disociación entre información espacial y espectral de la imagen multiespectral es total, pero esto no es así. Computacionalmente este algoritmo de fusión es pesado, ya que implica la realización del cálculo de la matriz de covarianza, el cálculo de los autovalores y autovectores, generar la matriz ortogonal y diversas operaciones algebraicas (producto de matrices, matrices inversas, transposiciones, etc.) para generar las componentes principales CP1, CP2 hasta CPN, donde N corresponderá al número de bandas de la imagen multiespectral.

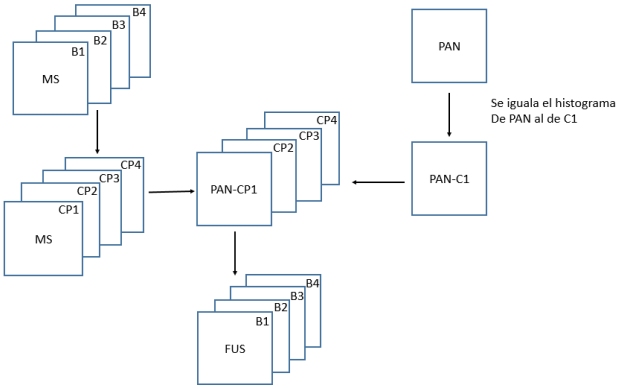


Figura 3. Algoritmo de fusión PCA.

C. Fusión de imágenes usando redes neuronales vgg19, darknet19 y alexnet.

En el estudio se consideraron tres arquitecturas de modelos previamente entrenados mediante em Matlab son más rápidos y fáciles de implementar y entrenar. Las arquitecturas utilizadas fueron:

1. Vgg19

Red neuronal convolucional compuesta por 16 capas convolucionales [12], tres fully-connected, cinco MaxPool y una SoftMax, con un aproximado de 143 millones de parámetros. La arquitectura de VGG19 se aprecia en la figura 4.

2. Darknet19

Red oscura-19es unaRed neuronal convolucional (CNN) de 19 capas, diseñada como un modelo ligero y rápido para la clasificación de imágenes y la detección de objetos., utilizado principalmente como el "backbone" (espina dorsal) o extractor de características en YOLOv2 (You Only Look Once). Entrenado en el conjunto de datos ImageNet, utiliza filtros de 3x3 y agrupación promedio global, lo que lo hace más eficiente y preciso que los modelos anteriores como se aprecia en la figura 5.

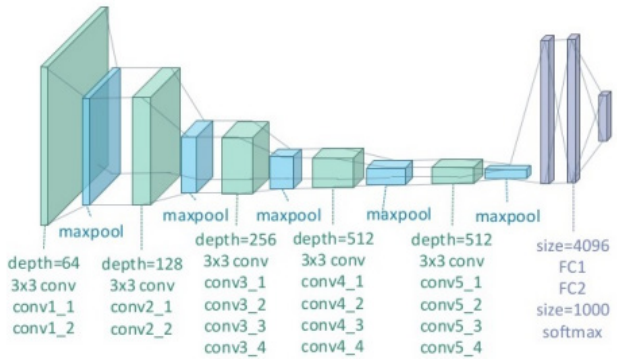


Figura 4. Arquitectura VGG19 [12].

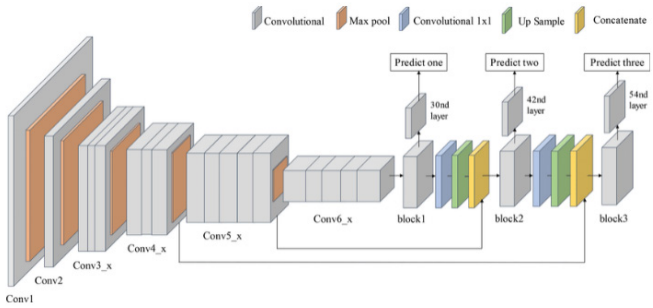


Figura 5. Arquitectura Darknet19 YOLOv2.

3. Alexnet

Red neuronal convolucional compuesta por ocho capas [13], cinco de las cuales son max-pooling, y las tres restantes, fully connected. Esta arquitectura fue entrenada con la función de activación ReLU (Rectified Linear Units) y la base de datos ImageNet. Como se observa en la figura. 6, la entrada de la red son las imágenes de 224 × 224 píxeles, las cuales se van transformando en cada una de las capas, hasta obtener como salida, la clasificación de mil categorías.

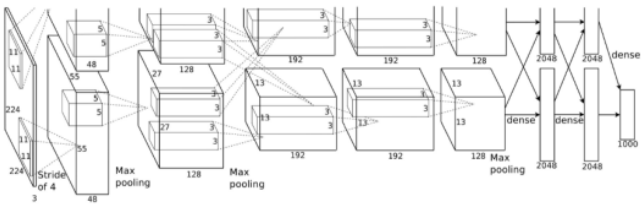


Figura 6. Arquitectura AlexNet [13]

En la figura 7 se muestra la cobertura de fusión de imágenes, implementada en Matlab.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

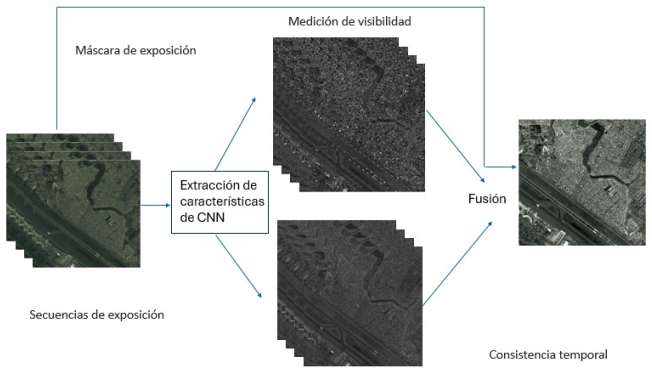


Figura 7. Cobertura de fusión de imágenes.

III. Evaluación de la efectividad de los algorimos implenetados para lafusión de imagenes

Algunos requisitos que deberían cumplir los tests o Índices de Calidad [14]:

1. Deben ser independientes de las unidades, y por consiguiente de los instrumentos de calibración y de sus valores de ganancia.
2. Ser independientes de número de bandas espectrales consideradas.
3. Ser independientes de la relación entre las resoluciones espaciales de las imágenes fuente.

Para la evaluación y análisis de los resultados de las imágenes fusionadas se usan los siguientes índices: coeficiente de correlación (corr), índice RASE (Relative Average Spectral Error), índice ERGAS (Erreur Relative Globale Adimensionallede Synthèse) e índice de calidad universal Q, los cuales se describen a continuación.

A. Coeficiente de correlación (corr)

La correlación entre las diferentes bandas de las imágenes fusionadas y las bandas de la imagen original se pueden calcular con la ecuación 1:

$$corr(A/B) = \frac{\sum_{j=1}^{npix}\left(A_j - \bar{A}\right)\left(B_J - \bar{B}\right)}{\sqrt{\sum_{j=1}^{npix}\left(A_j - \bar{A}\right)^2 \sum_{j=1}^{npix}\left(B_j - \bar{B}\right)^2}} \quad (1)$$

Donde $\bar{A}$ y $\bar{B}$ son los valores de la media de las imágenes correspondientes, *corr* (*A/B*) varía entre –1 y +1 y es una cantidad adimensional (ver resultados tabla 2), es decir no depende de las unidades empleadas. El valor ideal de la correlación, tanto espectral como espacial, es 1 [15].

B. Índice ERGAS

La evaluación de la calidad de las imágenes fusionadas se ha llevado a cabo mediante los índices ERGAS espectral y espacial (ver resultados tabla 3). La definición de ERGAS espectral [16] viene dada por la ecuación 2:

$$ERGAS_{Espectral} = 100\frac{h}{l}\sqrt{\frac{1}{N_{Bandas}}\sum_{i=1}^{N_{Bandas}}\left[\frac{(RMSE_{Espectral}(Banda^i))^2}{(MULTI^i)^2}\right]} \quad (2)$$

Donde *h* y *l* representan la resolución espacial de las imágenes *PAN* y *MULTI*, NBandas es el número de bandas de la imagen fusionada; $MULTI^i$ es el valor de la radiancia de la banda *i-ésima* de imagen MULTI [16] y RMSE será definida como sigue (ecuación 3):

$$RMSE_{Espectral}(Banda_i) = \frac{1}{NP}\sqrt{\sum_{i=1}^{NP}(MULTI_i - FUS_i)^2} \quad (3)$$

Siendo *NP* el número de píxeles de la imagen *FUS*. Adicionalmente, Lillo y su equipo (2005) proponen otro índice, denominado $ERGAS_{Espacial}$ que está inspirado en el índice $ERGAS_{Espectral}$ [17]. El objetivo del índice es evaluar la calidad espacial de las imágenes fusionadas, por lo que se define como (4):

$$ERGAS_{Espacial} = 100\frac{h}{l}\sqrt{\frac{1}{N_{Bandas}}\sum_{i=1}^{N_{Bandas}}\left[\frac{(RMSE_{Espacial}(Banda^i))^2}{(PAN^i)^2}\right]} \quad (4)$$

Donde $RMSE_{Espacial}$ es definido como sigue en la ecuación 5:

$$RMSE_{Espacial}(Banda_i) = \frac{1}{NP}\sqrt{\sum_{i=1}^{NP}(PAN_i - FUS_i)^2} \quad (5)$$

Los mejores resultados de estos índices (ERGAS espacial y espectral) se obtienen cuando es más cercano a cero (ver resultados Tabla II).

C. Índice RASE

El índice RASE se expresa como un porcentaje (ecuación 6), ver resultados en la tabla 1:

$$RASE = 100\frac{h}{l}\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{(RMSE(B_i))^2}{M_i^2}\right]} \quad (6)$$

Donde *h* es la resolución de la imagen de alta resolución especial (PAN) y *l* es la resolución de la imagen de baja resolución espacial (MULTI) [16]. Los mejores resultados se obtienen cuando el porcentaje está más cerca a cero.

D. Índice de calidad universal Q

Este modelo de índice de calidad identifica cualquier distorsión como una combinación de tres factores: pérdida de correlación, distorsión de luminancia y contraste de distorsión [18]. El índice se obtiene con la ecuación 7 (ver resultados espacial y espectral en Tabla I y II).

$$Q = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x\sigma_y}\cdot\frac{2\bar{x}\bar{y}}{\left(\bar{x}\right)^2 + \left(\bar{y}\right)^2}\cdot\frac{2\sigma_x\sigma_y}{\sigma_x^2 + \sigma_x^2} \quad (7)$$

Los mejores valores de este índice se obtienen cuando el valor es más cercano a uno.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

IV. Resultados y Análisis de resultados

En esta investigación se analizó la conservación de la resolución espectral con respecto a la imagen original (MULTI) y la ganancia espacial con la imagen original (PAN), a partir de dos métodos (Análisis de Componentes Principales) ACP en el cual se ajusta la CP1 con la PAN para ser remplazada con la CP1 tal que ACP1-Pan, CP2 y CP3 permite generar la N-MULTIACP. El segundo método implementado CNN (Redes Neuronales) vgg19, darknet19 y alexnet, permitieron generar tres imágenes fusionadas **N**-MULTI**A** (alexnet)**, N**-MULTI**D** (darknet19) y **N**-MULTI**V** (vvg19) ver figuras 9-12 . Con estos dos métodos se generaron cuatro imágenes fusionadas y las imágenes originales PAN y MULTI Ikonos ver figura 8 y con los índices propuestos: Coeficientes de Correlación RASE, ERGAS y Qu para la evaluación de la calidad de las imágenes Ikonos Fusionadas tanto espectral como espacial, se obtuvieron los siguientes resultados:

a) b)

Figura 8. a) Imagen Pancromática Ikonos b) Imagen Multiespectral Ikonos

Figura 10. Imagen Fusionada alexnet Ikonos

Figura 11. Imagen Fusionada darknet19 Ikonos

Figura 12. Imagen Fusionada vgg19 Ikonos

TABLA I. ANÁLISIS ESPECTRAL IMAGEN IKONOS 2048 LÍNEAS POR 2048 COLUMNAS

Imagen fusionada	***corr* Espectral**			**ERGAS**	**RASE**	**Qu**
	R	**G**	**B**			
RGB/ACP	0,55	0,54	0,52	7.6266	30.8663	0.5486
RGB/alexnet	0,86	0,87	0,81	16.0405	63.4791	0.5887
RGB/darknet19	0,86	0,88	0,81	15.2646	63.4792	0.5968
RGB/vgg19	0,86	0,88	0,81	16.0405	60.4032	0.5887

TABLA II. ANÁLISIS ESPACIAL IMAGEN IKONOS 2048 LÍNEAS POR 2048 COLUMNAS

Imagen fusionada	***corr* Espacial**			**ERGAS**	**RASE**	**Qu**
	R	**G**	**B**			
PAN/ACP	0,95	0,96	0,94	3.52	14.11	0.93
PAN/Alexnet	0,84	0,83	0,85	15.9	63.64	0.59
PAN/Darknet19	0,83	0,82	0,84	15.2	60.90	0.59
PAN/vgg19	0,84	0,83	0,85	15.9	63.64	0.59

Según [19] no existe el mejor método de fusión de imágenes, sino la mejor imagen fusionada. Entonces, analizando los resultados de Correlación Espacial y Espectral tabla I y II, se evidencia que los máximos valores correlación espacial se obtienen para la imagen $MULTI_{ACP}$, en cada una de las tres bandas

ISBN: 978-989-36481-2-4

(RGB) y espectralmente a correlación de las tres redes son similares sin embarco se considera que la mejor imagen fusionada en este caso sería **N-**MULTI**D** (darknet19).

De otra parte, en la tabla I y II se muestran los resultados obtenidos usando los índices RASE; ERGAS; e índice de calidad universal Qu, tanto espacial como espectral.

Los resultados presentados por el índice ERGAS, RASE y Qu espacial, favorecen a la imagen fusionada N-MULTI$_{ACP}$. Aunque ERGAS espectral supera significativamente tres imágenes fusionadas **N-**MULTI**A** (alexnet)**, N-**MULTI**V** (vvg19)**, y N-**MULTI**D** (darknet19). Sin embargo, los mejores resultados en ERGAS, RASE y Qu espectral, se obtienes con estas tres últimas imágenes fusionadas. Con base en estos resultados, es mejor **N-**MULTI**D** (darknet19), es mejor espectralmente.

Desde el punto de vista cualitativo, visualmente la Fig. 10, 11 y 12 son tres imágenes fusionadas **N-**MULTI**A** (alexnet)**, N-**MULTI**V** (vvg19)**, y N-**MULTI**D** (Darknet19) muestra dos aviones con características similares las tres tienes efecto diente de sierra es decir son pixeladas sin embargo el color, forma, tamaño y color tiende a mantener características de la imagen Ikonos original Fig. 8 a). Por otro lado, la Fig. 9 permite identificar fácilmente el objeto de estudio en este caso el avión en el cual el detalle es mucho mejor es por esta razón que la ganancia espacial es más significativa que las imágenes fusionadas usando Deep learning para este caso de estudio , alexnet, darknet19 y vgg19.

V. Conclusiones

La fusión de imágenes genera imágenes sintéticas, producto de la combinación de uno o más sensores. La implementación en Matlab del desarrollo matemático de los algoritmos como la Transformada ACP y el entrenamiento de redes predefinidas como alexnet vgg19 y Darknet19 con las imágenes satelitales del sensor Ikonos, son métodos replicables a cualquier tipo de imágenes proveniente de diferentes sensores.

Los resultados obtenidos del análisis cualitativo (figura. 10 a la figura 13) y cuantitativo (Tabla I, II) demuestran que el mejor resultado de la fusión de imágenes, que degrada en menor valor la riqueza espectral significativa se obtuvo con el entrenamiento de las redes neuronales y la imagen fusionada de mejor calidad espacial se obtuvo con el algoritmo ACP.

Las metodologías propuestas permiten obtener imágenes fusionadas que ofrecen a los usuarios información detallada sobre los entornos urbanos y rurales, lo cual es útil para aplicaciones como la planificación y la gestión urbana, cuando no se cuenta con imágenes de mejor resolución espacial. Su utilidad se extiende a proyectos en diversos campos como agricultura, hidrología, medioambiente y gestión de emergencias producidas por catástrofes naturales (inundaciones, incendios forestales), entre otros.

Referências Bibliográfica

[1] Vivone, G., Alparone, L., Chanussot, J., Dalla Mura, M., Garzelli, A., Licciardi, G.A., Restaino, R. and Wald, L). A critical comparison among pansharpening algorithms. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 53(5), pp. 2565-2586. 2015.

[2] M. Haenlein and A. Kaplan, "A brief history of artificial intelligence: On the past, present, and future of artificial intelligence," California Management Review, vol. 61, no. 4, pp. 5–14, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/0008125619864925

[3] M. Flasiński, Introduction to artificial intelligence. Springer International Publishing, 2016. [Online]. Available: http://doi.org/10.1007/ 978-3-319-40022-8

[4] M.-H. Huang and R. T. Rust, "Artificial intelligence in service," Journal of Service Research, vol. 21, no. 2, pp. 155–172, 2018. [Online]. Available: https://doi.org/10.1177/1094670517752459

[5] Z. Aung, I. S. Mikhaylov, and Y. T. Aung, "Artificial intelligence methods application in oil industry," in 2020 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), 2020, pp. 563–567. [Online]. Available: https://doi.org/10. 1109/EIConRus49466.2020.9039330

[6] T. P. Carvalho, F. A. A. M. N. Soares, R. Vita, R. da P. Francisco, J. ao P. Basto, and S. G. S. Alcalá, "A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance," Computers & Industrial Engineering, vol. 137, p. 106024, 2019. [Online]. Available: https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024

[7] S. Wan, L. Qi, X. Xu, C. Tong, and Z. Gu, "Deep learning models for real-time human activity recognition with smartphones," Mobile Networks and Applications, vol. 25, no. 2, pp. 743–755, Apr. 2020. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/s11036-019-01445-x

[8] V. Golodov, A. Zavei-Boroda, S. Ivanov, and K. Nikolskaya, "Development of a deep learning neural network for human movements analysis," in 2017 Second Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (RPC), 2017, pp. 72–74. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/RPC.2017.8168071

[9] E. A. Galindo, J. A. Perdomo, and J. C. Figueroa-García, "Estudio comparativo entre máquinas de soporte vectorial multiclase, redes neuronales artificiales y sistema de inferencia neuro-difuso autoorganizado para problemas de clasificación," Información tecnológica, vol. 31, pp. 273–286, 02 2020. [Online]. Available: http: //dx.doi.org/10.4067/S0718-07642020000100273

[10] P. Muñoz Aguayo. Informe técnico Apuntes de Teledetección: Fusión de Imágenes. Centro de información de Recursos Naturales, Ministerio de Agricultura Chile. 2013. DOI:10.13140/RG.2.2.27250.76485.

[11] Shettigara, V. K. "A Generalized Component Substitution Technique for Spatial Enhancement of Multispectral Images Using a Higher Resolution Data Set," Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 58, No. 5, pp. 561-567. 1992.

[12] J. Xiao, J. Wang, S. Cao, and B. Li, "Application of a novel and improved VGG-19 network in the detection of workers wearing masks," Journal of Physics: Conference Series, vol. 1518, p. 012041, apr 2020. [Online]. Available: https: //doi.org/10.1088/1742-6596/1518/1/012041

[13] A. A. Almisreb, N. Jamil, and N. M. Din, "Utilizing alexnet deep transfer learning for ear recognition," in 2018 Fourth International Conferenceon Information Retrieval and Knowledge Management (CAMP), 2018, pp. 1–5. [Online]. Available: https://doi.org/10.1109/INFRKM.2018.8464769

[14] L. Wald. Quality of high resolution synthesized images: is there a simple criterion?, Proceedings of the third conference "Fusion of Earth data: merging point measurements, raster maps and remotely sensed image", pp. 26-28, 2000, T Ranchin and L. Wald Editors, Nice: SEE/URISCA. pp. 99-105.

[15] S. R. Murray, & J. F. Larry. *Estadística*, Cuarta edición, (Mc Graw Hill). 2009.

[16] L. Wald. "Data Fusion, Defibçnition and Architectures: Fusion of Image of Different Spatial Resolution", Le Presses de l'Ecole des Mines, Paris. 2002.

[17] M. Lillo-Saavedra, C. Gonzalo, A. Arquero, and E. Martinez. "Fusion of multispectral and panchromatic satellite sensor imagery based on tailored filtering in the Fourier domain". *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 26, pp. 1263-1268. 2005.

[18] Z. Wang & A. C. Bovink. "A Universal Image Quality Index". IEEE Signal Processing Letters, vol. XX, no Y. 2002.

[19] C. Gonzalo-Martín, M. Lillo-Saavedra, "Fusión de Imágenes QuickBird Mediante una Representación Conjunta Multirresolución–Multidireccional", IEEE Latin America Transactions, Vol. 5, No. 1, pp 32 . (2007).

Estimación de Parámetros para la Evaluación del Índice de Calidad de Agua Mediante el uso de Imágenes Sentinel-2 y Machine Learning.

Parameter Estimation to Evaluate the Water Quality Index using Sentinel-2 images and Machine Learning.

Andrés Patiño-Montoya
Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones.
Facultad de Ingeniería.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Bogotá, Colombia
Correo: gapatinom@udistrital.edu.co

Javier Medina
Maestría en Ciencias de la Información y las Comunicaciones.
Facultad de Ingeniería.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
Bogotá, Colombia
Correo: rmedina@udistrital.edu.co

***Resumen* — Este artículo tiene como objetivo evaluar el índice de calidad de agua (ICA) del Consejo Canadiense de Ministros del Medio Ambiente (CCME) sobre estimaciones de 10 parámetros de calidad del agua, los cuales fueron modelados mediante ecuaciones de regresión lineal mediante el uso de imágenes satelitales Sentinel-2 en el lago George, ubicado al norte de Florida, Estados Unidos. Una vez que se calculó el índice, se entrenó una regresión multivariada con splines adaptativos (MARS) con el fin de modelar el comportamiento espectral del ICA sobre la extensión del lago. Si bien el desempeño del modelo evaluado fue bueno, soportado por un RMSE de 2,76 y por un MAE de 1,99, el ajuste general fue pobre, ya que la variabilidad de la variable independiente solo pudo ser explicada en un 0,9% por las bandas correlacionadas en el modelo MARS.**

Palabras **Clave – Teledetección; índice de calidad del agua; regresión lineal; aprendizaje de máquina; MARS.**

***Abstract* — This article aims to evaluate the Canadian Council of Ministers of the Environment (CCME) Water Quality Index (WQI) on estimations of 10 water quality parameters, which were modeled using linear regression equations with Sentinel-2 satellite imagery of Lake George, located in northern Florida, USA. Once the index was calculated, a multivariate adaptive regression splines (MARS) was trained to model the spectral behavior of the WQI across the lake. Although the performance of the evaluated model was good, supported by an RMSE of 2.76 and an MAE of 1.99, the overall fit was poor, with the variability of the independent variable only being explained by 0.9% by the correlated bands in the MARS model.**

Keywords – Remote sensing; water quality index; linear regression; machine learning; MARS.

I. Introducción

La estimación de parámetros de calidad del agua con el uso de técnicas de teledetección ha cobrado gran importancia y popularidad en la comunidad científica, ya que se ha podido demostrar que las mediciones de los indicadores presentan una alta correlación espectral con los niveles digitales capturados por sensores de percepción remota mediante la aplicación de distintos modelos predictivos, tal como la regresión lineal clásica [1] [2]. Por lo tanto, esta metodología ofrece una alternativa efectiva en términos de costos y tiempo con el fin de monitorear las características fisicoquímicas de un cuerpo de agua determinado.

La respuesta espectral capturada en las imágenes satelitales enlazada con información transversal en el monitoreo de parámetros de calidad del agua comenzó a proponerse como técnica complementaria a inicio del presente siglo [3]. Desde entonces, múltiples estudios se han desarrollado con el objetivo de explorar la correspondencia espectral predictiva en diferentes cuerpos hídricos, ofreciendo una mayor calidad y precisión en las estimaciones al utilizarse productos de sensores con una mayor resolución espacial como el programa Sentinel-2 [4] [5] [6]. Por otra parte, la evaluación de la calidad del agua no se limitó solamente en la mera predicción de los parámetros asociados, sino que el análisis se expandió para involucrar índices basados en las mediciones o estimaciones con el propósito de estructurar una metodología que permitiera diagramar de mejor forma las fluctuaciones en los niveles de contaminación de una fuente de agua natural [7] [8].

El objetivo principal del presente estudio es evaluar el índice de calidad del agua propuesto por el CCME en el lago George mediante la aplicación de un modelo MARS, haciendo uso de estimaciones de parámetros fisicoquímicos previamente ajustados por técnicas de regresión lineal múltiple y el uso de imágenes Sentinel-2 como insumo principal para cada indicador, entre septiembre de 2022 y abril de 2024.

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

II. Recursos y métodos

A. Zona de Estudio.

El lago George es un cuerpo de agua perteneciente a la cuenca del río San Juan Bautista, ubicado entre los condados de Volusia y Putnam al noreste del estado de Florida, Estados Unidos (Fig. 1). Este lago se encuentra a 210 kilómetros del yacimiento del río y se caracteriza por ser el segundo cuerpo lacustre más grande en términos de extensión de superficie (por detrás del lago Okeechobee), con un total de 18.934 hectáreas y una profundidad promedio de tres metros [9].

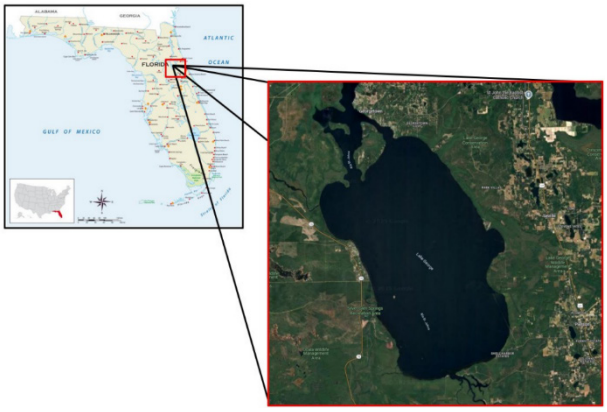


Figura 1. Ubicación geográfica del lago George.

B. Parámetros de Calidad del Agua.

Los modelos de regresión lineal se desarrollaron con 10 parámetros cuyas mediciones se realizaron en el período comprendido entre septiembre de 2022 y abril de 2024. Dichas mediciones fueron descargadas del Atlas de Recursos Hídricos del Condado de Lake de dos estaciones identificadas con los números 44672 y 44673, ubicadas en la parte central del lago en la Fig. 2. Los parámetros seleccionados se listan a continuación: arsénico (µg/L), azufre (mg/L), clorofila-a (µg/L), cloruro (mg/L), dureza (mg/L), pH, sodio (mg/L), temperatura (°F), sólidos suspendidos totales -TSS - (mg/L), turbidez (NTU).

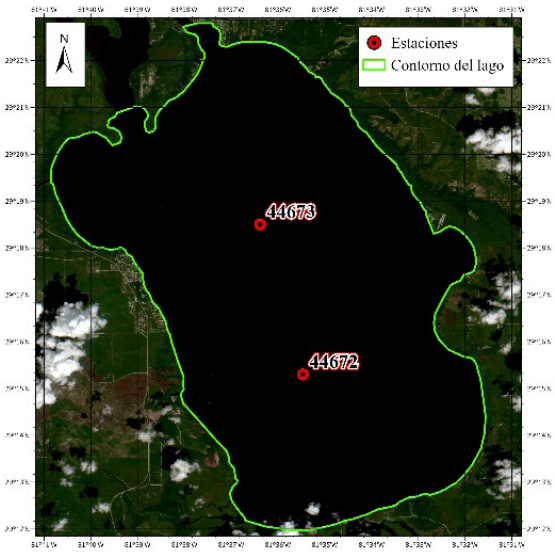


Figura 2. Ubicación de las estaciones de medición en el lago George.

Las estadísticas descriptivas de la Tab. I indican que la mayoría de los valores de los parámetros tienen un comportamiento normal con una dispersión ligeramente menor; no obstante, el azufre, la clorofila-a, el cloruro, el sodio, la temperatura y la turbidez muestran rangos considerablemente amplios, lo que indica que las mediciones de estas variables están fuertemente influenciadas por un componente adicional, como el temporal, en el sentido en que la actividad biológica y eutrófica se incrementa en temporadas con temperaturas más altas; es decir, en el periodo de verano; a su vez, disminuyen en temporadas de invierno, con sensaciones térmicas más bajas.

TABELA I. Estadísticas descriptivas de los parámetros.

Parámetro	Estadísticas descriptivas			
	Media	**Des. Estándar**	**Mínimo**	**Máximo**
Arsénico	0,69	0,12	0,48	0,92
Azufre	49,32	19,23	16,03	83,44
C/fila-a	24,52	12,82	2,99	58,81
Cloruro	200,00	62,05	77,34	288,97
Dureza	161,57	40,10	69,98	208,86
pH	7,97	0,52	6,55	8,95
Sodio	110,42	36,62	40,51	166,71
Temperatura	75,54	8,53	56,12	89,13
TSS	11,28	4,85	1,60	27,00
Turbidez	5,69	2,84	1,43	14,07

C. Imágenes Satelitales.

Se utilizaron 20 imágenes satelitales del programa Sentinel-2, el cual cuenta con 12 bandas que operan en el rango de 430 nm hasta 2280 nm dentro del espectro electromagnético. Las imágenes se descargaron directamente desde *Copérnicus*, el geoportal de la Agencia Espacial Europea. El rango de tiempo seleccionado de los parámetros inicia desde septiembre de 2022 hasta abril de 2024; en consecuencia, se obtuvo una imagen satelital para cada mes dentro de dicho periodo, como se muestra en la Tab. II.

TABELA II. Imágenes Sentinel-2 adquiridas.

Imagen	Captura	Imagen	Captura
S2A_MSI-L2A_20220920T155941	20-09-2022	S2B_MSI-L2A_20230712T155829	12-07-2023
S2B_MSI-L2A_20221025T160339	25-10-2022	S2B_MSI-L2A_20230811T155829	11-08-2023
S2A_MSI-L2A_20221129T160621	29-11-2022	S2B_MSI-L2A_20230910T155829	10-09-2023
S2A_MSI-L2A_20221219T160701	19-12-2022	S2B_MSI-L2A_20231020T160209	20-10-2023
S2A_MSI-L2A_20230108T160641	08-01-2023	S2B_MSI-L2A_20231109T160459	09-11-2023
S2A_MSI-L2A_20230217T160311	17-02-2023	S2B_MSI-L2A_20231219T160659	19-12-2023
S2A_MSI-L2A_20230309T160101	09-03-2023	S2B_MSI-L2A_20240128T160529	28-01-2024
S2A_MSI-L2A_20230418T155821	18-04-2023	S2B_MSI-L2A_20240207T160429	07-02-2024

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Imagen	Captura	Imagen	Captura
S2B_MSI-L2A_20230513T155829	13-05-2023	S2A_MSI-L2A_20240323T155921	23-03-2024
S2B_MSI-L2A_20230602T155819	02-06-2023	S2B_MSI-L2A_20240407T155819	07-04-2024

D. Preparación de las Variables Predictoras.

Los niveles digitales de las imágenes utilizadas fueron sujetos a una fase de posprocesamiento correspondiente al nivel 2 para una imagen Sentinel-2, lo que quiere decir que el rango esperado para dichos valores está entre 0 y 1 al ser números escalados; por lo tanto, debido a que la superficie de análisis tiende a reflejar poca energía, los píxeles fueron muy pequeños [10]. En ese orden de ideas, plantear un modelo de regresión lineal múltiple supondría el hallazgo de problemas de multicolinealidad ocasionados por la similitud de los valores de los niveles digitales. Por tal motivo, se implementó una metodología utilizada previamente por [7], la cual consiste en la determinación de índices normalizados y cocientes con cada una de las bandas con la siguiente estructura:

$$ND_{ij} = \frac{B_i - B_j}{B_i + B_j} \tag{1}$$

$$R_{ij} = \frac{B_i}{B_j} \tag{2}$$

Donde ND_{ij} y R_{ij} son el índice y el cociente de las bandas *i* y *j*, respectivamente.

E. Conceptualización del ICA.

El cálculo del índice de calidad del agua seleccionado fue el desarrollado por el CCME, el cual se basa en mediciones de parámetros relacionados con las características fisicoquímicas del cuerpo de agua objeto de estudio, penalizando el impacto de concentraciones significativamente altas y compensando aquellos valores que mantienen estable la calidad del recurso hídrico [11]. Esta metodología no tiene restricción en la cantidad de variables utilizadas; por lo tanto, los resultados reflejarán la situación real del lago mientras se utilice la mayor cantidad de información disponible.

La estimación del ICA consta de dos fases principales. En la primera, se obtiene la cantidad de estimaciones que superaron el umbral elegido para un parámetro específico, también conocida como el alcance; la frecuencia se calcula con la cantidad de parámetros que tuvieron al menos una observación no conforme; y la amplitud, con la diferencia ponderada entre los valores objetivos o niveles guía y la magnitud de las pruebas reprobadas. Luego, se procede con la fase 2, en la cual se consolidan todos los factores globales, se ponderan los valores del índice y se categoriza para cada ubicación, según la Tab. III.

TABELA III. Categorización del ICA.

Categoría	Descripción
Excelente	ICA = 100 – 95: Calidad del agua protegida casi sin amenazas; condiciones cercanas a lo natural.
Buena	ICA = 94 – 80: Calidad protegida con pocas amenazas; condiciones próximas a lo natural o lo deseado.
Aceptable	ICA = 79 – 65: Calidad usualmente protegida; ocasionalmente amenazada. Condiciones alejadas de lo natural.
Mala	ICA = 64 – 45: Calidad frecuentemente amenazada; condiciones muy alejadas de lo natural o de los valores deseados.
Muy mala	ICA = 44 – 0: Calidad siempre amenazada; condiciones no naturales y muy alejadas de los niveles deseados.

Estructural Básica del Modelo MARS.

El modelo MARS se basa en la identificación de relaciones no lineales de los datos a partir de la evaluación de puntos de corte (también llamados nudos) tal como lo hacen las funciones escalonadas. El proceso consiste en evaluar cada punto de datos para cada predictor como un nudo, y a partir de esa evaluación se ajusta una regresión lineal con las características candidatas:

$$y = f(x_i) = \beta_o + \sum_{n=1}^{i} \beta_i B(x_i) \tag{3}$$

Donde es la variable respuesta, es el intercepto y es el estimador del modelo asociado con la función bisagra correspondiente [12].

III. Resultados.

A. Ajuste de los Modelos y Validación de los Supuestos Clásicos de la Regresión Lineal.

Una vez que se calcularon los índices y cocientes, se efectuó una metodología similar a la de *forward step-wise*, la cual consistió en la adición de variables al modelo, eligiendo aquella con el coeficiente de determinación múltiple (R^2) más alto [13]. Por lo tanto, se crearon modelos con una, dos y tres variables, se ajustaron las regresiones y se calculó el R^2. Luego, se ordenaron los modelos resultantes de forma descendente y se eligieron los cinco mejores. A los modelos seleccionados se les aplicó un análisis de inflación de varianza para la detección de multicolinealidad, resultando en la elección de un modelo final que cumpliera con el menor grado de correlación entre las variables y un ajuste general aceptable.

Finalmente, se validaron los supuestos de normalidad, no autocorrelación y homocedasticidad en los residuos, evidenciando que todos los modelos (a excepción del de los TSS) presentaron autocorrelación positiva, por lo que fue necesario implementar el modelo GLSAR (mínimos cuadrados generalizados con autocorrelación) para neutralizar el impacto temporal sobre las estimaciones y sus residuos asociados [14]. Los modelos finales se muestran en la Tab. IV.

TABELA IV. Ecuaciones de los parámetros modelados.

Parámetro	Ecuación
Arsénico	$y^3 = 0{,}31 + 0{,}006*ND_{8A,9} + 0{,}25*ND_{1,5} - 0{,}014*ND_{9,12}$
Azufre	$Ln(y) = 3{,}097 + 2{,}83*ND_{5,11} - 2{,}37*ND_{8,11}$
C/fila-a	$Ln(y) = 2{,}95 - 2{,}62*ND_{2,7} + 2{,}98*ND_{3,8}$
Cloruro	$Ln(y) = 4{,}59 + 2{,}29*ND_{5,11} - 1{,}81*ND_{8,11}$
Dureza	$y = 97{,}75 + 217{,}54*ND_{5,11} - 178{,}35*ND_{8,11}$
pH	$y = 7{,}08 + 1{,}01*ND_{5,8A} + 22{,}16*B_1$

ISBN: 978-989-36481-2-4

Parámetro	Ecuación
Sodio	$Ln(y) = 4{,}31 - 0{,}52*ND_{2,7} + 1{,}70*ND_{5,8}$
Temp.	$Ln(y) = 4{,}06 + 0{,}21*ND_{3,11} + 7{,}90*B_5$
TSS	$Ln(y) = 3{,}12 + 3{,}26*ND_{3,11} - 0{,}48*R_{2,8}$
Turbidez	$y = 4{,}07 + 3{,}40*ND_{4,8} + 143{,}99*B_9$

B. Determinación de los Puntos Evaluables.

La estimación de los parámetros en el lago se llevó a cabo determinando los rangos efectivos de los índices, cocientes y bandas involucradas en cada ecuación, para luego evaluar los píxeles que cumplieran con los rangos establecidos. Este proceso se realizó para cada imagen, resultando una serie de 20 bases de datos con localizaciones evaluables. Finalmente, se cotejaron las bases de los 10 modelos con el fin de hallar los puntos en los cuales todos los modelos coincidieran. En consecuencia, se obtuvo un total de 704 píxeles distribuidos principalmente sobre la zona occidental de la Fig. 3.

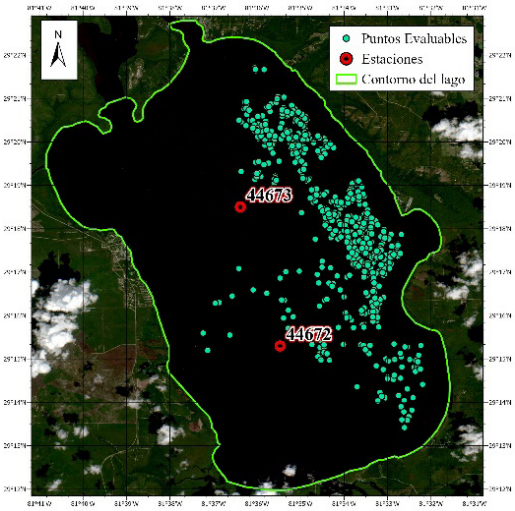


Figura 3. Distribución de los puntos evaluables.

C. Cálculo del ICA.

En la primera fase se identificó que la mayoría de los parámetros no presentaron concentraciones por encima del umbral; no obstante, la clorofila-a y la turbidez sí afectaron notablemente al índice, ya que una porción significativa de las estimaciones superó los valores guía, siendo la clorofila-a el indicador con mayor incidencia, con un 75,3% de las observaciones fuera de los rangos permitidos, seguido por la turbidez, con un 35,9%. El cloruro, la dureza y los TSS también presentaron excedencias respecto de los objetivos máximos; sin embargo, su impacto fue marginalmente menor que el de los dos parámetros mencionados anteriormente, como lo muestra la Tab. V.

TABELA V. Resumen de la fase 1 en el cálculo del ICA.

Parámetro	Fase 1			
	Total	Fallos	Objetivo	Porcentaje
Arsénico	10530	0	10	0,0
Azufre	7722	0	250	0,0
C/fila-a	13338	10043	15	75,3
Cloruro	8424	25	250	0,3
Dureza	8424	66	180	0,8
pH	9126	0	6,5 - 8,5	0,0
Sodio	12636	0	200	0,0
Temperatura	9828	0	86	0,0
TSS	12636	84	25	0,7
Turbidez	9126	3277	5	35,9

En la segunda fase, se integraron los factores en el índice final, el cual indicó que 664 puntos de evaluación presentaron una calidad categorizada como buena y 38 localizaciones con calidad aceptable. El proceso se aplicó en las estaciones de medición, obteniéndose un valor del ICA de 81,78 para la estación 44672, es decir, buena calidad del agua; mientras que en la estación 44673 el puntaje fue de 63,75, para una clasificación de mala, muy cerca del límite de la categoría aceptable.

D. Implementación en Épocas Estacionales.

La base de datos final con la que se ajustó el modelo MARS reunió un total de 704 observaciones con un solo índice por registro; es decir, ya no se tuvo en consideración un componente temporal explícito, sino solo geográfico. Esta metodología tiene varias implicaciones en la medida en que el presente estudio no pretendió evaluar qué imagen explica mejor el ICA, sino que buscó interpretar qué estado espectral del lago fue más representativo en el índice integrado para el periodo en cuestión. En consecuencia, se eligieron cuatro imágenes que representarían cada estado estacionario (invierno, primavera, verano y otoño), de las cuales se extrajeron los niveles digitales de las 12 bandas para cada uno de los puntos de análisis de forma independiente.

Inicialmente, las medidas de desempeño indicaron que las regresiones presentan errores bajos y muy similares entre sí, siendo la época de verano con el mejor rendimiento; esto indicó que los residuos mostraron una variabilidad relativamente baja y que las medidas de desempeño estaban bastante cerca entre sí con valores bajos. No obstante, el problema real surgió con la interpretación del coeficiente de determinación, ya que la variabilidad del ICA no pudo ser explicada por las bandas, soportado por el bajo coeficiente R^2 de todos los modelos, como lo muestra la Tab. VI.

TABELA VI. Resumen del MARS por época.

Medida	Estaciones			
	Invierno	Primavera	Verano	Otoño
RMSE	2,89	2,85	2,79	2,85
MAE	2,01	2,05	1,99	2,11
Error relativo	2,45	2,50	2,43	2,57
R^2	-0,042	-0,053	-0,013	-0,054

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

En síntesis, gracias a la homogeneidad obtenida con los modelos de regresión lineal, el modelo MARS no logró estructurar un sistema complejo que relacionara los componentes geográficos y espectrales, debido a la naturaleza propia del índice en la zona de estudio. Por lo tanto, fue muy difícil implementar un modelo que detectara gradientes abruptos en la calidad del agua o que explicara variaciones sectorizadas del ICA.

E. Modelo Final.

El modelo MARS involucra una gran cantidad de funciones bisagra al hacer el ajuste; dichas funciones relacionan no solo las bandas finales seleccionadas, sino también combinaciones de las bandas restantes, generando ruido que afecta la suma de cuadrados de los residuos [15]. Por tal motivo, se ajustó nuevamente, pero solo con las bandas implicadas en la primera iteración, con el fin de reducir las posibles perturbaciones generadas por las demás variables independientes.

Para esta segunda iteración se obtuvo un RMSE de 2,76; un MAE de 1,99; un error relativo de 2,43 y un R^2 de 0,009. Las medidas de desempeño mostraron una leve mejoría en el error medio cuadrático y en el coeficiente de determinación, lo que confirmó que las bandas restantes sí inducían ruido en los residuos, provocando una mayor variabilidad en la suma de los cuadrados; sin embargo, esto no afectó el desempeño de las estimaciones y sus medidas. La ecuación definitiva incluyó dos puntos de corte para las bandas 3 (verde) y 9 (vapor de agua) y un total de 3 funciones bisagra:

$$\begin{aligned} WQI &= 85{,}28 - 152{,}60 * \max\left(0; 0{,}024 - B_3\right) \\ &+ 38435{,}6 * \max\left(0; B_9 - 0{,}0138\right) * \max\left(0; B_3 \right. \\ &\left. - 0{,}024\right) - 2486{,}6 * \max\left(0; B_9 - 0{,}0138\right) \end{aligned} \quad (4)$$

F. Evaluación del Modelo MARS.

El modelo se evaluó en la zona oriental del lago donde no se tenía una mayor cantidad de estimaciones del ICA en las imágenes de julio, agosto y septiembre, las cuales representan la época activa del verano. Este proceso permitió identificar que el modelo falla rotundamente cuando se presenta una cobertura de nubes predominante sobre la superficie de análisis, ya que la banda 9 afecta negativamente el índice al activarse funciones bisagra muy grandes cuando los niveles digitales de dicha banda son muy elevados.

Para la imagen de julio en la Fig. 4, se evaluaron 40.512 puntos, de los cuales el 48% se categorizó en la calidad buena, 19% en la aceptable, 23% en la mala y 10% en muy mala. Para agosto en la Fig. 5, se involucraron 12.690 píxeles en el análisis, con un 43% de las estimaciones en la categoría buena, 21% en la aceptable, 28% en la mala y 7% en muy mala. Finalmente, para septiembre en la Fig. 6, se obtuvieron 23.456 puntos de evaluación, de los cuales el 96% fueron categorizados con buena calidad del agua, y el restante porcentaje se distribuyó en las categorías de aceptable, mala y muy mala.

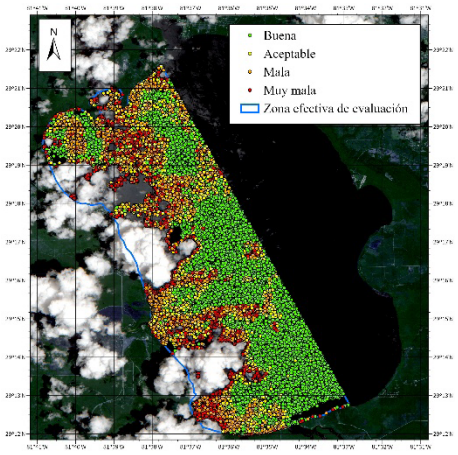


Figura 4. MARS aplicado en la imagen de julio.

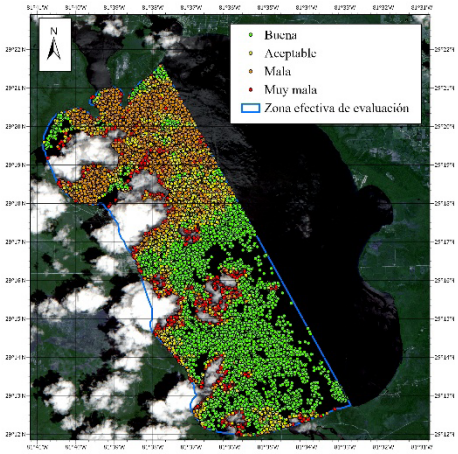


Figura 5. MARS aplicado en la imagen de agosto.

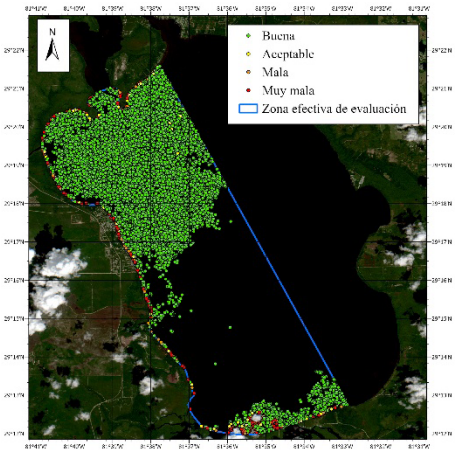


Figura 6. MARS aplicado en la imagen de septiembre.

ISBN: 978-989-36481-2-4

En resumen, debido a la presencia de nubes, la banda 9 presentó valores muy altos, lo que provocó que el modelo lo interpretara como una afectación directa a la calidad del agua, generando estimaciones excesivamente bajas (julio y agosto). Por otra parte, el modelo presenta un rendimiento esperable en ambientes homogéneos y controlados (septiembre); es decir, en condiciones similares a las de los datos de entrenamiento.

G. Validación del Modelo MARS.

a) Prueba de significancia estadística.

La validación final del modelo se realizó verificando la significancia estadística del MARS con los datos de entrenamiento mediante la prueba F, la cual define si el modelo predice mejor el índice en comparación con su media aritmética [16]. El valor del estadístico F observado fue de 8,33 y el del F crítico fue de 1,84 con un nivel de confianza de 5%, un total de grados de libertad de 10 en el numerador y de 480 en el denominador. En consecuencia, no hubo evidencia para concluir que el modelo no se ajusta a los datos.

b) Análisis de residuos.

A partir del histograma de los residuos de la Fig. 7, se pudo identificar que el modelo estuvo sólidamente forzado por una cola a la izquierda, lo que genera una concentración masiva de residuos a la derecha. En términos prácticos, los valores más bajos del índice se inflaron súbitamente; por lo tanto, los valores más altos sufrieron ligeras subestimaciones para equilibrarlos alrededor de la media aritmética.

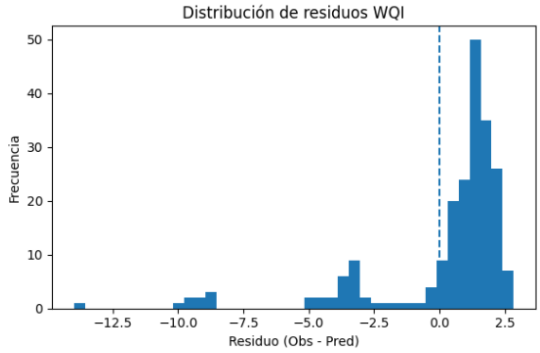


Figura 7. Histograma de los residuos.

c) Índice de concordancia (IoA) y dispersión (SI).

El IoA mide el grado de concordancia general entre los valores estimados y los observados [17]. El SI cuantifica la dispersión relativa de los errores con respecto a la magnitud de los datos [18]. El IoA evidenció que el modelo presentó un desempeño pobre (0,224), ya que se considera un buen resultado cuando el IoA supera 0,5. Esto confirma que el modelo no reproduce correctamente la variabilidad del ICA. En cuanto al SI, se obtuvo un valor de 0,033, lo cual es buena señal de una dispersión baja; sin embargo, justamente la baja variabilidad fue lo que provocó que el modelo desestimara aquellos ICA fuera del rango entre 80 y 85; por lo tanto, cualquier valor menor fue abruptamente elevado hacia la muestra en la cual se concentraba el 95% de los datos, lo que se traduce en una pobre capacidad del modelo de identificar gradientes relevantes en la calidad del agua del lago George.

IV. Conclusiones

El presente estudio permitió evaluar el ICA propuesto por el CCME relacionando la información espectral del programa Sentinel-2 con técnicas de aprendizaje automático. Si bien los modelos de los parámetros individuales presentaron un desempeño estadístico significativo, la implementación del modelo MARS sobre el índice integrado no logró explicar la variabilidad asociada mediante las bandas espectrales, lo que se tradujo en coeficientes R^2 muy bajos. Este comportamiento indica que la estructura matemática basada en penalizaciones acumulativas del ICA tendió a homogeneizar los valores en la mayoría de los parámetros, de tal forma que el índice ponderado permaneciera en un rango reducido, limitando así la detección de gradientes observables mediante teledetección. En consecuencia, la baja variabilidad de la variable dependiente representó un factor determinante en la capacidad del modelo de identificar patrones espectrales significativos.

Adicionalmente, la correlación espectral de la banda 9 provocó que el modelo interpretara los niveles digitales altos como afectaciones directas en la calidad del agua, lo que se tradujo en estimaciones del ICA excesivamente bajas en escenarios con una cobertura de vapor de agua predominante. A pesar de las limitaciones encontradas, el modelo presentó errores medios considerablemente bajos y superó la prueba de significancia estadística; por lo tanto, su desempeño predictivo no fue aleatorio. Lo anterior sugiere que el enfoque de modelado directo sobre índices compuestos puede no ser la opción más eficiente en entornos con tal homogeneidad espacial. Futuros estudios podrían explorar modelos espaciotemporales que preserven la componente dinámica tanto del sistema como de las variables más incidentes en él.

Referencias Bibliográficas

[1] Y. Chebud, G. N. Naja, R. G. Rivero y A. M. Melesse, «Water Quality Monitoring Using Remote Sensing and an Artificial Neural Network.,» *Water Air Soil Pollut,* vol. 233, pp. 4875-4887, 2012.

[2] M. Ahmed, R. Mumtaz, Z. Anwar, A. Shaukat, O. Arif y F. Shafait, «A Multi–Step Approach for Optically Active and Inactive Water Quality Parameter Estimation Using Deep Learning and Remote Sensing.,» *Water,* vol. 13, p. 14, 2022.

[3] H. B. Glasgow, J. M. Burkholder, R. E. Reed, A. J. Lewitus y J. E. Kleinman, «Real-time remote monitoring of water quality: a review of current applications, and advancements in sensor, telemetry, and computing technologies.,» *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology,* vol. 300, pp. 409-448, 2004.

[4] G. Hassan, M. Goher, M. Shaheen y S. Taie, «Hybrid Predictive Model for Water Quality Monitoring Based on Sentinel-2A L1C Data.,» *IEEE Access,* vol. 9, pp. 65730-65749, 2021.

[5] I. Caballero, A. Román, A. Tovar-Sánchez y G. Navarro, «Water quality monitoring with Sentinel-2 and Landsat-8 satellites during the 2021 volcanic eruption in La Palma (Canary Islands).,» *Sci. Total Environ.,* vol. 822, 2022.

[6] M. Niroumand-Jadidi, F. Bovolo, M. Bresciani, P. Gege y C. Giardino, «Quality Retrieval from Landsat-9 (OLI-2) Imagery and Comparison to Sentinel-2.,» *Remote Sens.,* vol. 14, nº 4596, 2022.

ISBN: 978-989-36481-2-4

[7] M. Najafzadeh y S. Basirian, «Evaluation of River Water Quality Index Using Remote Sensing and Artificial Intelligence Models,» *Remote sensing,* vol. 15, nº 9, pp. 23-59, 2023.
[8] X. Wang, F. Zhang y J. Ding, «Evaluation of water quality based on a machine learning algorithm and water quality index for the Ebinur Lake Watershed, China.,» *Sci. Rep.,* vol. 7, nº 12858, 2017.
[9] M. F. Piehler, J. Dyble, P. H. Moisander, A. Chapman, J. Hendrickson y H. Paerl, «Interactions between nitrogen dynamics and the phytoplankton community in Lake George, Florida, USA,» *Lake and Reservoir Management,* vol. I, nº 25, pp. 1-14, 2006.
[10] W. S. Z. L. P. M. A. Qunming Wang, «Fusion of sentinel-2 images,» *Remote Sensing of Environment,* vol. 187, pp. 241-252, 2016.
[11] B. Neary, K. Cash, S. Hébert, H. Khan, K. Saffran, L. Swain, D. Williamson y R. Wright, «CCME water quality index 1.0 technical report,» Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life, Quebec, 2001.
[12] J. H. Friedman, «Multivariate adaptative regression splines,» *The Annals of Statistics, JSTOR,* vol. 19, nº 1, pp. 1-67, 1991.
[13] A. A. A. Robert B. Bendel, «Comparison of stopping rules in forward "stepwise" regression,» *Journal of the American,* vol. 72, nº 357, pp. 46-53, 1977.
[14] A. Buse, «Goodness of fit in generalized least squares estimation,» *The American Statistician,* vol. 27, nº 3, pp. 106-108, 1973.
[15] V. Morales-Oñate, «Machine learning: Teoría y práctica,» Universidad de Las Américas, 2025.
[16] P. D. Berger, R. E. Maurer y G. B. Celli, Experimental Design, Springer, 2018.
[17] G. Duveiller, D. Fasbender y M. Meroni, «Revisiting the concept of a symmetric index of agreement for continuous datasets.,» *Scientific Reports,* vol. 6, 2016.
[18] L. F. Arias-Rodríguez, Z. Duan, J. J. Díaz-Torres, M. Basilio-Hazas, J. Huang, B. Udhaya Kumar, Y. Tuo y M. Disse, «Integration of remote sensing and mexican water quality monitoring system using an extreme learning machine.,» *Sensor,* vol. 21, nº 12, 2021.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Integración de ECSS e ISO/IEC 25000 para la evaluación del software espacial

Integration of ECSS and ISO/IEC 25000 for Space Software Evaluation

Ana Díaz-Muñoz
Universidad de Castilla-La Mancha
AQCLab Software Quality
Ciudad Real, España
0000-0001-6515-8835

Javier Verdugo Lara
Universidad de Castilla-La Mancha
AQCLab Software Quality
Ciudad Real, España
0000-0002-2526-2918

Moisés Rodríguez Monje
Universidad de Castilla-La Mancha
AQCLab Software Quality
Ciudad Real, España
0000-0003-2155-7409

Jose A. Barba
EUMETSAT
Darmstadt, Alemania
jose.barba@eumetsat.int

Jose Pumarega
Immediait Software
Madrid, España
jmpumarega@immediait.com

Resumen—*La* **evaluación de la calidad del software en en-tornos espaciales requiere combinar el cumplimiento de marcos normativos específicos con mecanismos de medición objetivos y reproducibles. Los estándares ECSS proporcionan una base só-lida de aseguramiento del software, incluyendo recomendaciones de métricas y niveles de rigor dependientes de criticidad. No obstante, el Software Metrication Handbook (ECSS-Q-HB-80-04A), basado en el modelo ISO/IEC 9126, no está alineado con la evolución posterior de los estándares internacionales de calidad, como la familia ISO/IEC 25000, que se ha consolidado como referencia en la evaluación del producto software.**

Por su parte, ISO/IEC 25010 ofrece un marco conceptual transversal aplicable a múltiples dominios, pero su aplicación directa en el sector espacial requiere adaptación para garantizar coherencia con los requisitos específicos de ECSS y con los distintos niveles de criticidad del software.

Este trabajo propone un modelo de calidad orientado al dominio espacial que integra el marco normativo ECSS con la estructura de ISO/IEC 25010, operacionalizando características y subcaracterísticas mediante métricas cuantificables y mecanismos de normalización dependientes de criticidad. El modelo combina análisis automatizado y registros verificables, permitiendo eva-luar de forma práctica y objetiva la calidad del producto software en proyectos espaciales regulados.

La propuesta ha sido definida iterativamente en el entorno industrial de EUMETSAT y constituye una aproximación siste-mática para actualizar e integrar el aseguramiento del producto software en el sector espacial.

***Palabras clave*—Modelo de Calidad Específico de Dominio, ECSS, ISO/IEC 25010, Criticidad del Software, Software Es-pacial, Evaluación de la Calidad del Producto**

***Abstract*—Software quality evaluation in space systems requi-res combining compliance with domain-specific regulatory frameworks with objective and reproducible measurement mechanisms. ECSS standards provide a solid foundation for software assur-an-ce, including metric recommendations and rigor levels dependent on software criticality. However, the Software Metrication Hand-book (ECSS-Q-HB-80-04A), based on the ISO/IEC 9126 model, is not aligned with the subsequent evolution of international quality standards such as the ISO/IEC 25000 family, which has become a reference for software product quality evaluation.**

On the other hand, ISO/IEC 25010 provides a domain-independent conceptual framework applicable across multiple sectors, but its direct application to the space domain requires adaptation to ensure consistency with ECSS requirements and different software criticality levels.

This work proposes a domain-specific quality model for the space sector that integrates the ECSS regulatory framework with the structure of ISO/IEC 25010, operationalizing charac-teristics and sub-characteristics through quantifiable metrics and criticality-dependent normalization mechanisms. The model combines automated analysis and verifiable evidence, enabling a practical and objective evaluation of software product quality in regulated space projects.

The proposal has been iteratively defined within the indus-trial environment of EUMETSAT and represents a systematic approach to updating and integrating software product assurance in the space domain.

***Keywords*—Domain-Specific Quality Model, ECSS, ISO/IEC 25010, Software Criticality, Space Systems, Software Quality Evaluation**

I. Introducción

La calidad del software en sistemas espaciales y otros entor-nos críticos constituye un aspecto fundamental para garantizar la fiabilidad, seguridad y continuidad operativa de los sistemas. A diferencia de otros dominios menos regulados, el

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

software espacial opera en contextos donde un fallo puede tener con-secuencias operacionales, económicas o incluso estratégicas de gran impacto [1] [2]. Por ello, la evaluación sistemática de la calidad del software no solo es una buena práctica de ingeniería, sino un requisito esencial dentro del ciclo de vida del producto.

En el ámbito europeo, los estándares de la familia ECSS (European Cooperation for Space Standardization) establecen el marco normativo que regula el desarrollo, verificación y aseguramiento del software espacial [1]. En particular, estos estándares definen requisitos relacionados con procesos, docu-mentación, verificación y control de calidad, proporcionando un marco sólido para proyectos espaciales.

De forma complementaria, el ECSS-Q-HB-80-04A [3] propone un conjunto estructurado de métricas, categorías y ejemplos de umbrales, incluyendo la consideración de niveles de criticidad. No obstante, dicho documento constituye una guía de referencia no normativa, basada en el modelo ISO/IEC 9126 [4], y sus umbrales se presentan a modo ilustrativo, requiriendo adaptación al contexto específico de cada proyecto. Además, no define un modelo integrado de calidad del producto que articule de forma sistemática características, subccaracterísticas, mecanismos de agregación y escalado de niveles de calidad a partir de métricas cuantificables.

Por otro lado, los modelos de calidad, como los definidos en la familia ISO/IEC 25000 [5], ofrecen una estructura concep-tual basada en características, subccaracterísticas y métricas que facilita la evaluación objetiva del software [6]. Estos modelos están concebidos como marcos genéricos aplicables a distintos tipos de sistemas y dominios, permitiendo su adaptación en función del contexto del producto y de los objetivos de evaluación. Sin embargo, en entornos altamente regulados y de elevada criticidad, como los sistemas espaciales, la evaluación del software debe considerar además restricciones normativas específicas y niveles diferenciados de riesgo. La ingeniería de sistemas críticos subraya la necesidad de enfoques adaptados a la complejidad y a los requisitos propios del dominio [7]. En consecuencia, la aplicación directa de modelos genéricos puede resultar insuficiente si no se integran explícitamente los marcos regulatorios correspondientes.

Estándares como NASA-STD-8739.8 [8] definen requisitos rigurosos de aseguramiento del software en sistemas espa-ciales, con especial énfasis en actividades de verificación, validación y gestión del riesgo. Sin embargo, al igual que ECSS, estos estándares están principalmente orientados a procesos y no proporcionan un modelo integrado de calidad del producto basado en características, métricas cuantificables y mecanismos de agregación. Esto refuerza la necesidad de complementar los marcos normativos con modelos de calidad estructurados y operativos.

En este contexto, surge la necesidad de definir modelos de calidad específicos de dominio que integren el rigor normativo de ECSS [1] con la estructura evaluable y orientada a métricas de ISO/IEC 25000 [5]. Asimismo, ECSS proporciona guías específicas para la definición y uso de métricas en el ámbito espacial [3], aunque sin un esquema evaluable integrado. La literatura ha señalado que los modelos de calidad excesivamen-te abstractos presentan dificultades para su aplicación efectiva cuando no existe una descomposición sistemática que vincule atributos de alto nivel con propiedades observables [9]. En este contexto, resulta necesario disponer de modelos que permitan obtener evidencias objetivas mediante procesos estructurados de evaluación [10], compatibles con herramientas de análisis existentes y adaptados a distintos niveles de criticidad del software.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera. La Sección II presenta los trabajos relacionados y el marco conceptual, abordando los modelos de calidad del software y el papel de los estándares ECSS en el dominio espacial.

La Sección III describe el contexto de colaboración entre AQCLab, IMMEDIA y EUMETSAT, así como la motivación y los objetivos que dieron lugar al modelo propuesto. La Sección IV detalla el modelo de calidad definido, incluyen-do su estructura, conjunto de métricas, consideración de la criticidad del software y el entorno de evaluación que se ha implementado sobre el modelo de calidad definido. La Sección V discute las principales aportaciones, diferencias frente a enfoques normativos, limitaciones actuales y potencial de reutilización en otros entornos regulados. Finalmente, la Sección VI presenta las conclusiones y líneas de trabajo futuro.

II. Trabajos Relacionados y Marco Conceptual

Esta sección presenta el marco conceptual en el que se fundamenta el trabajo propuesto, así como los principales enfoques existentes en la literatura sobre modelos de calidad del software.

A. Modelos de Calidad del Software

Los modelos de calidad del software han evolucionado desde aproximaciones iniciales centradas en atributos genera-les hacia marcos estructurados que relacionan características, subcaracterísticas y métricas cuantificables. Entre los modelos clásicos más influyentes se encuentra el definido en la familia ISO/IEC 25000 [11], particularmente el modelo de calidad del producto descrito en ISO/IEC 25010 [5]. Este modelo organiza la calidad en un conjunto jerárquico de características tales como fiabilidad, mantenibilidad, eficiencia o seguridad, proporcionando una base conceptual ampliamente aceptada en la ingeniería del software.

Complementariamente, ISO/IEC 25023 [6] define un con-junto de métricas destinadas a evaluar dichas características, estableciendo una relación explícita entre atributos de calidad y medidas cuantitativas. Este enfoque facilita la evaluación objetiva del software mediante indicadores verificables y re-producibles, alineándose con prácticas de aseguramiento de calidad basadas en evidencia.

No obstante, diversos trabajos han señalado que los modelos de calidad basados únicamente en la enumeración de características resultan insuficientes si no se estructuran para su aplicación en entornos industriales [10] [12]. En particular, la ausencia de una descomposición que vincule atributos de alto nivel con propiedades observables dificulta su aplicación práctica.

Trabajos recientes han puesto de manifiesto limitaciones en el uso de métricas de producto de forma aislada, especial-mente en contextos industriales, evidenciando la necesidad de modelos estructurados que permitan contextualizar, combinar y agregar dichas métricas de forma consistente [13]. En esta línea, se ha

ISBN: 978-989-36481-2-4

destacado la importancia de transformar métricas técnicas en indicadores de calidad accionables que apoyen la toma de decisiones en entornos reales [14] [15].

En consecuencia, han surgido enfoques orientados a la definición explícita de métricas, indicadores y modelos es-tructurados que permitan transformar atributos abstractos en criterios evaluables [16]. Estos enfoques buscan garantizar la trazabilidad entre requisitos de calidad, métricas y evidencias obtenidas durante el proceso de evaluación, aspecto especial-mente relevante en entornos regulados.

B. Calidad del Software en Sistemas Críticos y Espaciales

Los sistemas espaciales constituyen un caso particular dentro de los sistemas software críticos, caracterizados por estrictos requisitos de fiabilidad, disponibilidad y seguridad operacional. En el caso del software del segmento terrestre, como el considerado en este trabajo, los fallos pueden tener impacto directo en la operación de la misión y en la integridad de los datos generados. Esta criticidad operacional exige mecanismos rigurosos de aseguramiento de la calidad desde las fases iniciales del ciclo de vida [8].

En el dominio espacial, la calidad del software no se limita a atributos funcionales, sino que incorpora exigencias estrictas en términos de verificabilidad, trazabilidad, control de configuración y gestión del riesgo [17]. Los estándares ECSS establecen requisitos formales para el aseguramiento del software, incluyendo actividades de revisión, validación independiente, gestión de anomalías y documentación exhaus-tiva. Asimismo, la clasificación del software en diferentes niveles de criticidad determina el grado de rigor aplicable a los procesos de desarrollo y verificación.

Entre las características de calidad más relevantes en el dominio espacial destacan la fiabilidad, entendida como la capacidad del software para mantener su funcionamiento bajo condiciones especificadas; la mantenibilidad, particularmente relevante en entornos de larga duración operativa; y la trazabi-lidad, que permite garantizar la correspondencia entre requi-sitos, diseño, implementación y pruebas. Estas dimensiones adquieren un papel central en marcos regulatorios donde la evidencia documental y la verificabilidad formal constituyen requisitos imprescindibles para la aceptación del producto [18].

En consecuencia, la evaluación de la calidad del software en sistemas espaciales requiere no solo la consideración de atribu-tos generales definidos en modelos como ISO/IEC 25010, sino también su alineación explícita con los requisitos normativos y los niveles de criticidad establecidos por los estándares del dominio. Esta combinación introduce desafíos adicionales en la definición de métricas, umbrales y mecanismos de evalua-ción que permitan obtener evidencias objetivas y auditables en entornos altamente regulados [8].

C. Estándares ECSS como Marco de Referencia

Los estándares de la familia ECSS (European Cooperation for Space Standardization) constituyen el marco normativo de referencia para el desarrollo y aseguramiento del software en proyectos espaciales europeos. En particular, ECSS-Q-ST-80C define los requisitos de aseguramiento del produc-to software, estableciendo obligaciones formales en materia de procesos, revisiones técnicas, validación independiente, gestión de anomalías y control de configuración [1]. Estos estándares determinan el nivel de rigor exigible en función de la criticidad del software y del impacto potencial de los fallos sobre la misión.

Desde esta perspectiva, ECSS actúa como un marco nor-mativo que define qué requisitos deben cumplirse y qué evidencias de aseguramiento de la calidad deben generarse a lo largo del ciclo de vida del software. Sin embargo, su propósito no es proporcionar un modelo estructurado de evaluación basado en características de calidad y métricas cuantitativas, sino establecer criterios de cumplimiento y obligaciones de aseguramiento. En este sentido, puede distinguirse entre un estándar normativo —orientado a la definición de requisitos y obligaciones— y un modelo evaluable de calidad, cuya finalidad es estructurar atributos, métricas e indicadores que permitan medir de forma objetiva el nivel alcanzado por el producto software.

Aunque ECSS reconoce la importancia de las métricas y el ECSS-Q-HB-80-04A propone un conjunto estructurado de indicadores y ejemplos de umbrales [3], dicho documento constituye una guía no normativa, basada en ISO/IEC 9126, cuyos valores deben adaptarse al contexto de cada proyecto. No define un modelo integrado de calidad del producto con mecanismos sistemáticos de agregación y escalado de niveles a partir de métricas cuantificables. Por ello, resulta necesario operacionalizar el marco ECSS mediante un modelo estructu-rado alineado con estándares actuales como ISO/IEC 25000.

III. Contexto de Colaboración y Objetivos

El modelo de calidad propuesto se desarrolla en el marco de la colaboración entre EUMETSAT y el equipo conjunto de aseguramiento de la calidad formado por AQCLab e IMMEDIA IT, en proyectos de desarrollo y mantenimiento de software espacial. En este entorno, resulta necesario garantizar la aplicación coherente de los estándares ECSS, establecer criterios homogéneos de evaluación entre proyectos y adaptar las exigencias de calidad a los distintos niveles de criticidad del software.

AQCLab aporta experiencia en modelos de calidad, definición de métricas y estructuración de marcos evaluables ali-neados con estándares internacionales [19] [20] [21], mientras que IMMEDIA IT contribuye con conocimiento experto en la gestión y operación de entornos de ingeniería espacial. Esta combinación metodológica y operativa ha permitido abordar la medición de la calidad desde una perspectiva integrada, orien-tada tanto al cumplimiento normativo como a la evaluación técnica del producto software.

Desde el punto de vista de EUMETSAT, se identificó la necesidad de disponer de un marco estructurado que permi-tiera aplicar de forma sistemática los requisitos normativos establecidos en ECSS y los criterios operativos definidos en el entorno TSS QA (Technical and Scientific Support – Quality Assurance), garantizando trazabilidad entre requisitos, métricas y resultados de evaluación. Aunque existían métricas y umbrales definidos para determinados aspectos de calidad, estos no estaban integrados en un modelo conceptual unificado que relacionara características de calidad, indicadores cuanti-ficables y criterios de aceptación ajustados a criticidad.

A partir de este contexto, se planteó el diseño de un modelo de calidad que, partiendo de la base definida en TSS QA, integr-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

ara el marco normativo ECSS con una estructura basada en características y métricas alineada con ISO/IEC 25000, permitiendo su aplicación reproducible en un entorno industrial regulado. El objetivo principal es traducir requisitos normativos y operativos en un esquema evaluable, adaptable a la criticidad del software y orientado a la obtención de evidencias objetivas y auditables.

IV. Modelo de Calidad Definido

A partir del análisis del marco normativo ECSS, de los modelos de calidad del software definidos en la familia ISO/IEC 25000 y de las necesidades identificadas en el entorno industrial de EUMETSAT, se ha diseñado un modelo de calidad orientado al dominio espacial que permite medir, evaluar e identificar puntos de mejora del software de forma sistemática.

A. Enfoque General y Diseño del Modelo

El modelo propuesto se concibe como un modelo de calidad centrado en el producto software, orientado a estructurar y evaluar atributos verificables de los sistemas desarrollados por los proveedores de EUMETSAT. Aunque el aseguramiento del software en el dominio espacial implica necesariamente la con-sideración de procesos, revisiones y actividades organizativas, el objetivo principal del modelo se enfoca en proporcionar un marco sistemático para la evaluación del producto software a partir de evidencias objetivas y medibles.

Desde el punto de vista conceptual, el diseño del modelo integra tres fuentes complementarias. En primer lugar, el marco normativo ECSS establece los requisitos obligatorios de evaluación, clasificación por criticidad y generación de evidencias que deben cumplirse en proyectos espaciales. En segundo lugar, la estructura jerárquica de características y subcaracterísticas definida en la familia ISO/IEC 25000 pro-porciona una base conceptual para organizar los atributos de calidad de forma coherente y sistemática. Finalmente, la experiencia acumulada por el equipo AQCLab–IMMEDIA en la evaluación técnica de proyectos espaciales ha permitido adaptar e integrar estos marcos de referencia a las necesidades operativas del entorno industrial de EUMETSAT.

El modelo no reemplaza los requisitos previamente definidos en el entorno TSS QA, sino que los estructura dentro de un marco conceptual unificado que relaciona características de calidad, métricas cuantificables y criterios de aceptación. Aunque en el entorno TSS QA ya se habían definido determi-nadas características y métricas, no se había formalizado de manera sistemática cómo medirlas, normalizarlas, agregarlas ni escalarlas en niveles de calidad operativos. El modelo propuesto se define con la intención explícita de hacerlo completamente operativo, estableciendo mecanismos formales de cálculo, agregación y adaptación a criticidad. Esta estruc-turación facilita la trazabilidad entre requisitos normativos, indicadores medibles y resultados de evaluación, promoviendo una aplicación homogénea y reproducible de los criterios de calidad entre distintos proyectos.

En términos de diseño, el modelo se rige por los siguientes principios: (i) alineación explícita con el marco ECSS, (ii) coherencia con la estructura conceptual propuesta por ISO/IEC 25000, (iii) orientación a métricas y evidencias verificables y (iv) adaptabilidad a los distintos niveles de criticidad del software sin alterar la estructura conceptual subyacente.

B. Estructura del Modelo de Calidad

La estructura del modelo se organiza en torno a un conjunto de características de calidad que permiten agrupar y evaluar de forma coherente los distintos requisitos normativos y ope-rativos aplicables al software espacial, siguiendo enfoques estructurados de modelado de calidad del producto [22]. Estas características se han seleccionado considerando su relevancia en el dominio, su alineación con la familia ISO/IEC 25000 y su correspondencia con los requisitos establecidos en ECSS y en el entorno TSS QA.

En la versión actual del modelo se consideran las siguientes características de calidad:

- Mantenibilidad
- Efectividad del Desarrollo del Software
- Seguridad
- Propiedad Intelectual (IPR) [23]
- Fiabilidad
- Funcionalidad
- Eficiencia

Las definiciones formales de las características que se co-rresponden con el modelo ISO/IEC 25010 pueden consultarse en la familia ISO/IEC 25000 [5]. En este trabajo, dichas características se adaptan al contexto espacial e incorporan subcaracterísticas operativas y mecanismos de evaluación es-pecíficos, descritos en las secciones siguientes.

La selección de estas características responde a su co-rrespondencia directa con dimensiones definidas en ISO/IEC 25010, así como a su relevancia práctica en el contexto de proyectos espaciales regulados. En particular, se priorizan aquellas dimensiones que pueden ser evaluadas mediante mé-tricas objetivas y evidencias verificables.

Por otra parte, ciertas características definidas en modelos genéricos de calidad, como la usabilidad o la seguridad en su dimensión más amplia de safety, no se incluyen explícitamente en esta versión del modelo. En el caso de la usabilidad, su evaluación depende en gran medida del contexto operativo específico y de criterios de aceptación definidos a nivel de sistema o misión [24]. En cuanto a la seguridad, esta se gestiona principalmente mediante procesos específicos de aná-lisis de riesgos y aseguramiento independientes del modelo de calidad del producto software [25] [7], conforme a los marcos normativos aplicables. No obstante, estas dimensiones podrían integrarse en futuras extensiones del modelo si el contexto de los proyectos así lo requirieran.

C. Características y Subcaracterísticas

La estructura del modelo se articula en torno a un con-junto de características de calidad que se descomponen en subcaracterísticas operativas directamente evaluables mediante métricas y evidencias objetivas. A diferencia de modelos puramente conceptuales, la descomposición adoptada en este trabajo responde a la necesidad de vincular dimensiones de alto nivel con indicadores técnicos medibles en el entorno industrial considerado.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Mantenibilidad: Esta característica agrupa un conjunto de subccaracterísticas orientadas a evaluar la calidad estructural del código y su capacidad de evolución controlada. En el modelo se consideran las siguientes subccaracterísticas: *Incidencias de mantenimiento*, *Documentación de código*, *Complejidad*, *Estructuración de archivos*, *Tamaño de ficheros*, *Duplicación de código* y *Cobertura de código*. Estas dimensiones permi-ten capturar propiedades estructurales del producto software alineadas conceptualmente con la mantenibilidad definida en ISO/IEC 25010, y se apoyan en recomendaciones de métricas técnicas recogidas en ECSS-Q-HB-80-04A y en el modelo de evaluación de la mantenibilidad del laboratorio acreditado AQCLab, descrito en [19].

Efectividad del Desarrollo del Software: Se materializa a través de la subcaracterística *Efectividad técnica del desa-rrollo*, que recoge indicadores relacionados con la gestión técnica del desarrollo, seguimiento de anomalías y madurez de artefactos. Esta dimensión, que aparece en ECSS-Q-HB-80-04A, captura evidencias objetivas del entorno TSS QA (p.ej., trazabilidad de anomalías y estado de artefactos) que condi-cionan de manera directa la calidad observable del producto y su aceptabilidad en un contexto regulado.

Seguridad: Se descompone en *Incidencias de seguridad* y *Vulnerabilidad de componentes*, abordando tanto la presencia de debilidades detectadas mediante análisis estático como la identificación de vulnerabilidades conocidas en componentes de terceros. Conceptualmente se corresponde con la dimensión de seguridad definida en ISO/IEC 25010 y se alinea con los requisitos de protección y control establecidos en el marco normativo ECSS, así como con las dimensiones de calidad identificadas por EUMETSAT en el entorno TSS QA.

Propiedad Intelectual (IPR): Se materializa mediante la subcaracterística *Evidencias de IPR*, orientada a verificar el cumplimiento de requisitos relacionados con licencias y uso de componentes externos. Aunque esta dimensión no forma parte explícita del modelo ISO/IEC 25010, su inclusión responde a requisitos operativos del entorno espacial y a la necesidad de garantizar conformidad legal y contractual.

Fiabilidad: Se evalúa a través de las subccaracterísticas *Incidencias de fiabilidad* y *Cobertura de código*, vinculadas al seguimiento de defectos y a la estabilidad del comportamien-to del sistema. Esta característica mantiene correspondencia directa con la fiabilidad definida en ISO/IEC 25010 y ECSS-Q-HB-80-04A, integrándose con las prácticas de gestión de anomalías promovidas por ECSS.

Funcionalidad: Se descompone en *Completitud funcional* y *Corrección funcional*, en correspondencia con la dimen-

sión de adecuación funcional definida en ISO/IEC 25010 y funcionalidad en ECSS-Q-HB-80-04A. En esta versión del modelo no se incluye explícitamente la subdimensión de pertinencia, al considerarse cubierta indirectamente mediante la evaluación de completitud y verificación de requisitos en el contexto operativo considerado. La *Completitud funcional* evalúa el grado en que las funciones implementadas cubren la totalidad de los requisitos especificados para el sistema, y se operacionaliza mediante la cobertura de implementación de requisitos. La *Corrección funcional* se interpreta como el grado de confianza en que las funcionalidades implementadas se comportan conforme a lo especificado. En el modelo, esta dimensión se apoya en evidencias estructurales de verificación, tales como la cobertura de código obtenida durante las pruebas y el porcentaje de casos de prueba pasados con éxito. Esta ca-racterística permite evaluar el grado de cumplimiento funcio-nal del sistema en términos de implementación y verificación, manteniendo coherencia con las exigencias de trazabilidad y verificación establecidas en ECSS-Q-ST-80C [1].

Es importante distinguir entre la *Cobertura de implemen-tación de requisitos* y la *Cobertura estructural de código*. La primera evalúa la completitud respecto a los requisitos especi-ficados, mientras que la segunda corresponde con cobertura del código alcanzada con las pruebas. Ambas métricas capturan dimensiones complementarias de la verificación funcional.

Eficiencia: Se concreta en la subcaracterística *Utilización de recursos*, que evalúa el uso adecuado de recursos en el entorno operativo. Esta dimensión mantiene correspondencia concep-tual con la eficiencia del desempeño definida en ISO/IEC 25010, donde se considera una característica independiente. En ECSS-Q-HB-80-04A, sin embargo, la eficiencia se aborda como subcaracterística asociada a la funcionalidad, siguiendo la estructura de ISO/IEC 9126. En el modelo propuesto se adopta la organización de ISO/IEC 25010, manteniendo coherencia estructural con los estándares más recientes.

En conjunto, la estructura adoptada (ver Tabla I) establece una correspondencia explícita con un subconjunto de las dimensiones de calidad definidas en ISO/IEC 25010 [5] y con las características y recomendaciones técnicas recogidas en ECSS-Q-HB-80-04A [3], seleccionadas y adaptadas al contexto operativo de los proyectos espaciales considerados. Esta correspondencia permite traducir requisitos normativos y dimensiones de calidad en subccaracterísticas operativas directamente vinculadas a métricas cuantificables y evidencias verificables.

D. Conjunto de Métricas

La definición de métricas constituye el mecanismo funda-mental para operacionalizar las características y subcaracterís-ticas del modelo, permitiendo traducir requisitos normativos y dimensiones conceptuales de calidad en indicadores objetivos y verificables [26]. Bajo estos criterios, la estrategia adoptada se fundamenta en un conjunto de principios orientados a garan-tizar la coherencia, reproducibilidad y aplicabilidad industrial del modelo.

Tabla I. Estructura jerárquica del modelo de calidad.

Característica	**Subcaracterística**
Mantenibilidad	Incidencias de mantenibilidad Documentación de código Complejidad Estructuración de archivos Tamaño de ficheros Duplicación de código Cobertura de código
Efectividad del desarrollo del software	Efectividad técnica del desarrollo
Seguridad	Incidencias de seguridad Vulnerabilidad de componentes

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Propiedad Intelectual	Evidencias de propiedad intelectual (IPR)
Fiabilidad	Incidencias de fiabilidad Cobertura de código
Funcionalidad	Completitud funcional Corrección funcional
Eficiencia	Utilización de recursos

En primer lugar, las métricas deben ser *medibles*, es decir, definidas de forma precisa y susceptible de cálculo mediante herramientas técnicas o evidencias documentales verificables. En segundo lugar, deben asegurar la *trazabilidad* entre la característica de calidad evaluada, la subcaracterística corres-pondiente y el indicador cuantitativo empleado, permitien-do justificar de manera explícita la relación entre requisito normativo y resultado obtenido. En tercer lugar, se exige la *disponibilidad de evidencias*, de modo que cada métrica pue-da respaldarse mediante artefactos verificables (informes de análisis, resultados de herramientas, registros de seguimiento, etc.). Finalmente, se mantiene la *alineación con herramientas existentes*, garantizando que las métricas definidas puedan ob-tenerse mediante entornos de análisis técnico ya integrados en el flujo de desarrollo, sin imponer dependencias tecnológicas específicas.

Desde el punto de vista tipológico, el modelo distingue tres tipos principales de métricas:

- *Métricas de densidad*: expresan la relación entre el número de incidencias o defectos detectados y una magnitud de referencia, como el tamaño del código. Permiten normalizar resultados y facilitar la comparación entre proyectos [27].
- *Métricas de cobertura*: miden el grado de completitud de determinadas actividades o artefactos, como la cobertura de pruebas o la cobertura de requisitos, proporcionando un indicador directo de exhaustividad.
- *Evidencias binarias*: verifican la existencia o ausencia de determinados elementos requeridos, como la licencia de la propiedad intelectual, o evidencias de cumplimiento de requisitos específicos.

Esta tipología permite abarcar tanto dimensiones cuantitati-vas continuas como criterios de cumplimiento discreto, asegu-rando una evaluación equilibrada entre calidad estructural del producto y conformidad normativa.

El modelo contempla también la existencia de métricas transversales, es decir, medidas que afectan a e intervienen en la valoración de distintas características del modelo. Este es el caso de la cobertura de código, que se obtiene como un valor base único a partir del entorno de análisis y se reutiliza como evidencia que afecta tanto a la mantenibilidad como a la fiabilidad. No obstante, la cobertura no se contabiliza de forma redundante ni se suma de manera independiente en el resultado global. Su influencia se produce dentro de la función de evaluación específica de cada característica, donde actúa como uno de los factores que contribuyen al cálculo parcial correspondiente. De este modo, aunque un valor bajo de cobertura pueda afectar a varias características, su impacto está modulado por la estructura de agregación y ponderación definida en cada caso, evitando distorsiones por doble conteo.

En conjunto, las métricas adoptadas actúan como mecanis-mo de operacionalización del marco ECSS e ISO/IEC 25000, transformando requisitos normativos y recomendaciones de medición en indicadores concretos aplicables al producto software. De este modo, el modelo facilita la obtención de resultados reproducibles y comparables, ajustados a los distintos niveles de criticidad definidos en el entorno espacial considerado.

E. Consideración de la Criticidad del Software

El modelo incorpora de forma explícita la clasificación del software en distintos niveles de criticidad, conforme a las ca-tegorías A/B/C/D/D- definidas en el entorno de EUMETSAT y alineadas con el marco normativo ECSS [1]. Esta clasificación, recogida en la Tabla II, refleja el impacto potencial que un fallo del software podría tener sobre la misión, la operación del sistema o los activos asociados, y constituye un elemento determinante en el grado de rigor exigido en la evaluación del software.

En el modelo propuesto, la criticidad no modifica la es-tructura conceptual de características y subccaracterísticas, sino que actúa como un factor modulador de la evaluación. En particular, influye en tres dimensiones principales.

En primer lugar, afecta a la *interpretación de resultados*. Un mismo valor de una métrica puede tener implicaciones distintas según el nivel de criticidad del software evaluado. En sistemas de mayor criticidad, desviaciones moderadas pueden considerarse no aceptables, mientras que en sistemas de menor impacto operativo pueden admitirse márgenes más amplios.

En segundo lugar, la criticidad determina la *exigencia de calidad*, estableciendo umbrales diferenciados para determi-nadas métricas y reforzando la obligatoriedad de evidencias en categorías de mayor impacto. Este enfoque permite ajustar el nivel de severidad sin alterar la coherencia estructural del modelo.

En tercer lugar, la clasificación por criticidad influye en la *toma de decisiones*, especialmente en el contexto de *quality gates* y aceptación del producto. La combinación de resultados métricos y nivel de criticidad proporciona un marco objetivo para determinar si el software puede avanzar a la siguiente fase del ciclo de vida o requiere acciones correctivas adicionales.

De este modo, la incorporación de la criticidad garantiza que el modelo se adapta al riesgo asociado al sistema evaluado, manteniendo la proporcionalidad entre impacto potencial y nivel de exigencia técnica.

V. Entorno de medición para la evaluación de la calidad

El modelo se apoya en un entorno de medición y evaluación estructurado que combina análisis automatizado del código fuente, evaluación de componentes de terceros y revisión técnica y análisis de resultados. Las métricas estructurales se obtienen mediante herramientas de análisis estático [28] y plataformas de gestión de dependencias, mientras que deter-minadas subcaracterísticas, como funcionalidad o efectividad, requieren revisión estructurada basada en criterios predefini-dos.

Los valores obtenidos constituyen métricas base que pos-teriormente son normalizadas y agregadas conforme al ni-vel de criticidad del software. Aunque el entorno actual utiliza SonarQube y Revenera Code Insight, el modelo es conceptual-

ISBN: 978-989-36481-2-4

mente independiente de herramientas específicas, requiriendo únicamente evidencias equivalentes alineadas con las taxonomías de severidad y riesgo definidas.

La Figura 1 esquematiza el flujo completo del entorno de medición y el mecanismo de evaluación definido por el modelo, distinguiendo entre fuentes de evidencia, proceso de normalización y agregación dependiente de criticidad, y gene-ración de resultados estructurados de calidad. La componente de visualización se encuentra actualmente en desarrollo, por lo que aún no forma parte del núcleo evaluable consolidado del modelo.

A. Análisis de la calidad del código con SonarQube

SonarQube constituye la herramienta principal para la ob-tención automatizada de métricas estructurales dentro del modelo de calidad propuesto. En el entorno considerado, esta plataforma se emplea para analizar el código fuente y generar indicadores cuantitativos asociados a múltiples características del modelo, incluyendo mantenibilidad, seguridad, fiabilidad y funcionalidad.

En el caso de la funcionalidad, SonarQube puede apor-tar métricas de cobertura de código cuando está integrado con herramientas de prueba, aunque la evaluación de esta característica se fundamenta principalmente en evidencias de trazabilidad y verificación de requisitos.

El análisis realizado por SonarQube se basa en la aplicación de reglas estáticas clasificadas por severidad (ver Tabla III), así como en el cálculo de métricas estructurales como complejidad ciclomática, tamaño de archivos, duplicación de código y cobertura de pruebas. Estas reglas permiten identificar incum-plimientos de estándares de codificación, defectos potenciales, vulnerabilidades y problemas de diseño que pueden afectar a la calidad del producto software.

En el modelo definido para EUMETSAT, las métricas obtenidas mediante SonarQube no se utilizan como valores absolutos, sino que se transforman en indicadores normaliza-dos en función del tamaño del código (por ejemplo, mediante densidades relativas a las líneas de código lógicas) y del nivel de criticidad del software. Este enfoque permite comparar proyectos de distinta magnitud y ajustar los umbrales de aceptación según la criticidad A/B/C/D/D-.

En particular, SonarQube proporciona los valores base nece-sarios para el cálculo de métricas específicas asociadas a múlti-ples subccaracterísticas del modelo. Estas métricas se expresan fundamentalmente en términos de densidades normalizadas y se clasifican por severidad cuando procede.

Para la característica de *Mantenibilidad*, SonarQube permite calcular:

- Densidades de incidencias de mantenibilidad por severidad (Blocking, Critical, Major, Minor, Info).
- Densidad de documentación de código.
- Densidades asociadas a complejidad estructural (por ejemplo, densidad de ficheros con complejidad inferior a umbrales definidos).
- Densidades asociadas a estructuración de archivos (nú-mero de métodos por fichero).
- Densidades relativas al tamaño de fichero.
- Densidad de duplicación de código.
- Densidad de cobertura de código.

Para la característica de *Seguridad*, se obtienen:

Tabla II. Categorías de criticidad del software en el entorno EUMETSAT

Categoría	**Descripción**	**Ejemplos típicos**
A	Software cuya función es el único medio para implementar una función cuya pérdida provocaría consecuencias catastróficas. Su fallo puede comprometer la misión, la seguridad o activos críticos.	Software no identificado en el segmento terrestre de EUMETSAT.
B	Software cuya función es el único medio para implementar una función cuya pérdida provocaría consecuencias críticas. Puede existir provisión compensatoria en determinadas condiciones (hardware, software adicional o procedimiento operativo).	Software de subsistemas de telemando; procesamiento L0 de datos de carga útil.
C	Software cuya función es el único medio para implementar una función cuya pérdida provocaría consecuencias mayores. Puede contar con provisiones compensatorias que reduzcan su criticidad.	Software de procesamiento de telemetría; procesamiento L1/L2 de datos.
D	Software cuya función, en caso de fallo, no produce consecuencias críticas ni mayores, pero sí impacto operativo limitado.	Software de monitorización off-line.
D-	Software cuya función no tiene consecuencias operativas directas en caso de fallo. Se utiliza típicamente en estudios, pruebas de concepto o análisis no operacionales.	Prototipos de algoritmos; software exploratorio; herramientas de análisis experimental.

Tabla III. Definición de severidades de incidencias

Severidad	Definición
Blocking	Incidencias que con alta probabilidad causarán un fallo del software.
Critical	Incidencias que pueden causar un fallo bajo determinadas condiciones operativas.
Major	Incidencias que impactan la mantenibilidad o comprensión del software.
Minor	Incidencias relacionadas con estilo de codificación, unifor-midad o aspectos cosméticos.
Info	Incidencias no directamente relacionadas con la calidad fun-cional del producto (por ejemplo, aspectos documentales).

ISBN: 978-989-36481-2-4

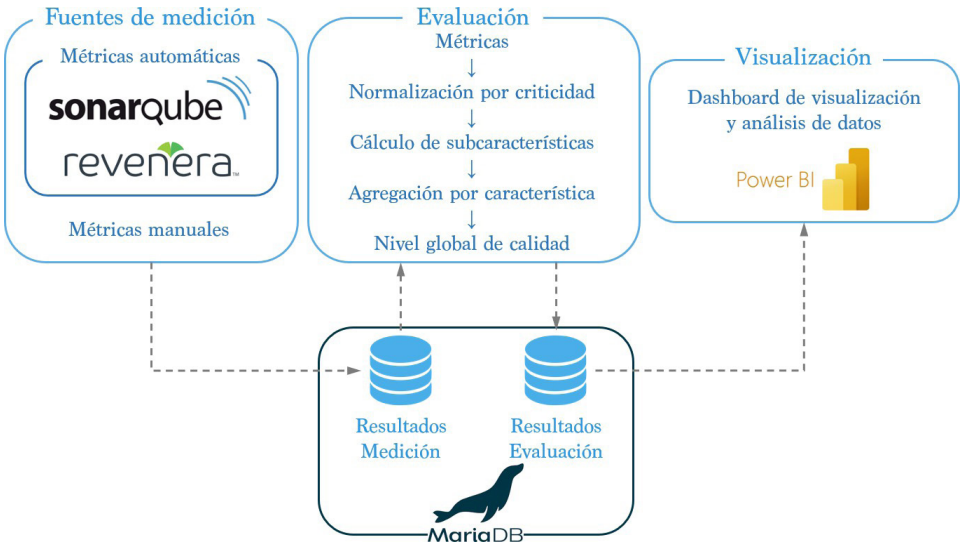


Figura 1. Flujo de obtención de métricas, evaluación y generación de resultados de calidad en el modelo propuesto.

- Densidades de incidencias de seguridad clasificadas por severidad (Blocking, Critical, Major, Minor, Info).

En el caso de *Fiabilidad*, SonarQube proporciona:

- Densidades de incidencias de fiabilidad por severidad.
- Densidad de cobertura de código como indicador com-plementario de corrección.

Estos valores base se integran posteriormente en funciones de evaluación que determinan el nivel de calidad de cada sub-característica, considerando explícitamente la clasificación de criticidad del software. De este modo, SonarQube actúa como generador de evidencias objetivas que alimentan el mecanismo formal de cálculo del modelo, garantizando reproducibilidad, trazabilidad y alineación con los procesos de aseguramiento de calidad definidos en el entorno industrial.

B. Análisis de vulnerabilidades y evidencias de propiedad intelectual con Revenera Code Insight

El uso extensivo de componentes de terceros en proyectos software modernos introduce riesgos asociados a vulnerabili-dades conocidas y dependencias transitivas, cuya persistencia puede extenderse durante largos periodos si no se gestionan adecuadamente [29]. El modelo incorpora el uso de Revenera Code Insight como herramienta especializada para el análisis de componentes de terceros y la verificación de aspectos relacionados con la propiedad intelectual del software. Esta herramienta permite identificar dependencias externas, cla-sificar su estado y evaluar el cumplimiento de requisitos documentales asociados a licencias y derechos de autor.

Para el *Análisis de vulnerabilidades de componentes*, Re-venera Code Insight proporciona un inventario estructurado de los componentes utilizados en el producto software y permite su clasificación conforme a políticas de riesgo y cumplimiento configuradas en el entorno de evaluación. En el contexto considerado, dichas políticas materializan una taxonomía operativa que refleja distintos niveles de riesgo o incumplimiento potencial.

En el modelo, estas clasificaciones se transforman en mé-tricas de densidad normalizadas, incluyendo:

- Densidad de elementos clasificados como U.
- Densidad de elementos clasificados como P1.
- Densidad de elementos clasificados como P2.
- Densidad de elementos clasificados como P3.

La categoría U (*Unknown*) agrupa aquellos componentes cu-ya información de licencia o estado no puede determinarse au-tomáticamente y que requieren revisión adicional. La categoría P1 identifica componentes con el nivel más alto de riesgo o incumplimiento potencial respecto a la política de uso definida, normalmente asociados a restricciones incompatibles o vulne-rabilidades críticas. La categoría P2 agrupa componentes con riesgo intermedio, que pueden requerir evaluación específica o mitigación antes de su aceptación. Finalmente, la categoría P3 incluye componentes con riesgo bajo o condiciones de uso aceptables bajo las directrices establecidas.

Esta clasificación permite cuantificar la exposición del software a riesgos derivados de dependencias externas y adaptar su interpretación al nivel de criticidad del sistema.

Adicionalmente, Revenera Code Insight permite la *Eva-luación de evidencias de propiedad intelectual* verificando la existencia y consistencia de información relacionada con licencias y copyright [30]. Las métricas asociadas incluyen:

- Verificación de la existencia de fichero README.
- Verificación de la identificación explícita de la licencia.
- Densidad de ficheros con evidencia de licencia.
- Densidad de ficheros que incluyen copyright de EU-METSAT.
- Densidad de ficheros que incluyen copyright externo.
- Densidad de ficheros sin declaración de copyright.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Al igual que en el caso de las métricas obtenidas mediante SonarQube, los valores base proporcionados por Revenera Code Insight se integran en el mecanismo de evaluación del

modelo y se interpretan en función del nivel de criticidad del software, garantizando coherencia entre riesgo técnico, riesgo legal y exigencia de calidad.

VI. Conclusiones y Trabajo Futuro

Este trabajo presenta un modelo de calidad orientado al dominio espacial que integra el marco normativo ECSS con la estructura conceptual de ISO/IEC 25000, transformando requisitos regulatorios en características, subcaracterísticas y métricas cuantificables adaptadas a criticidad. A diferencia de aproximaciones puramente normativas o de listados aislados de métricas, la propuesta define mecanismos formales de medición, normalización y agregación que permiten obtener niveles de calidad operativos y reproducibles.

El modelo ha sido implementado en un entorno de medición que combina análisis automatizado y revisiones estructuradas, permitiendo medir y evaluar de forma sistemática la calidad de productos software en el entorno industrial considerado.

Asimismo, el modelo ha sido aplicado en el entorno de EUMETSAT sobre múltiples productos software del segmento terrestre con distintos niveles de criticidad, permitiendo ob-tener evaluaciones consistentes entre versiones y proyectos, así como facilitar la identificación de debilidades estructurales y la comparación homogénea de resultados. Estos resultados preliminares ponen de manifiesto la aplicabilidad práctica del modelo como mecanismo de evaluación reproducible en entornos reales.

No obstante, el entorno actual se centra en el cálculo y evaluación de métricas, siendo necesaria la evolución hacia un entorno de visualización integrado que permita a los distintos *stakeholders* conocer de forma clara y consolidada el estado de calidad de los productos desarrollados. Actualmente se está trabajando en el diseño e implementación de este entorno como extensión natural del modelo.

Entre las limitaciones del trabajo se encuentran la ausencia de una validación empírica detallada, así como la posible adaptación requerida para su aplicación en otros contextos organizativos o sectores regulados. Como líneas futuras se plantea (i) ampliar la aplicación industrial del modelo, (ii) incrementar el grado de automatización del proceso completo de evaluación y (iii) realizar estudios empíricos que analicen la relación entre los niveles de calidad obtenidos y resultados observables del ciclo de vida del software.

Agradecimientos

This research was supported by the ATHENA-HYGIEIA project (PID2024-155693NB-C42), funded by MCIU/AEI/10.13039/501100011033 / FEDER, UE; the

ANDANTE project (SBPLY/24/180225/000039) funded with support from the EU through the ERDF and the Regional Government of Castilla-La Mancha and the Castilla-La Mancha Research and Innovation Agency. It also received financial support for the execution of applied research projects within the SINERGIA (2025-GRIN-38310) framework, part of the UCLM Own Research Plan, 85 % co-funded by the European Regional Development Fund (FEDER).

Referencias

[1] *ECSS-Q-ST-80C Rev.2: Software product assurance*, European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Std., Apr. 2025, 30 April 2025. [Online]. Available: https://ecss.nl/standard/ecss-q-st-80c-rev-2-software-product-assurance-30-april-2025/

[2] *NASA-HDBK-2203: NASA Software Engineering Handbook*, National Aeronautics and Space Administration (NASA) Std., 2022. [Online]. Available: https://standards.nasa.gov/standard/NASA/NASA-HDBK-2203

[3] *ECSS-Q-HB-80-04A: Software metrication handbook*, European Cooperation for Space Standardization (ECSS) Std., 2010. [Online]. Available: https://ecss.nl/hbstms/ecss-q-hb-80-04a-software-metrication-handbook/

[4] *ISO/IEC 9126:2001 Software engineering — Product quality*, Inter-na-tional Organization for Standardization Std., 2001.

[5] *Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Product quality model*, International Organization for Standardization Std., 2023. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/78176.html

[6] *Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Measurement of system and software product quality*, International Organization for Standardization Std., 2016. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/35747.html

[7] N. G. Leveson, *Engineering a Safer World: Systems Thinking Applied to Safety*. The MIT Press, 01 2012. [Online]. Available: https://doi.org/10.7551/mitpress/8179.001.0001

[8] *NASA-STD-8739.8A: Software Assurance and Software Sa-fety Standard*, National Aeronautics and Space Administra-tion (NASA) Std., 2022, revision B. [Online]. Available: https://standards.nasa.gov/standard/nasa/nasa-std-87398

[9] F. Deissenboeck, S. Wagner, M. Pizka, S. Teuchert, and J.-F. Girard, "An activity-based quality model for maintainability," in *2007 IEEE International Conference on Software Maintenance*, 2007, pp. 184–193.

[10] *ISO/IEC 25040:2024 Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Quality evaluation framework*, International Organization for Standardization Std., 2024. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/83467.html

[11] *Systems and software engineering — Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) — Guide to SQuaRE*, International Organization for Standardization Std., 2014. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/64764.html

[12] C. Becker, S. Betz, R. Chitchyan, L. Duboc, S. M. Easterbrook, B. Penzenstadler, N. Seyff, and C. C. Venters, "Requirements: The key to sustainability," *IEEE Software*, vol. 33, no. 1, pp. 56–65, 2016.

[13] W. Chen, H. Yu, G. Fan, Z. Huang, and Y. Liang, "Usage patterns of software product metrics in assessing developers' output: A comprehensive study," *Information and Software Technology*, vol. 189, p. 107935, 2026. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950584925002745

[14] S. Martínez-Fernández, A. Jedlitschka, L. Guzmán, and A. M. Vollmer, "A quality model for actionable analytics in rapid software develop-ment," in *2018 44th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications (SEAA)*, 2018, pp. 229–236.

[15] S. Martínez-Fernández, A. Jedlitschka, L. Guzmán, and A. M. Vollmer, "A quality model for actionable analytics in rapid software develop-ment," in *2021 IEEE 47th Euromicro Conference on Software Enginee-ring and Advanced Applications (SEAA)*, 2021.

[16] M. Rodríguez, J. R. Oviedo, and M. Piattini, "Evaluation of software product functional suitability: A case study," *Software Quality Profes-sional*, vol. 18, no. 3, pp. 18–30, 2016.

[17] *ISO/IEC/IEEE 12207:2017 Systems and software engineering — Software life cycle processes*, International Organization for Standardization Std., 2017. [Online]. Available: https://www.iso.org/standard/90219.html

[18] R. Lutz, "Analyzing software requirements errors in safety-critical, embedded systems," in *[1993] Proceedings of the IEEE International Symposium on Requirements Engineering*, 1993, pp. 126–133.

[19] J. Verdugo, J. Lama, M. Rodríguez, and M. Piattini, "Connecting research and practice for software product quality evaluation and certifi-cation: A software laboratory's 25-year journey," *IEEE Software*, vol. PP, pp. 1–10, 05 2024.

[20] J. Verdugo, J. Oviedo, M. Rodríguez, and M. Piattini, *Experiences with requirements in an accredited laboratory for software and data quality evaluation*, 2025.
[21] A. Díaz-Muñoz, J. Verdugo, M. Rodríguez, J. A. Cruz-Lemus, R. Martínez-Gasca, and M. Piattini, "Environment for the evaluation of hybrid (classical–quantum) systems analyzability [focus: Quantum software and its engineering]," *IEEE Software*, vol. 42, no. 5, pp. 73–81, 2025.
[22] R. Dromey, "A model for software product quality," *IEEE Transactions on Software Engineering*, vol. 21, no. 2, pp. 146–162, 1995.
[23] *ISO/IEC 5230:2020 OpenChain Specification*, International Organiza-tion for Standardization Std., 2020.
[24] *ISO 9241-11:2018 Ergonomics of human-system interaction — Part 11: Usability*, International Organization for Standardization Std., 2018.
[25] A. Avizienis, J.-C. Laprie, B. Randell, and C. Landwehr, "Basic concepts and taxonomy of dependable and secure computing," *IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing*, vol. 1, no. 1, pp. 11–33, 2004.
[26] *ISO/IEC/IEEE 15939:2017 Systems and software engineering — Mea-surement process*, International Organization for Standardization Std., 2017.
[27] N. E. Fenton and S. L. Pfleeger, *Software Metrics: A Rigorous and Practical Approach*, 2nd ed. PWS Publishing, 1998.
[28] N. Ayewah, W. Pugh, D. Hovemeyer, J. D. Morgenthaler, and J. Penix, "Using static analysis to find bugs," *IEEE Software*, vol. 25, no. 5, pp. 22–29, 2008.
[29] S. Kumar, L. Sampaio, A. Martin, A. Brito, and C. Fetzer, "A com-prehensive study on the impact of vulnerable dependencies on open-source software," 12 2025.
[30] A. Mathur, H. Choudhary, P. Vashist, W. Thies, and S. Thilagam, "An empirical study of license violations in open source projects," in *2012 35th Annual IEEE Software Engineering Workshop*, 2012, pp. 168–176.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Jornalismo digital

Do espectador ao interator, com interatividade e agência narrativa para o envolvimento dos jovens adultos

Digital journalism

From Spectator to Interactor — Interactivity and Narrative Agency for Young Adult Engagement

Carlos Queirós
DigiMedia, Department of Communication and Art,
University of Aveiro
Portugal
carlosqueiros@ua.pt

Hélder Caixinha
DigiMedia, Department of Communication and Art,
University of Aveiro
Portugal
caixinha@ua.pt

***Resumo* — O jornalismo digital enfrenta um crescente afastamento dos jovens adultos dos formatos noticiosos tradicionais, marcados pela linearidade e pela ausência de agência do utilizador. Este artigo investiga de que modo a interatividade e a agência narrativa podem reforçar o envolvimento dos jovens adultos com o jornalismo digital, propondo três proposições teóricas: a agência narrativa aumenta o envolvimento emocional; múltiplas perspetivas aprofundam a compreensão de acontecimentos complexos; e a multilinearidade não compromete a integridade editorial. Para responder a estas proposições, recorre-se a uma Arquitetura Narrativa Interativa (ANI), desenvolvida em trabalho anterior, como modelo teórico de *design* narrativo centrado no utilizador. A proposta é sustentada pela convergência entre a teoria da narrativa interativa e o *design* centrado no utilizador, corroborada por evidências empíricas sobre padrões de leitura em profundidade. A fundamentação teórica desenvolvida sugere que a interatividade e a agência narrativa constituem mecanismos promissores para transformar o consumo noticioso numa experiência exploratória, participativa e com significado, alinhada com as práticas mediáticas das audiências jovens.**

Palavras Chave – **narrativas interativas; jornalismo digital; jovens adultos; agência narrativa; interatividade; design narrativo; envolvimento; consumo noticioso.**

***Abstract* — Digital journalism faces a growing disengagement of young adults from traditional news formats, characterised by linearity and the absence of user agency. This article investigates how interactivity and narrative agency can strengthen young adults' engagement with digital journalism, proposing three theoretical propositions: narrative agency increases emotional engagement; multiple perspectives deepen the understanding of complex events; and multilinearity does not compromise editorial integrity. To address these propositions, an Interactive Narrative Architecture (INA), developed in previous work, is employed as a theoretical model of user-centred narrative design. The proposal is supported by the convergence between interactive narrative theory and user-centred design, corroborated by empirical evidence on deep reading patterns. The theoretical framework developed suggests that interactivity and narrative agency constitute promising mechanisms for transforming news consumption into an exploratory, participatory and meaningful experience, aligned with the media practices of young audiences.**

Keywords – interactive narratives; digital journalism; young adults; narrative agency; interactivity; narrative design; engagement; news consumption.

I. Introdução

O jornalismo digital tem explorado narrativas interativas para envolver o público, recorrendo a reportagens com texto, áudio, vídeo e visualizações de dados, aproveitando o potencial interativo do meio digital como alternativa ao ciclo noticioso contínuo de 24 horas [1]. Neste contexto, verifica-se uma interatividade centrada na navegação, personalização e participação social, ou seja, "numa lógica comunicacional entre o utilizador e o sistema, ou entre pessoas mediadas por esse sistema" [2]. Este é o panorama atual: embora a interatividade esteja presente em múltiplas formas de consumo noticioso, ela permanece, na maioria dos casos, subordinada a um paradigma narrativo linear em que o utilizador é conduzido por um percurso fixo unidirecional. Contudo, o conceito de interatividade pode ter outra abordagem: "pode ser propriedade intrínseca de um objeto específico ou de uma experiência com esse objeto" [2]. Neste sentido, ela deixa de ser apenas uma via de comunicação entre utilizador e sistema, passando a estruturar a própria narrativa jornalística; esta interatividade torna-se, assim, elemento central, permitindo ao público personalizar a experiência narrativa dentro da peça noticiosa. Aproxima-se dos jogos, ao promover a imersão e escolha ativa do percurso [3], [4].

A experiência que resulta desta interatividade já está consolidada teórica e empiricamente na literatura. Ela desdobra-se em dois sentidos complementares: o utilizador é convidado a tornar-se participante ativo, experienciando maior envolvimento e satisfação à medida que assume controlo sobre o percurso narrativo [5]. A agência narrativa não se limita à seleção de opções, mas corresponde, no sentido proposto por Murray [6], à possibilidade de realizar ações significativas dentro do sistema narrativo e observar as suas consequências. Neste enquad-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

ramento, o utilizador não altera o enunciado editorial definido pelo autor, mas participa na instanciação do percurso narrativo, configurando uma forma de autoria procedimental característica das narrativas digitais interativas propostas por Hartmut Koenitz [7]. Por outro lado, esta experiência está associada a indicadores de bem-estar subjetivo e psicológico, através da vivência hedónica, emoções positivas e satisfação (dimensões emocional e cognitiva) e de eudemonismo, expressa na sensação de propósito, na reflexão e crescimento pessoal [8], [9].

A questão de partida que guia este estudo é: De que forma a integração de estruturas narrativas interativas e multilineares, centradas na interação e agência do utilizador, pode reforçar o envolvimento dos jovens adultos com o jornalismo digital?

A partir da questão de partida, foram formuladas três proposições (P1, P2 e P3) teóricas que orientam o desenvolvimento conceptual e a investigação empírica futura:

- P1 - A interatividade e a agência narrativa aumentam o envolvimento emocional dos jovens adultos com conteúdos jornalísticos;
- P2 - Múltiplas perspetivas fornecem um maior grau de compreensão de uma situação complexa do que uma única perspetiva;
- P3 - A introdução de estruturas multilineares e escolhas interativas não compromete a integridade semântica nem a intencionalidade editorial do jornalista.

Este artigo faz uma reflexão preliminar sobre uma estrutura funcional de interatividade e de agência nas narrativas digitais, e como essa relação pode contribuir para reforçar o envolvimento dos jovens adultos com o conteúdo noticioso digital. Este trabalho constitui uma primeira etapa de uma investigação doutoral em curso sobre narrativas interativas aplicadas ao jornalismo digital.

II. O problema: Limitações das narrativas jornalísticas lineares no contexto digital

A literatura e os relatórios nacionais e internacionais têm vindo a assinalar um decréscimo relativo do consumo noticioso através de *media* tradicionais entre públicos mais jovens, bem como uma crescente centralidade das redes sociais e das plataformas de vídeo no acesso à atualidade, o que tende a fragmentar o contexto informativo e a dificultar uma compreensão mais sistémica dos acontecimentos [10], [11]. Por sua vez, muitas notícias difundidas em redes sociais ou em plataformas digitais associadas a marcas informativas continuam a reproduzir lógicas narrativas herdadas dos *media* tradicionais, marcadas pela linearidade, pela hierarquização editorial e por fluxos predominantemente unidirecionais [12]. Contudo, esta configuração contrasta com os ambientes digitais contemporâneos, mais dinâmicos, exploratórios e personalizáveis.

Neste quadro, revelam-se particularmente úteis três enquadramentos teóricos complementares: a reflexão de Janet Murray sobre as dimensões estético-experienciais, nomeadamente a imersão, agência e transformação [6]; a perspetiva da *media ecology*, cujas raízes remontam a Marshall McLuhan e que foi sistematizada por Neil Postman, que entende os *media* como ambientes que moldam perceções, práticas e formas de discurso [13]; e a noção de *participatory culture* de Henry Jenkins, centrada nas práticas de circulação, apropriação e participação ativa dos utilizadores na cultura mediática [14].

É neste ecossistema que os jovens habitam e se revelam como interatores [6], procurando experiências que valorizem a autonomia, o controlo narrativo e a personalização do conteúdo. No entanto, a narrativa jornalística tradicional, sendo de base linear, não acompanha esta transformação mediática, limitando a participação e a agência do utilizador. Esta é uma perceção que encontra fundamento em Mikhail Bakhtin (1895-1975): o modelo narrativo dominante tende para o monologismo, não pela ausência de vozes, mas porque o editor (jornalista) determina o enquadramento, a hierarquia e o sentido final das perspetivas apresentadas, sem que o utilizador tenha agência sobre o percurso interpretativo [15].

Verifica-se assim, um desfasamento entre a prática jornalística e as expectativas narrativas das audiências jovens, que valorizam formatos mais interativos, multilineares e ajustados à lógica dos *media* digitais. Consequentemente, os utilizadores jovens acedem a ocorrências descontextualizadas em vez de factos problematizados, reduzindo a capacidade crítica e o papel do jornalismo na formação cívica [16], [17]. É precisamente para responder a este desfasamento que se propõe uma reconfiguração da narrativa jornalística digital, centrada na interatividade e na agência narrativa como mecanismos de envolvimento dos jovens adultos.

III. A solução: A narrativa interativa como forma de experienciar o acontecimento jornalístico

Para responder a este afastamento do jornalismo tradicional, propõe-se uma solução baseada numa arquitetura narrativa multilinear e interativa, que promova o consumo informativo, mas também a interpretação do acontecimento como fenómeno dinâmico e contextual. Esta abordagem visa superar a lógica da mera transmissão factual, permitindo ao utilizador aceder a múltiplas ocorrências e camadas de sentido (através da agência narrativa), em sintonia com a complexidade da realidade social.

Das inovações mais recentes destacam-se algumas soluções que são utilizadas pelo jornalismo digital a fim de estruturar narrativas interativas e multilineares: por exemplo a revista Time digital reinventou a sua tradicional edição "Pessoa do Ano" (2024)[1] incorporando um menu interativo superior que permite ao leitor escolher idioma, obter resumos em áudio ou até mesmo conversar com um *chatbot* de IA sobre o conteúdo do artigo [18]. De modo similar, os jogos narrativos têm sido empregues para tornar o leitor o protagonista da reportagem, como é o caso do "O *Ramping Rush: Ambulance Rescue*"[2] é um "jogo-notícia" em que o utilizador assume o papel de um paramédico em tempo real; A narrativa é temporal, construída pelas ações do utilizador. Como referem os seus criadores, o objetivo não é "ganhar" no sentido clássico, mas sim demonstrar que nenhuma estratégia consegue salvar todos os pacientes, enfatizando a gravidade do problema através da frustração inevitável do jogo [19]. Como referência empírica a um *layout*

[1] https://time.com/7200212/person-of-the-year-2024-donald-trump/
[2] https://www.eurekalert.org/news-releases/1064001

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

narrativo funcional, destaca-se o documentário *Last Hijack Interactive* (2014)[3] [20], que demonstra uma Arquitetura Narrativa Interativa (ANI) centrada no utilizador combinando: Linha temporal interativa, para explorar diferentes fases do acontecimento; Percursos narrativos ramificados por pontos de decisão; Recursos multimodais (vídeo, mapas, infografias, áudio contextual), ancorados em princípios de hierarquia visual, arquitetura da informação e controle de navegação; Interface com *design* responsivo, capaz de se adaptar ao ritmo e interesse do utilizador, oferecendo *feedback* imediato e escolhas significativas.

No plano epistemológico, a proposta parte da distinção avançada por Lia Seixas (2009) entre facto e acontecimento: enquanto o facto é o resultado de uma ação passada e fixada discursivamente (e verificável), o acontecimento é um processo em curso, com múltiplas entradas (de novos eventos) e sentidos possíveis [21]. Desta forma, uma ANI permite que o utilizador, não apenas conheça um facto já encerrado, mas experiencie o acontecimento como campo aberto de relações, agindo como interator com agência [6] num espaço narrativo que simula a fluidez e polifonia da realidade. É uma proposta que articula *design* de interação, epistemologia narrativa e envolvimento do utilizador.

IV. A Proposta: Arquitetura Narrativa Interativa

A ANI constitui a proposta conceptual central desta investigação, apresentada e desenvolvida em detalhe em trabalho anterior [22]. Trata-se de uma estrutura que organiza a peça noticiosa digital de forma modular e multilinear, permitindo ao utilizador configurar percursos narrativos através de escolhas informadas, dentro de um espaço editorial definido pelo jornalista-autor. No âmbito do ecossistema mediático jornalístico, a ANI não substitui a narrativa linear, mas complementa-a, respondendo ao desfasamento identificado entre a prática jornalística tradicional e as expectativas das audiências jovens.

O ponto de partida epistemológico da ANI é o percurso da realidade ao acontecimento jornalístico: a realidade gera factos fragmentados e dispersos; estes são selecionados e hierarquizados num objeto de realidade; e finalmente articulados num acontecimento jornalístico, uma construção narrativa com relevância social. É sobre este acontecimento, entendido como processo em aberto e não como facto encerrado, que a ANI opera, permitindo ao utilizador experienciá-lo como campo de múltiplas relações [22]

Do ponto de vista estrutural, a ANI organiza-se em torno de uma *timeline* interativa que organiza cronologicamente os factos que sustentam o acontecimento. Sobre esta linha temporal distribuem-se módulos informativos, que se constituem como unidades estruturais repetíveis e aplicáveis a qualquer peça noticiosa. Cada módulo é composto por três camadas informativas de profundidade crescente (ver a Figura 1) [22]:

C1 — Marco Noticioso (Lead – o conhecimento):

Esta é a camada factual e obrigatória, presente em todos os módulos. Estabiliza o acontecimento jornalístico, constituindo o ponto mínimo a partir do qual a narrativa se torna possível. Corresponde ao nível de informação que qualquer utilizador recebe independentemente do percurso escolhido, garantindo a integridade editorial da peça.

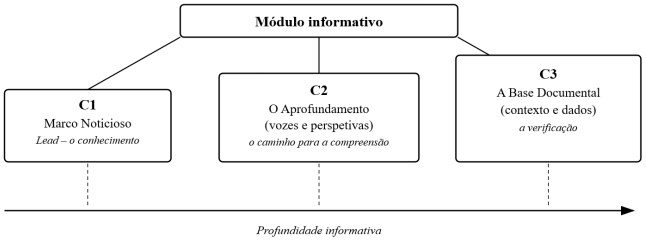


Figura 1. – O módulo e as suas três camadas de informação

C2 — O Aprofundamento (vozes e perspetivas – o caminho para a compreensão):

A C2 é a camada de aprofundamento e interpretação, sendo ativada quando existe matéria relevante. Integra depoimentos, entrevistas e perspetivas de atores sociais diretamente ligados ao acontecimento [23]. É nesta camada que se materializa a polifonia de Mikhail Bakhtin ao incorporar múltiplas vozes que revelam a pluralidade da realidade social e reforçam o envolvimento do utilizador com o conteúdo [15].

C3 — A Base Documental (contexto e dados – a verificação):

A terceira camada contextual e interpretativa, que enquadra o acontecimento num campo mais amplo de relações — históricas, sociais, estatísticas ou comparativas. É a camada que mais diretamente apoia a compreensão crítica e o pensamento sistémico, respondendo à P2 formulada neste artigo: a exposição a múltiplas perspetivas e contextos aprofunda a compreensão de acontecimentos complexos.

A estrutura modular é concebida e configurada pelo *Cyberbard*, conceito cunhado por Janet Murray [6] para designar o autor de sistemas narrativos operacionalizado na era digital. No contexto da Arquitetura Narrativa Interativa proposta neste artigo, este conceito é operacionalizado no domínio do jornalismo digital para descrever o papel do editor, jornalista ou *designer* responsável pela configuração do espaço narrativo. Neste sentido, o *Cyberbard* não escreve apenas um texto fixo, mas projeta um sistema interativo: define os nós narrativos, seleciona as vozes de relevância social, determina os dados contextuais pertinentes e estabelece os limites do espaço de exploração disponível ao interator [24]. Esta função autoral tem por finalidade preservar a integridade jornalística e manter a coerência narrativa, enquanto abre espaço para a agência do utilizador, respondendo diretamente à P3 formulada neste artigo (ver a Figura 2).

V. Da estrutura à experiência: a ANI e o envolvimento do utilizador

A descrição estrutural da ANI, a *timeline*, os módulos informatvos e as três camadas, não esgota o seu potencial explicativo. É igualmente necessário compreender o que o utilizador experiencia quando interage com esta arquitetura, e de que modo essa experiência se traduz em envolvimento com o conteúdo jornalístico. É precisamente esta dimensão que sustenta a P1

[3] https://submarinechannel.com/last-hijack-interactive-to-launch-at-sxsw/.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

formulada neste artigo: A interatividade e a agência narrativa aumentam o envolvimento emocional dos jovens adultos com conteúdos jornalísticos.

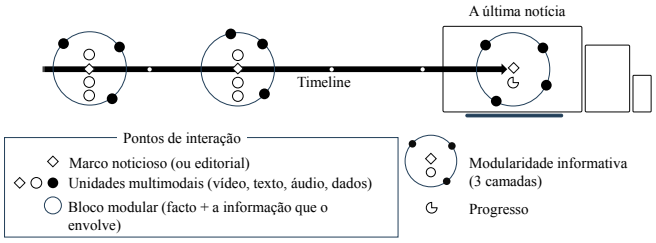


Figura 2. Arquitetura Narrativa Interativa: *timeline* com módulos informativos e respetivas camadas C1/C2/C3. Adaptado de [22]

Quando o utilizador navega pela *timeline* e seleciona através de um ponto de interação o módulo informativo e dentro deste uma unidade multimodal especifica que deseja explorar, não está apenas a consumir informação, está a exercer agência narrativa [25], realizando ações significativas que influenciam o desenvolvimento e o sentido do acontecimento que esta a experiencia. Esta transição de espetador para interator [6] é em si mesma uma fonte de envolvimento: o utilizador envolve-se de forma cognitiva e emocional num percurso que, em parte, construiu. A sensação de controlo sobre a narrativa, de que as suas escolhas têm consequências interpretativas reais, é um dos mecanismos centrais do envolvimento na literatura sobre narrativas interativas [26].

Este envolvimento desdobra-se em duas dimensões complementares. A dimensão hedónica que se manifesta no prazer imediato da exploração, na satisfação de descobrir uma nova camada de informação, de seguir uma voz que interpela, de visualizar dados que contextualizam um acontecimento que antes parecia distante [8]. Já a dimensão eudaimónica emerge de forma mais lenta, mas profunda: o utilizador sente que a sua exploração teve sentido, que compreendeu algo que importa, que cresceu enquanto cidadão informado [8], [9]. É nesta segunda dimensão que a ANI se distingue de outros formatos interativos, não proporciona apenas entretenimento informativo, mas uma experiência de construção de conhecimento com impacto na formação cívica.

VI. A defesa: Fundamentos para a reconfiguração narrativa do jornalismo digital

A fundamentação teórica da ANI pode ser articulada com base em três eixos complementares: a teoria da narrativa interativa, a reconfiguração do jornalismo digital, e o *design* de um sistema centrado no utilizador.

No plano da teoria narrativa, Marie-Laure Ryan [27] e Janet Murray [6] identificam a multilinearidade e a agência como condições centrais da imersão narrativa nos *media* digitais, o utilizador não lê uma história: percorre-a e instancia o sentido narrativo, sem alterar o sentido editorial definido pelo autor. Hartmut Koenitz [7] desenvolve este argumento ao propor a autoria ao nível dos procedimentos: o autor não escreve um texto fixo, mas projeta um sistema de possibilidades dentro do qual o utilizador constrói significado através da sua exploração. Lev Manovich [28] enquadra esta lógica no princípio mais amplo da modularidade dos novos *media*, a organização em unidades discretas, independentes e combináveis, que a ANI operacionaliza especificamente no contexto do *design* narrativo.

Relativamente à reconfiguração jornalística, Mikhail Bakhtin [15] fornece o fundamento para a incorporação de múltiplas vozes como condição de representação da complexidade social. Lia Seixas [21] e Luís Mauro e Sá Martino [29] sublinham as limitações dos formatos lineares na representação dessa complexidade. João Canavilhas [24] propõe explicitamente a reconfiguração das narrativas jornalísticas para ecossistemas móveis e interativos. Rogério Christofoletti [30] acrescenta a dimensão ética: a transparência e as camadas contextuais são não apenas um valor de *design*, mas sim uma exigência do jornalismo responsável.

No plano do *design* centrado no utilizador, o modelo MAIN de Shyam Sundar [31]: *Modality, Agency, Interactivity, Navigability*, fornece um enquadramento teórico adequado para analisar a ANI à luz da literatura de *Human-Computer Interaction* (HCI). Neste quadro conceptual, observa-se que os princípios estruturais da ANI estão alinhados com as *affordances* identificadas por Shyam Sundar como sendo determinantes para o envolvimento do utilizador. A modalidade manifesta-se nas três camadas informativas (C1, C2 e C3) de forma transversal: a agência emerge da possibilidade de o interator construir o seu próprio percurso narrativo; a interatividade concretiza-se nas escolhas de exploração entre módulos de informação e a navegabilidade estrutura-se através da organização temporal da *timeline* que articula os diferentes módulos. Esta coerência conceptual encontra também suporte empírico na literatura sobre comportamento de leitura em ambientes noticiosos digitais: estudos conduzidos por Heather L. O'Brien [32] demonstra que o envolvimento do utilizador resulta da interação entre características do sistema e fatores motivacionais individuais; de forma convergente, a investigação de Janette Lehmann et al. [33] e outros, evidencia que leitores que exploram um acontecimento em profundidade, quando consultam múltiplos artigos relacionados, apresentam maior tempo de permanência e níveis superiores de envolvimento. Neste sentido, a lógica modular subjacente à ANI está alinhado com esse padrão de exploração aprofundada da informação noticiosa.

É desta forma, que a ANI se constitui como uma proposta de *design* narrativo que, quando analisada à luz da literatura de HCI e do jornalismo digital, revela uma convergência teórica onde sustenta a sua validade e pertinência para o problema identificado neste projeto de investigação.

VII. Conclusão

O presente artigo partiu de um problema concreto e persistente no jornalismo digital: os formatos narrativos lineares não respondem adequadamente às formas de consumo dos jovens adultos, que procuram experiências no consumo da informação mais envolventes, personalizadas e contextualmente aprofundadas.

Para fazer face a este desafio, foi proposta a Arquitetura Narrativa Interativa (ANI) [22], um modelo teórico de design narrativo que organiza a peça noticiosa numa estrutura modular e navegável de três camadas de conteúdo jornalístico: o Mar-

ISBN: 978-989-36481-2-4

co Noticioso, lead – o conhecimento (C1), o Aprofundamento, vozes e perspetivas – o caminho para a compreensão (C2), e a Base documental, contexto e dados – a verificação (C3), sob a orientação editorial de um *Cyberbard*, pessoa ou entidade que projeta o espaço narrativo.

A ANI responde às três proposições formuladas no início do artigo.

- A P1 – "A interatividade e a agência narrativa aumentam o envolvimento emocional dos jovens adultos com conteúdos jornalísticos", é sustentada pela transição de espetador para interator que a própria ANI promove: ao construir o seu percurso através da *timeline* e das camadas, o interator exerce agência narrativa no sentido de van Laer e Orazi [25], realizando ações com consequências interpretativas reais, o que a literatura associa a envolvimento hedónico e eudaimónico [8], [9].
- A P2 – "Múltiplas perspetivas fornecem um maior grau de compreensão de uma situação complexa do que uma única perspetiva" é operacionalizada pelas camadas C2 e C3, que enquadram o acontecimento em dados, contexto e relações causais, superando o monologismo identificado por Bakhtin [15] e respondendo à fragmentação e superficialidade do consumo noticioso descritas na literatura [10], [11].
- A P3 – "A introdução de estruturas multilineares e escolhas interativas não compromete a integridade semântica nem a intencionalidade editorial do jornalista", é assegurada pelo papel do *Cyberbard*: seguindo a lógica de autoria procedimental de Koenitz [7], o jornalista não escreve um texto fixo mas projeta um sistema de possibilidades dentro do qual o interator instancia o sentido narrativo sem alterar o sentido editorial definido pelo autor.

Em conjunto, as três proposições convergem para uma resposta à questão de partida deste artigo: a interatividade e a agência narrativa reforçam o envolvimento dos jovens adultos com o jornalismo digital porque transformam o consumo noticioso numa experiência exploratória, participativa e com significado e alinhada com as práticas e expectativas mediáticas deste público [10], [11], [14].

Esta fundamentação teórica é reforçada pela análise da ANI à luz do modelo MAIN (*Modality, Agency, Interactivity, Navigability*) de Shyam Sundar [31], na medida em que revela consistência com os *affordances* deste modelo, e que a investigação empírica identifica como determinantes ao nível do envolvimento: a modalidade nas três camadas C1/C2/C3, a agência narrativa na construção do percurso pelo interator, a interatividade nas escolhas de exploração modular, e a navegabilidade na estrutura da *timeline*. Esta consistência é corroborada por evidências empíricas sobre o comportamento dos leitores *online*: Heather O'Brien [32] demonstra que o envolvimento resulta da interação entre as características do sistema e a motivação do utilizador; Janette Lehmann et al.[33] demonstram que os utilizadores que exploram um acontecimento em profundidade, por exemplo, lendo múltiplos artigos relacionados, num padrão designado *story-focused reading*, apresentam sessões mais longas até 50% e um aumento da probabilidade de regresso em cerca de 68%. O trabalho de Arapakis Ceylan et al. [34] sobre a incorporação automatizada de hiperligações noticiosas em artigos *online* reforça ainda a pertinência de sistemas de *design* que promovam a navegação contextualizada entre conteúdos relacionados; esta é também uma lógica que a ANI pretende operacionalizar através das suas camadas e da *timeline* interativa.

O presente trabalho tem, no entanto, limitações que importa reconhecer. A ANI é uma proposta teórica e de *design* narrativo: não foi ainda objeto de implementação e validação empírica com utilizadores reais. A sua fundamentação assenta na convergência entre a teoria da narrativa interativa, a reconfiguração do jornalismo digital e o *design* centrado no utilizador; apesar de ser uma convergência sustentada, não substitui a avaliação experimental.

O trabalho futuro deverá centrar-se no desenvolvimento de um artefacto digital, na realização de estudos de usabilidade e envolvimento com jovens adultos, e na operacionalização de métricas que permitam avaliar se a ANI produz os padrões de envolvimento, compreensão crítica e formação cívica que a sua fundamentação teórica sustenta. O desenvolvimento da ANI não se propõe como uma solução para todos os desafios relacionados com o envolvimento no consumo noticioso no jornalismo digital, contudo, apresenta-se como uma proposta fundamentada, com suficiente precisão conceptual para ser investigada e testada empiricamente.

Agradecimentos

Esta investigação é desenvolvida no DigiMedia - Digital *Media and Interaction Research Centre* do Departamento de Comunicação e Arte - DeCA da Universidade de Aveiro, no âmbito do Programa Doutoral em Novos Média. Este estudo, conta com o apoio e a parceria da empresa ClusterMedia Labs. O 1º autor agradece à Fundação para a Ciência e a Tecnologia - FCT o financiamento da bolsa (2025.04770.BDANA) para a realização desta investigação.

Referências

[1] R. Van der Nat, E. Müller, and P. Bakker, "Navigating Interactive Story Spaces. The Architecture of Interactive Narratives in Online Journalism," *Digital Journalism*, vol. 11, no. 6, pp. 1104–1129, 2023, doi: 10.1080/21670811.2021.1960178.

[2] B. Wojdynski, "Interactivity as Super-variable: Definitions, Dimensions, Mediators, and Implications for Theory," *Web Journal of Mass Communication Research*, vol. 30, pp. 1–30, Mar. 2011.

[3] S. Baldwin and Y. H. Ching, "Interactive Storytelling: Opportunities for Online Course Design," *TechTrends 2016 61:2*, vol. 61, no. 2, pp. 179–186, Dec. 2016, doi: 10.1007/S11528-016-0136-2.

[4] J. Smed, T. Suovuo, N. Trygg, and P. Skult, "Lecture notes on interactive storytelling," *TUCS Lecture Notes*, vol. 29, 2019.

[5] S. Rafaeli and F. Sudweeks, "Networked interactivity," *Journal of Computer-Mediated Communication*, vol. 2, no. 4, Mar. 1997, doi: 10.1111/J.1083-6101.

[6] J. Murray, *Hamlet on the Holodeck: The Future of Narrative in Cyberspace*. The MIT Press, 1997.

[7] H. Koenitz, J. Barbara, and M. P. Eladhari, "Interactive digital narrative (IDN)—new ways to represent complexity and facilitate digitally empowered citizens," *New Review of Hypermedia and Multimedia*, vol. 28, no. 3–4, pp. 76–96, 2022, doi: 10.1080/13614568.2023.2181503.

[8] T. Freire, F. Zenhas, D. Tavares, and C. Iglésias, "Felicidade Hedónica e Eudaimónica: um estudo com adolescentes portugueses," *Análise Psicológica*, vol. 31, no. 4, pp. 329–342, 2013, doi: 10.14417/AP.595.

[9] M. Hassenzahl, M. Burmester, and F. Koller, "AttrakDiff: Ein Fragebogen zur Messung wahrgenommener hedonischer und pragmatischer Qualität," pp. 187–196, 2003, doi: 10.1007/978-3-322-80058-9_19.

[10] G. Cardoso, M. Paisana, and A. Pinto-Martinho, "Digital News Report Portugal 2025 Obercom - Observatório da Comunicação," 2025. doi: org/10.5281/zenodo.15599071.
[11] C. Feio and L. Oliveira, "Scrolling Through the Feed - How do young people in Portugal consume news on social media?," *Observatorio*, pp. 1–15, 2025, doi: 10.15847/OBSOBS19520252670.
[12] J. Canavilhas, A. Baccin, and I. Satuf, "Era pós-PC: a nova tessitura da narrativa jornalística na web," in *Narrativa e Media: géneros, figuras e contextos*, Imprensa da Universidade de Coimbra, 2017, pp. 317–344. doi: 10.14195/978-989-26-1324-6_12.
[13] G. Gamaleri, "Media ecology, Neil Postman's legacy," *Church, Communication and Culture*, vol. 4, no. 2, pp. 238–244, May 2019, doi: 10.1080/23753234.2019.1616585.
[14] Henry Jenkins, *Cultura da Convergência*, 2 ed. São Paulo: NYU Press, 2009.
[15] M. Bakhtin, *Estética da Criação Verbal*, 2. ed. São Paulo: Martins Fontes Editora Ltd., 1997.
[16] M. Maneta, L. Torre, A. Rodrigues, I. Amaral, and P. Jerónimo, "Jovens e consumo mediático: uma análise comparativa entre desertos e não-desertos de notícias em Portugal," *Media & Jornalismo*, vol. 24, no. 45, p. e4512, Nov. 2024, doi: 10.14195/2183-5462_45_12.
[17] A. Fidalgo, "O consumo de informação. Interesse e curiosidade," 1996. Accessed: Jan. 07, 2025. [Online]. Available: https://arquivo.bocc.ubi.pt/pag/fidalgo-antonio-interesse-curiosidade-informacao.html
[18] "TIME 2024 Person of the year." Accessed: Nov. 08, 2025. [Online]. Available: https://time.com/7200212/person-of-the-year-2024-donald-trump/
[19] "Gaming the news: How interactive journalism is changing how we tell stories to the next gen - News and events - University of South Australia." Accessed: Nov. 08, 2025. [Online]. Available: https://www.unisa.edu.au/media-centre/Releases/2024/gaming-the-news-how-interactive-journalism-is--changing-how-we-tell-stories-to-the-next-gen/
[20] "Submarine Channel | The Future of Storytelling." Accessed: Nov. 03, 2025. [Online]. Available: https://submarinechannel.com/
[21] L. Seixas, *Redefinindo os Gêneros Jornalísticos: proposta de novos critérios de classificação*. Livros LabCom, 2009.
[22] C. Queirós and H. Caixinha, "Do facto ao acontecimento: proposta teórica de uma arquitetura narrativa interativa para o jornalismo digital," in *Applications and Usability of Interactive TV: 14th Iberoamerican Conference, jAUTI 2025*, Nov. 2025.
[23] M. Bakhtin, *Os gêneros do discurso* , 4ª Reimpressão 2022. Editora 34 Ltda, 2016.
[24] J. Canavilhas, C. Rodrigues, R. Morais, and F. Giacomelli, *Mobilidade e Inteligência Artificial: Os Novos Caminhos do Jornalismo*. Covilhã: LABCOM Comunicação e Artes, 2022.
[25] T. van Laer and D. Orazi, "Narrative Agency," *SSRN Electronic Journal*, Sep. 2023, doi: 10.2139/SSRN.4199845.
[26] R. van Enschot, I. Boogaard, H. Koenitz, and C. Roth, "The potential of interactive digital narratives. Agency and multiple perspectives in last hijack interactive," *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, vol. 11869 LNCS, pp. 158–169, 2019, doi: 10.1007/978-3-030-33894-7_17.
[27] M.-L. Ryan, "Art Beyond Myth and Metaphor," *The international journal of computer game research*, no. 1, Jun. 2001.
[28] L. Manovich, *The Language of New Media* . The MIT Press, 2002.
[29] L. Mauro and S. Martino, "De um eu ao outro: narrativa, identidade e comunicação com a alteridade," *Parágrafo*, vol. 4, no. 1, pp. 40–49, Feb. 2016, Accessed: Nov. 04, 2025. [Online]. Available: https://revistaseletronicas.fiamfaam.br/index.php/recicofi/article/view/377
[30] R. Christofoletti, D. Paul, and D. Becker, "Transparência e ética jornalística: análise de códigos deontológicos nos maiores mercados de notícia latino-americanos," *Fronteiras - estudos midiáticos*, vol. 23, no. 3, Dec. 2021, doi: 10.4013/fem.2021.233.08.
[31] S. Shyam Sundar, "The MAIN Model: A Heuristic Approach to Understanding Technology Effects on Credibility," pp. 73–100, 2008, doi: 10.1162/dmal.9780262562324.073.
[32] H. L. O'Brien, "Exploring user engagement in online news interactions," *Proceedings of the ASIST Annual Meeting*, vol. 48, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2011, doi: 10.1002/meet.2011.14504801088.
[33] J. Lehmann, C. Castillo, M. Lalmas, and R. Baeza-Yates, "Story-focused reading in online news and its potential for user engagement," *J. Assoc. Inf. Sci. Technol.*, vol. 68, no. 4, pp. 869–883, Apr. 2017, doi: 10.1002/asi.23707.
[34] H. Ceylan, I. Arapakis, P. Donmez, and M. Lalmas, "Automatically embedding newsworthy links to articles," *ACM International Conference Proceeding Series*, pp. 1502–1506, 2012, doi: 10.1145/2396761.2398461.

Kung Fu Tag: Jogo Educacional como Ferramenta de Aprendizado na Programação Web

Kung Fu Tag: An Educational Game as a Learning Tool in Web Programming

Larissa Nicolau Alexandre[1], Pedro Lucas Angelo Evangelista[1],
Fábio Paschoal Júnior[1], Gustavo Guedes[1],
Almir Silva da Silveira[1], Carlos Otávio Schocair Mendes[2]

[1]Centro Federal de Educação Tecnológica
Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ)
[1]Escola de Informática e Computação (EIC)
[1]Rio de Janeiro, Brasil

[2]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP)
[2]Campus Guarulhos
[2]Guarulhos, Brasil

{larissa.alexandre, pedro.evangelista}@aluno.cefet-rj.br,{fabio.junior, gustavo.guedes, almir.silveira}@cefet-rj.br,
{carlos.mendes}@ifsp.edu.br

Resumo — **Com o avanço da tecnologia, a programação web se tornou mais importante do que nunca. Atualmente, quase tudo que fazemos envolve a internet de alguma forma, seja para navegar em *sites*, fazer compras *online*, adquirir conhecimento ou socializar com outras pessoas. Ao iniciarmos no ramo da programação passamos pelo aprendizado de HTML e CSS aprendendo assim a criar e estilizar páginas web. Do ponto de vista pessoal, ao iniciarmos o estágio, percebemos que por mais que tivéssemos estudado e feito alguns projetos, não tínhamos dominado o básico, por ser simples e por ser quase "decoreba". Ao pesquisarmos formas de aprender, vimos que uma das que mais funcionaram foram jogos de desenvolvimento que usam o lúdico para deixar essa parte simples mais divertida e intuitiva. Com isso, queremos aprofundar esse tema e desenvolver outro tipo de jogo que aborda uma nova área a ser aprendida.**

Palavras **Chave – Aprendizado, jogo, programação, HTML.**

Abstract — **With the advancement of technology, web programming has become more important than ever. Nowadays, almost everything we do involves the internet in some way, whether it's browsing websites, shopping online, gaining knowledge, or socializing with others. When we begin in the field of programming, we start by learning HTML and CSS, which teach us how to create and style web pages. From a personal perspective, when we started our internship, we realized that even though we had studied and completed some projects, we hadn't truly mastered the basics, mainly because they seemed simple and almost like pure memorization. While researching effective ways to learn, we found that one of the most successful methods was through educational games that use playfulness to make these simple parts more fun and intuitive. With that in mind, we want to further explore this topic and develop a new kind of game that covers another area to be learned.**

Keywords – Learning, game, programming, HTML.

I. Introdução

No universo da tecnologia, diariamente, inúmeras linguagens, estruturas e bibliotecas são empregadas e criadas. Com o progresso tecnológico e a crescente popularidade dos dispositivos móveis, o setor de desenvolvimento web tem crescido exponencialmente, abrangendo o desenvolvimento de aplicativos móveis híbridos, que unem características de aplicativos nativos com a acessibilidade e adaptabilidade da web. Isso a transformou em um dos campos mais importantes e dinâmicos deste setor.

Entre as tecnologias mais usadas no desenvolvimento web, destacam-se a Linguagem de Marcação de Hipertexto (HTML), as Folhas de Estilo em Cascata (CSS) e o JavaScript, que formam a base da interface do usuário da aplicação. Ingressar neste mercado está se tornando cada vez mais complexo. É fundamental dedicar tempo para aprender os fundamentos da programação, algo que, inicialmente, pode parecer desnecessário. Essa base serve para qualquer linguagem e permanecerá relevante, independentemente da direção que as estruturas tomarem.

Apesar dos avanços tecnológicos, a educação tradicional tem enfrentado dificuldades para acompanhar o ritmo acelerado da transformação digital. Novas gerações já nascem integradas com a tecnologia e já não respondem bem a métodos de ensino tradicionais [1,2], já ficando acostumados a ambientes digitais interativos. Estes estudantes não conseguem aprender bem com o formato antigo de ensino, necessitando de métodos mais dinâmicos para aprender de forma autônoma e participativa, os colocando no centro do processo de aprendizagem [3,4].

Nesse contexto, os jogos educativos se destacam como uma alternativa eficaz para o ensino de programação e pensamento computacional. Eles oferecem uma experiência de aprendizagem lúdica e interativa, transformando o processo de compreensão de ideias, aplicação da lógica e resolução de conceitos mais fácil e principalmente menos intimidadora [5,6]. O uso de jogos como ferramenta de ensino também melhora o desenvolvimento de habilidades como abstração, decomposição e

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

raciocínio lógico [7,8].

Ademais, o uso de gamificação tem se mostrado eficiente para a retenção do conteúdo. Como afirma Kapp [9]: "a gamificação pode ser uma ferramenta poderosa para aumentar o engajamento do usuário e o sucesso da aprendizagem." Essa percepção é reforçada por autores como Romero e Lozano [10], que apontam o potencial dos jogos no processo de aprendizagem, principalmente entre as novas gerações.

Portanto, integrar jogos ao ensino de programação não aumenta apenas o engajamento como também torna o aprendizado mais acessível, mais fluído e contribui para o desenvolvimento de habilidades essenciais para os dias de hoje [11,12] preparando os estudantes para um mercado de trabalho cada vez mais exigente e digitalizado.

Os jogos de programação podem ser uma forma de motivar o interesse dos estudantes em aprender a programar, oferecendo uma abordagem mais acessível e divertida do que simplesmente ler um livro ou assistir a uma aula. Assim, o objetivo deste trabalho foi propor o jogo Kung Fu Tag, para o aprendizado de HTML de uma forma divertida e fácil, estimulando a capacidade lógica e criativa do estudante.

II. Fundamentação Teórica

Nesta seção, são apresentados os conceitos necessários para o entendimento deste trabalho, nas subseções A e B.

A. Importância do pensamento computacional na educação

O pensamento computacional (PC) é uma forma de formular e resolver problemas de uma maneira que um computador ou seres humanos possam executar [13]. É uma habilidade cognitiva que permite estruturar o pensamento de maneira lógica, estruturada e eficiente. Desenvolver o PC favorece a capacidade de resolver problemas complexos em várias áreas do conhecimento e também amplia a compreensão sobre como a computação impacta nossa vida cotidiana [14]. Em vista disso, aprender programação é uma das formas mais eficazes de estimular o pensamento computacional, já que programar exige organizar ideias de maneira lógica, decompor tarefas grandes em tarefas menores e elaborar instruções precisas para atingir um objetivo.

Um estudo realizado por Santana e colaboradores [15] mostra que a maioria dos professores reconhece a importância do pensamento computacional na formação dos alunos desde os primeiros anos escolares. Ele também aponta que 89% dos docentes consideram essencial o ensino de PC na educação básica, e 74,7% o colocam no mesmo patamar de outras competências fundamentais como leitura, escrita e matemática. Além disso, 89,5% acreditam que sua compreensão contribui para o bom desempenho no mundo do trabalho, e 87,2% para a participação ativa em uma sociedade democrática. Considerando essa relevância, torna-se necessário adotar estratégias didáticas acessíveis e motivadoras e, nesse cenário, os jogos digitais aparecem como recursos eficazes, ao permitir que os alunos explorem os conceitos da programação e do pensamento computacional de forma lúdica, interativa e significativa.

B. Importância dos jogos no aprendizado

Os jogos desempenham um papel significativo na educação, proporcionando benefícios importantes no desenvolvimento cognitivo, social e emocional. Alguns fatores fazem com que eles se tornem objetos lúdicos que podem ser usados para o aprendizado. O primeiro deles é o engajamento, de acordo com Alexandre e Sabbatini [16], onde os jogos naturalmente envolvem e divertem seus usuários, trazendo uma motivação para continuar jogando. Com os jogadores já entregues ao jogo, fica muito mais fácil a absorção das informações.

O segundo ponto importante é a aprendizagem ativa. Jogos permitem que os alunos testem suas hipóteses, resolvam de formas diferentes, experimentem novas soluções e resolvam problemas na prática. Com essa liberdade, os alunos conseguem ter uma compreensão melhor sobre o material estudado, aprofundando conceitos e habilidades. Além disso, também podem aprimorar as habilidades cognitivas, como raciocínio lógico, resolução de problemas, tomada de decisões, pensamento crítico e a criatividade. Como estão em um ambiente seguro, ficam mais livres para explorar formas diferentes de resolver um mesmo problema.

Algo muito importante na programação é conseguir enxergar seus resultados. Por muitas vezes, estudantes não progridem ou não têm a sensação de estarem evoluindo por não conseguirem avaliar o seu projeto. Jogos proporcionam um *feedback* imediato, permitindo que avaliem seu desempenho e vejam onde estão com mais dificuldade.

Essa natureza desafiadora e ao mesmo tempo recompensadora dos jogos é utilizada em diversas áreas para aumentar a retenção de usuários. Coisas simples, como receber pontos, ou concluir uma tarefa numa *checklist*, ou mais complexas, como ganhar recompensas por quilômetro corrido, fazem com que tarefas antes chatas e com recompensas demoradas tenham diversas recompensas pequenas ao decorrer do caminho. Obviamente esse recurso também pode ser usado nos estudos. Um exemplo que diversas pessoas conhecem é o duolingo [17], que fornece recompensas dentro do aplicativo por aulas assistidas, têm níveis que o usuário pode subir fazendo provas, etc.

III. Desenvolvimento

Esta seção é dividida em 6 subseções (de A até F), as quais relatam as fases de utilização e de desenvolvimento do jogo Kung Fu Tag. O jogo está disponível para acesso e utilização no endereço https://kungfu-tag.vercel.app/.

A. Objetivo do Kung Fu Tag

O jogo teve como finalidade ensinar *tags* HTML, abrangendo desde conceitos básicos até conteúdos mais avançados, de forma progressiva. Ele foi estruturado em níveis, sendo que cada etapa contém uma explicação teórica sobre uma *tag* e/ou um conceito relacionado à linguagem HTML, seguida por um desafio prático no qual o jogador deve aplicar os conhecimentos adquiridos utilizando uma caixa de código. Além do aspecto técnico, o jogo foi idealizado com o propósito de desenvolver um ambiente lúdico de aprendizado, que estimule a capacidade lógica e criativa dos estudantes, facilite a compreensão de conceitos fundamentais da construção de páginas web e ajude inici-

ISBN: 978-989-36481-2-4

antes a se sentirem mais confiantes ao programar. Dessa forma, o jogo buscou unir entretenimento e ensino, promovendo uma experiência de aprendizado mais leve, intuitiva e eficaz. O jogo não trabalha com pontuações.

B. *Design do Kung Fu Tag*

Kung Fu Tag tem uma temática inspirada em Kung Fu Panda, onde seria um mestre panda ensinando, com falas temáticas, um visual ambientado como uma vila e uma música que remetesse ao kung fu. A Fig.1 ilustra a tela de introdução do jogo, a qual contém as instruções iniciais de como utilizar o jogo, além das informações básicas da *tag* HTML em estudo.

Figura 1. Tela de introdução do Kung Fu Tag

A Fig. 2 ilustra a tela do desafio do jogo, onde o usuário é motivado a escrever um pequeno código HTML para praticar o conteúdo da *tag* HTML em estudo. São exibidas também dicas e curiosidades sobre a utilização da respectiva *tag* em estudo.

Na Fig. 2, o usuário lê as instruções no canto superior esquerdo, digita a solução do desafio proposto no canto inferior esquerdo e visualiza o resultado prático de sua solução na parte direita. Ao terminar a solução ele clica em "Verificar resposta".

Figura 2. Tela de desafio do Kung Fu Tag

A Fig. 3 ilustra a tela do desafio do jogo com a solicitação de dica pelo usuário, onde o usuário confirma a solicitação e recebe uma orientação de assistência para executar a atividade proposta no desafio.

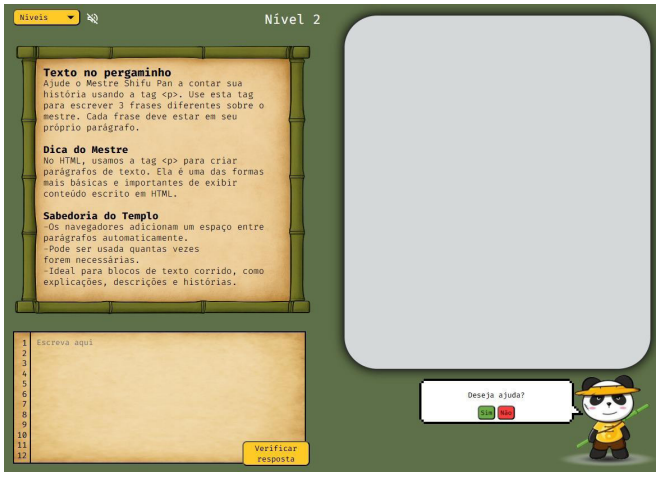


Figura 3. Tela de desafio com dica do Kung Fu Tag

A Fig. 4 ilustra a tela do desafio do jogo com o *feedback* sobre a resposta preenchida pelo usuário, onde o usuário verifica se acertou ou observa qual foi o erro cometido. Caso tenha acertado ele avança para o próximo nível do jogo. Caso tenha errado, ele permanece no nível atual e faz uma nova resolução do desafio.

Figura 4. Tela de desafio com *feedback* do Kung Fu Tag

C. *Regras do Kung Fu Tag*

As principais regras de utilização do jogo são: i.) O jogo é dividido em níveis, cada um com um desafio sobre uma *tag*; ii.) Para cada nível, o jogador tem acesso a introdução sobre uma *tag* ou atributo, um desafio, um editor de código HTML e um *preview* sobre o código digitado; iii.) O jogador deve escrever o código HTML necessário para concluir o desafio. O jogo inclui um sistema de ajuda contextual, fornecendo *feedbacks* relevantes para o desafio atual baseado na resposta do jogador; iv.) Caso

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

o jogador esteja com dificuldades, o jogo poderá fornecer uma dica após um certo período de tempo e; v.) O jogador também poderá solicitar a dica a qualquer momento durante o desafio.

D. Informações técnicas do Kung Fu Tag

Para criar o jogo educativo, foi escolhido o Angular, um *framework* que possui uma base sólida e organizada para a criação da aplicação. A interface foi pensada para se adaptar a diferentes telas, assegurando que o jogo funcione bem em computadores e celulares. No desenvolvimento da parte visual, foram utilizados HTML5, CSS3 e TypeScript, todos integrados no Angular.

Para o desenvolvimento do *back-end*, foi adotado o Python com o *framework* Django, que oferece uma estrutura robusta, segura e de rápida implementação para aplicações web. O banco de dados utilizado foi o MySQL, garantindo uma boa performance no armazenamento e recuperação das informações do jogo. Para tornar o projeto acessível *online*, foi utilizada a plataforma PythonAnywhere, que permitiu hospedar a aplicação de forma prática e eficiente, facilitando os testes e o acesso dos usuários à versão final do jogo.

Foram utilizados o PythonAnywhere para subir o *back-end* e o Vercel para subir o *front-end* do jogo.

E. Fluxo de Processo do Kung Fu Tag

A Fig. 5 ilustra o Diagrama de Fluxo de Processos do jogo, que descreve de forma sucinta as principais ações do jogo.

F. Pseudocódigo do Kung Fu Tag

O jogo possui uma lógica bastante complexa para avaliação das respostas do jogador. Como a proposta do jogo é fornecer um feedback personalizado baseado na resposta, foram desenvolvidas três funções em Python, uma principal e duas auxiliares, para analisar todos os tipos de erros possíveis e validar precisamente o código.

Antes de analisar o pseudocódigo é importante ressaltar que, para ser feita a validação, cada nível possui uma resposta pré-cadastrada no banco de dados. Assim, a ideia central é que a resposta do usuário seja igual a que está cadastrada.

A primeira função é o passo essencial para garantir que o conteúdo digitado esteja de acordo com o desafio proposto. Essa verificação não se limita apenas à comparação textual, mas analisa a estrutura semântica e sintática do HTML digitado.

O algoritmo desenvolvido recebe como entrada a resposta do usuário e a resposta esperada (gabarito), ambos em formato de texto HTML. Inicialmente, ele verifica se há erros básicos de estrutura, como *tags* não fechadas ou uso incorreto de *tags* auto-encerrada. Em seguida, utiliza uma biblioteca de *parsing* HTML para interpretar a estrutura das duas respostas e extrair apenas os elementos relevantes, ignorando espaços ou conteúdos vazios.

Caso ambas as estruturas estejam válidas, o algoritmo compara a quantidade e a ordem dos elementos principais. Por fim, cada par de elementos (do usuário e do desafio) é comparado usando uma função auxiliar que analisa nome da *tag*, atributos e conteúdo interno. A validação é concluída com sucesso apenas se todos os elementos forem equivalentes, tanto em estrutura quanto em conteúdo. A Fig. 6 descreve esse algoritmo na forma de pseudocódigo (Pseudocódigo I).

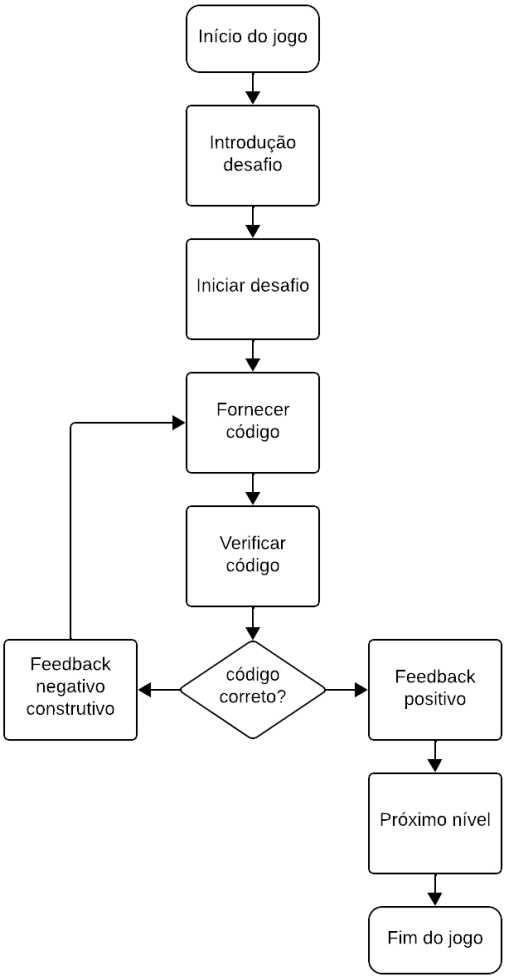


Figura 5. Diagrama de Fluxo de Processos do Kung Fu Tag

```
Algoritmo Validar_Resposta_HTML(resposta_usuario, desafio_esperado)
Início
    Se verificar_tags_nao_fechadas(resposta_usuario) retornar mensagem_erro então
        Retornar mensagem_erro

    Analisar resposta_usuario como estrutura HTML
    Analisar desafio_esperado como estrutura HTML

    Filtrar apenas elementos relevantes (tags e textos significativos)

    Se resposta ou desafio estiverem vazios então
        Retornar "Você precisa usar pelo menos uma tag válida"

    Se número de elementos for diferente então
        Retornar "Número de estruturas incorreto"

    Para cada par (tag_usuario, tag_esperada) faça
        resultado ← Comparar_Tags(tag_usuario, tag_esperada)
        Se resultado ≠ verdadeiro então
            Retornar resultado
    FimPara

    Retornar verdadeiro
Fim
```

Figura 6. Pseudocódigo I do Kung Fu Tag

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

IV. Avaliação Experimental

A avaliação da experiência do jogador e a coleta de *feedback* são elementos importantes para entender o que os jogadores acham do jogo, como dito por Oliveira e colaboradores [18]: "a avaliação visa estabelecer uma comparação entre os resultados desejados e os resultados obtidos para reforçar, orientar e/ou corrigir o comportamento do avaliado em suas atividades". A coleta dessas informações ocorreu através de um formulário com perguntas relacionadas a usabilidade, jogabilidade e ao conteúdo do Kung Fu Tag.

O formulário permitiu avaliar diferentes aspectos do jogo, tanto as instruções quanto a própria jogabilidade e *design*. A Avaliação Experimental tratou as questões éticas e os usuários avaliadores responderam o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). Como apresenta a Fig. 6, um terço dos usuários avaliadores, de um total de 60 avaliadores, não possuía experiência em HTML, o que reforça a importância da acessibilidade e da clareza.

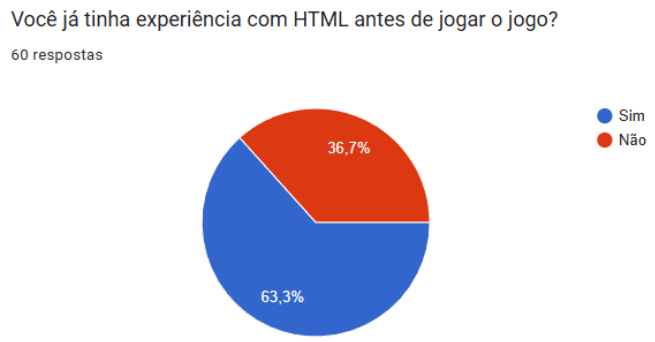


Figura 7. Experiência com HTML

Para entender mais profundamente as perspectivas dos usuários, os participantes foram divididos em dois grupos distintos: indivíduos com conhecimento prévio em programação ou HTML e aqueles sem experiência anterior nessa área de estudo. A Fig. 8 apresenta a comparação entre os participantes com experiência e sem experiência em HTML.

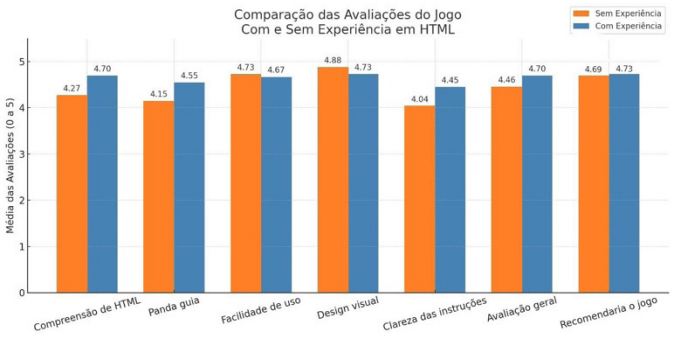


Figura 8. Média das avaliações

Ambos os grupos avaliaram o jogo positivamente em todas as categorias. Participantes sem experiência deram notas ligeiramente mais baixas em quase todas as categorias, exceto em *design* visual e na facilidade de uso. Enquanto participantes com experiência destacaram mais a clareza das instruções e a compreensão de HTML, o que pode indicar que iniciantes tiveram mais dificuldade inicial com o conteúdo, mesmo que tenham gostado da apresentação.

A Fig. 9 resume os principais *feedbacks* dos jogadores, com críticas construtivas de melhoria do jogo. Um dos aspectos mais críticos está relacionado às orientações fornecidas nos desafios. Muitos jogadores manifestaram dificuldades em compreender exatamente o que lhes era pedido, tanto na identificação dos seus erros como na escrita correta das *tags* HTML. Estas questões revelaram-se particularmente comuns entre os participantes menos familiarizados com a programação. Adicionalmente, algumas pessoas consideraram as falas do personagem-guiador (panda), pouco claras ou objetivas, o que afeta a compreensão das tarefas. Como consequência deste avanço na revisão deu-se a melhoria das explicações em todos os níveis; estas passaram a ser mais simples e compreensíveis para satisfazer o público leigo.

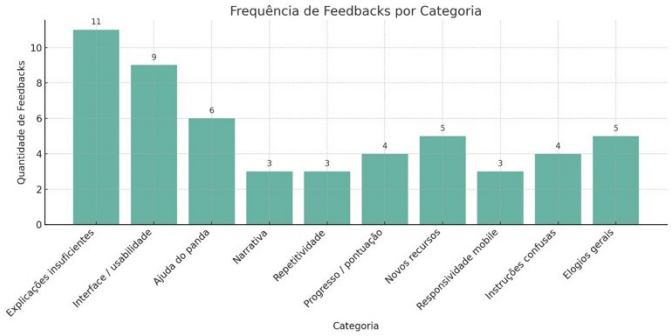


Figura 9. Feedback dos jogadores

Os jogadores relataram que o sistema de ajuda fornecido pelo panda não era tão fácil de entender como esperavam inicialmente. Muitos não perceberam que o panda estava lá para oferecer dicas úteis durante os desafios, o que resultou em uma falta de orientação adequada para alguns jogadores. Outra crítica foi sobre os *feedbacks* de erros superficiais e imprecisos em diversas situações, os jogadores cometiam erros simples sem receberem orientações claras sobre o que haviam feito de errado. Como resultado dessas questões apontadas, ocorreram melhorias significativas no sistema de *feedback*, com respostas mais específicas e direcionadas aos erros cometidos. Além disso, foi incluída uma nova maneira de dar a dica do nível; agora quando o jogador errar duas vezes o panda guia irá oferecer a dica.

Na versão *mobile* foram relatados alguns problemas de usabilidade preocupantes. Um dos principais pontos de atenção foi a falta de uma barra de rolagem visível na seção de descrição dos desafios, levando os jogadores a pensarem que o texto tinha terminado antes da conclusão. Além disso, quando avançavam para a próxima fase, a explicação frequentemente carregava já posicionada no final da página, obrigando o jogador a rolar manualmente até o topo para começar a ler. Assim, foi aprimorada a funcionalidade da barra rolante para garantir que as explicações sempre começam do início e também passaram a ser exibidos sinais visuais de rolagem.

V. Conclusões e Trabalhos Futuros

Os jogos educacionais podem ser uma abordagem divertida e eficaz para ensinar conceitos de programação, lógica e res-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

olução de problemas. Esses jogos proporcionam um ambiente prático e interativo de aprendizado, estimulando o interesse dos estudantes e desenvolvendo suas habilidades de programação de forma natural. A gamificação, com o uso de desafios, tem sido uma estratégia bem-sucedida para aumentar o engajamento dos usuários e melhorar a experiência de aprendizado. Os jogos oferecem *feedback* imediato, permitindo aos estudantes avaliar seu desempenho e identificar áreas em que precisam melhorar. Além disso, a natureza desafiadora e recompensadora dos jogos motiva os alunos a progredirem e superarem obstáculos.

No contexto específico da programação web, os jogos podem ser especialmente úteis para ensinar conceitos relacionados ao HTML, CSS e outras tecnologias fundamentais. Eles oferecem uma forma prática e divertida de aprender a criar *layouts*, aplicar estilos e desenvolver habilidades criativas e lógicas.

Este trabalho teve como objetivo desenvolver o jogo educativo Kung Fu Tag voltado ao ensino de HTML, com uma abordagem lúdica e interativa, utilizando a figura do Mestre Shifu Pan como guia no processo de aprendizagem. Através de desafios práticos, dicas e explicações didáticas, o jogo buscou tornar o aprendizado de programação mais acessível e envolvente, especialmente para iniciantes. O Kung Fu Tag ofereceu uma porta de entrada no mundo da programação web, ensinando conceitos básicos de HTML de forma clara e progressiva, atendendo tanto aqueles que estão dando os primeiros passos quanto pessoas com alguma experiência prévia em programação.

Durante o desenvolvimento do Kung Fu Tag foi evidenciado que a aplicação da técnica de gamificação tem um importante papel no envolvimento dos usuários ao facilitar o processo de aprendizado de forma mais descontraída e intuitiva. A configuração em módulos dos níveis possibilitou uma apresentação gradual dos conteúdos respeitando a complexidade das temáticas tratadas.

Um aspecto significativo foi a estrutura do jogo que foi elaborada com cuidado para ser fácil de usar e agradável visualmente ao jogador. A disposição dos elementos na tela e a seleção de cores utilizadas foram planejadas para melhorar a compreensão do jogo e realçar as informações cruciais enquanto envolvem o jogador na história visualmente proposta. A parte estética contribuiu para uma experiência de aprendizado mais agradável e motivadora no Kung Fu Tag.

Além disso, o jogo fornece explicações claras, desafios contextualizados e um sistema de dicas automáticas para auxiliar na compreensão do conteúdo mesmo quando o jogador enfrenta obstáculos. Essa função destaca o potencial da tecnologia como uma ferramenta para auxiliar no ensino. A estratégia de repetir determinados elementos ao longo do jogo também se revelou sendo eficiente para consolidar o conhecimento, dando ao jogador oportunidades de reforçar conceitos essenciais envolvendo-se de maneira orgânica ao longo da partida.

Como trabalho futuro, sugerem-se melhorias na acessibilidade do Kung Fu Tag, expansão dos níveis para cobrir mais tópicos de CSS. Além disso, também se sugere a adição de medidas para avaliar o progresso do jogador durante a experiência de jogo. Com essas melhorias almeja-se que o Kung Fu Tag prossiga em sua evolução e contribua de maneira significativa para o ensino da programação.

Referências Bibliográficas

[1] M. PRENSKY, "Teaching digital natives: partnering for real learning", *Thousand Oaks: Corwin Press*, 2010.

[2] LIMA, V. S. A. et al., "Práticas e desafios no ensino: formação docente e inovações pedagógicas", *Curitiba: AYA Editora*, 2025.

[3] ZUBAIDI, A. M. e VELUSAMY, S., "The necessity of educational technology in teaching methods: why educational technology in teaching is important?", *In: Encyclopedia of Information Science and Technology. 6. ed. Hershey: IGI Global*, p. 1–12, 2025. doi: https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7366-5.ch033.

[4] ANDRADE, L. G. D. S. B. de S. B. de, AGUIAR, N. C., FERRETE, R. B., e SANTOS, J. D, "Geração Z e as metodologias ativas de aprendizagem: desafios na educação profissional e tecnológica", *Revista Brasileira da Educação Profissional e Tecnológica*, v. 1, n. 18, p. e8575, 2020. doi: https://doi.org/10.15628/rbept.2020.8575.

[5] CANDRAWATI, E., "Designing educational games with mastery learning strategy to improve computational thinking skills: A bibliometric analysis", *IJIS Edu: Indonesian Journal of Integrated Science Education*, v. 7, n. 1, 2025.

[6] WANG, X., CHENG, M., e LI, X., "Teaching and learning computational thinking through game-based learning: a systematic review", *Journal of Educational Computing Research*, v. 61, n. 7, p. 1505–1536, 2023. doi: https://doi.org/10.1177/07356331231180951.

[7] WING, J. M., "Computational thinking.", *Communications of the ACM*, v. 49, n. 3, p. 33–35, 2006. doi: https://doi.org/10.1145/1118178.1118215.

[8] KONG, S.-C., "Components and methods of evaluating computational thinking for fostering creative problem-solvers in senior primary school education.", *In: KONG, S.-C.; ABELSON, H. (ed.). Computational Thinking Education. Singapore: Springer*, p. 119–141, 2019. doi: https://doi.org/10.1007/978-981-13-6528-7_8.

[9] KAPP, K. M., "The gamification of learning and instruction: game-based methods and strategies for training and education", *San Francisco: Pfeiffer*, 2012.

[10] CHECA-ROMERO, M. e GIMENEZ-LOZANO, J. M., "Video games and metacognition in the classroom for the development of 21st century skills: a systematic review", *Frontiers in Education*, v. 9, 2025. doi: https://doi.org/10.3389/feduc.2024.1485098.

[11] GURBUZ, S. C. e Celik, M., "Serious games in future skills development: A systematic review of the design approaches", *Computer Applications in Engineering Education*, v. 30(5), p. 1591–1612, 2022. doi: https://doi.org/10.1002/cae.22557.

[12] DUCKWORTH, D. e FRAILLON, J., "Computational thinking framework", *In: FRAILLON, J.; ROŽMAN, M. (ed.). IEA International Computer and Information Literacy Study 2023: Assessment Framework. Cham: Springer Nature Switzerland*, p. 35–43, 2024. doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-61194-0_3.

[13] WING, Jeannette M., "Computational thinking's influence on research and education for all", *Italian Journal of Educational Technology*, v. 25, n. 2, p. 7–14, 2017.

[14] RIBEIRO, L, FERREIRA, C. E, e CAVALHEIRO, S. A. C., "Pensamento Computacional", *Computação Brasil, [S. l.]*, v. 41, n. 41, p. 10–12, 2019. doi: 10.5753/compbr.2019.41.4459.

[15] SANTANA, C. H. de, HERCULANI, J. B., COLANZI, T. E., SAITO, H. T. I., e AMARAL, A. M. M. M., "Percepções dos Professores sobre o Desenvolvimento do Pensamento Computacional na Educação Infantil", *Revista Brasileira de Informática na Educação, [S. l.]*, v. 33, p. 176–196, 2025. doi: 10.5753/rbie.2025.4970.

[16] ALEXANDRE, Carla e SABBATINI, Marcelo, "A contribuição dos Jogos Digitais nos processos de aprendizagem", *5º Simpósio Hipertexto e Tecnologias na Educação*, p. 1–18, 2013.

[17] MUNDAY, Phillip, "Duolingo: gamified learning through translation", *Journal of Spanish Language Teaching*, 2017.

[18] OLIVEIRA, Rháleff et al, "Avaliações em jogos educacionais: instrumentos de avaliação da reação, aprendizagem e comparação de jogos", *In: BRAZILIAN SYMPOSIUM ON COMPUTERS IN EDUCATION (SBIE), 30.*, 2019.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Soluciones de Software para la Transformación Digital en una Universidad

Caso Universidad del Magdalena, Colombia

Software Solution for Digital Transformation in a University

A Case Study of the Universidad del Magdalena, Colombia

Mayda P. González-Zabala, Cesar E. Polo- Castro, Ernesto A. Galvis-Lista
Centro de Ingeniería y Desarrollo de Software - CIDS
Universidad del Magdalena
Santa Marta, Colombia
mpgonzalez@unimagdalena.edu.co, cpoloc@unimagdalena.edu.co, egalvis@unimagdalena.edu.co

***Resumen* — Este documento presenta el proceso de transformación digital de la Universidad del Magdalena a través del desarrollo de soluciones de software que se han implementado en la institución en el periodo 2016-2025. Este proceso fue guiado por los planes de gobierno institucionales los cuales se han realimentado con los resultados obtenidos y han dado lineamientos para la priorización de necesidades organizacionales en cada periodo. Lo anterior permitió la consolidación de un portafolio de soluciones de software más de 30 soluciones, la formación de estudiantes del programa de ingeniería de sistemas, la vinculación de docentes, egresados. Además, de impulsar el fortalecimiento de la estructura organizacional. Con lo cual la transformación digital no se da como una simple incorporación de plataforma tecnológicas sino como un proceso organizacional estructurado, con gobernanza, alineación estratégica y construcción de capacidades institucionales sostenibles.**

Palabras **Clave – software; transformación digital; universidad.**

***Abstract* This paper presents the digital transformation process of the Universidad del Magdalena through the development and implementation of software solutions deployed within the institution during the 2016–2025 period. This process was guided by successive institutional government plans, which were continuously informed by the outcomes achieved and provided strategic guidelines for prioritizing organizational needs in each administrative term. This approach enabled the consolidation of a software solutions portfolio comprising more than thirty systems, while also contributing to the education and training of Systems Engineering students and fostering the active involvement of faculty members and alumni. Additionally, it promoted the strengthening of the institutional organizational structure. Consequently, digital transformation is not conceived as the mere adoption of technological platforms, but rather as a structured organizational process characterized by governance, strategic alignment, and the development of sustainable institutional capabilities.**

Keywords - software; digital transformation; university.

I. Introducción

Las Instituciones de Educación Superior – IES, en especial las universidades cumplen con un rol fundamental en el desarrollo social, económico, científico de los países dado que en sus funciones se encuentra la formación del capital humano, la creación de nuevo conocimiento a través de investigaciones, impulsar el desarrollo tecnológico y la innovación, el transferir conocimiento a la sociedad, además, contribuyen a la promoción de la cultura, al desarrollo regional, a la internacionalización, la cooperación, y son agentes de transformación social, fortalecen procesos de movilidad social y reducción de desigualdades [1], [2], [3]. Con lo cual, su importancia en países como Colombia, que tiene altas tasas de desigualdad e injusticia social, se constituyen en un motor para el desarrollo integral, impulsando la transformación de la sociedad con el conocimiento, aportan al progreso económico y a la construcción de una sociedad más justa. Su impacto no abarca solo los individuos, sino contribuyen al bienestar económico y social.

Dada su relevancia en el desarrollo del país, las universidades deben buscar el ser competitivas en el contexto global, por lo cual implementan estrategias tales como el fortalecimiento de la calidad académica a través de la revisión y actualización de planes de estudios, realizar procesos de acreditación y certificación de calidad nacionales e internacionales, la capacitación de los docentes; el promover la investigación e innovación de alto impacto, así como la difusión de los resultados, el crear alianzas con otras organizaciones, promover el intercambio y movilidad académica, impulsar la extensión y proyección social, el impulsar la inclusión y la equidad, así como el adaptarse a las nuevas tecnologías, integrándolas a sus procesos misionales y sus procesos de administración [4], [5].

En especial, se tiene que el incorporar Tecnología de Información (TI) en las universidades ayuda a potenciar la implementación de las otras estrategias propuestas, así como la

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

realización de procesos en estas organizaciones, dado que se mejora la calidad educativa a través de la innovación en los procesos de formación, implementando nuevas estrategias metodológicas, facilitan el acceso a recursos educativos y de nuevo conocimiento, se apoyan los procesos de seguimiento y personalización de la experiencia, además, que facilitan el trabajo colaborativo y multidisciplinario con lo cual se fomenta la investigación y la innovación, así como la internacionalización a través de participación en redes, programas conjuntos, acceso a servicios fuera de las instituciones [5]. En cuanto al apoyo a los otros procesos que realizan las universidades, la TI permite tener herramientas para mejorar la comunicación, la imagen institucional, la cohesión entre los diferentes actores de la institución, además de apoyar los procesos de gestión y toma de decisiones. En especial las soluciones de software permiten agilizar y facilitar los procesos. Así mismo, el uso de TI en las actividades de la institución prepara a los futuros profesionales para el contexto laboral futuro donde las herramientas digitales tienen un rol preponderante, con lo cual se les brinda a los estudiantes la formación necesaria para aumentar su capacidad de adaptarse a los cambios tecnológicos [5], [6], [7].

Por lo cual, las universidades han venido tomando acciones tales como la adopción de políticas institucionales, la proyección de acciones en sus planes de acción, ajustes en sus estructuras de organización de función de TI y la ejecución de planes estratégicos orientados a generar la transformación digital de la institución. La Universidad del Magdalena no es ajena a esta realidad, con lo cual en sus planes de gobierno y en el Plan de Desarrollo 2030 [8] tienen entre sus ejes estratégicos la innovación y la tecnología, buscando transformar digitalmente la institución y mejorar sus servicios. Estos lineamientos han sido la base para la proyección y el desarrollo de TI, en especial el desarrollo de soluciones de software que apoye y facilite la relación de los procesos organizacionales. En dicho sentido, este documento presenta los avances que la Unimagdelena ha realizado en su proceso de transformación digital a través de la incorporación de soluciones software en el periodo 2016-2025.

A pesar de la creciente adopción de iniciativas de transformación digital en universidades, existe poca evidencia documentada sobre cómo las instituciones públicas latinoamericanas logran consolidar capacidades internas sostenibles para el desarrollo de soluciones tecnológicas. Este trabajo presenta un estudio de caso sobre el proceso de transformación digital de la Universidad del Magdalena, analizando cómo la creación de una unidad especializada de ingeniería de software permitió estructurar un portafolio institucional de soluciones digitales alineadas con la planeación estratégica.

II. Metodología

El presente trabajo se desarrolló como un estudio de caso institucional orientado a analizar el proceso de transformación digital de la Universidad del Magdalena mediante el desarrollo de soluciones de software implementadas entre 2016 y 2025. Para ello se realizó un análisis documental de los planes de gobierno 2016–2020, 2020–2024 y 2024–2028, así como del Plan de Desarrollo Institucional 2020–2030, con el fin de identificar iniciativas relacionadas con innovación tecnológica y fortalecimiento de los sistemas de información.

A partir de estos lineamientos se identificaron y priorizaron necesidades organizacionales que fueron atendidas mediante proyectos de desarrollo de software ejecutados por el Centro de Ingeniería y Desarrollo de Software (CIDS), unidad encargada del desarrollo tecnológico institucional. Finalmente, se realizó un análisis descriptivo de los resultados, examinando soluciones representativas y su impacto en los procesos institucionales, apoyado en indicadores derivados del modelo de medición de Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación (MACTI-UM)..

III. Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el marco del trabajo realizado.

A. Identificación y priorización de necesidades organizacionales en relación a los planes de gobierno universitario

Cada cuatro años se inicia un nuevo periodo de gestión y de administración interna, estos periodos son guiados por los planes de gobierno. El proceso de tomar los sistemas de información y la tecnología de información como herramientas estratégicas de la organización inició en el año 2016 [9] en el cual, para las cuatro ejes misionales de la universidad: docencia, investigación y extensión y administración y finanzas se establecieron propósitos y programas de desarrollo institucional, además de iniciativas estratégicas enmarcadas en ocho principios: 1) calidad, 2) investigación, innovación y emprendimiento, 3) inclusión y regionalización, 4) *Smart university*, 5) cultura, 6) internacionalización, 7) comunidad docente y administrativa y 8) comunidad estudiantil.

Con base en estos lineamientos se determinaron las acciones prioritarias a realizar, facilitando la priorización. Es importante decir que los resultados obtenidos en el plan de gobierno fueron tomados como punto de partida para la propuesta del siguiente plan con el fin de fortalecer lo existente y buscar fortalecer las áreas que se encontraban débiles o con bajo desarrollo. Lo anterior, permitió definir el plan de gobierno 2020-2024 [10], que se siguieran fortaleciendo los 3 ejes misionales, así como los aspectos administrativos de la organización, las políticas institucionales y se alineara con el Plan de Desarrollo Institucional 2020-2030 [8]. En concreto, en relación con los sistemas de información y la tecnología de información se establecieron lineamientos estratégicos en varios aspectos, entre los que se incluía el de Desarrollo organizacional, infraestructura física, tecnológica y de servicios, el cual especificaba el generar la Transformación digital institucional para mejorar e innovar en servicios basados en tecnologías de información y la comunicación, priorizando sistemas de información académicos y administrativos, ampliar cobertura, conectividad, uso de medios digitales para divulgación y la apropiación social, entre otras iniciativas contempladas en la política de *Smart University*.

De igual forma, el Plan de Gobierno 2024-2028 [11], partió del esfuerzo anterior. Específicamente, el plan estableció iniciativas orientadas a la mejora de servicios institucionales mediante la implementación de plataformas digitales, la capacitación en metodologías y herramientas digitales para la planta administrativa, y la modernización y transformación digital de los procesos misionales. Es importante decir que en este plan de

ISBN: 978-989-36481-2-4

gobierno se hace explicito el compromiso de generar los procesos de transformación digital de la institución.

B. Fortalecimiento de una unidad especializada para el Desarrollo de Software en la institución

Considerando los lineamientos que la institución ha dado a lo largo del tiempo y con el fin de impulsar las soluciones de software en la institución como herramientas estratégicas para el apoyo al desarrollo de las actividades de las diferentes dependencias de la institución, se buscó fortalecer a nivel organizacional una unidad que fuera responsable de liderar este proceso. Para lo cual, se realizó una identificación de unidades que trabajaran con sistemas y tecnología de información dentro de la institución. Específicamente, se encontró que el Grupo de servicios tecnológicos adscrito a la vicerrectoría administrativa se encargaba de la gestión de servicios de infraestructura de TI, sin embargo, no desarrollaban soluciones software para las dependencias de la institución sino para atender aspectos específicos de su labor.

Una segunda dependencia que se encargaba de gestionar software fue la Biblioteca German Bulla Meyer adscrita a la vicerrectoría académica, se encargaba de la gestión de bases de datos científicas, aplicaciones de apoyo a la investigación y capacitaciones. Además, se identificó que el Centro para la Innovación Educativa – CETEP (posteriormente denominado Centro INNOVA en el año 2025 para dar respuesta a una necesidad identificada en el plan de gobierno 2024-2028) adscrito a la vicerrectoría académica era el encargado de la producción de materiales educativos y formación en uso de herramientas de tecnología de información, esta tercera dependencia identificada, se enfocaba en el desarrollo de materiales educativos y la incorporación de TI como apoyo a los procesos de enseñanza-aprendizaje. Una cuarta dependencia identificada fue el Centro de Investigación y Desarrollo de Software (CIDS), que era un centro no formalizado en la estructura organizacional, creado desde el 2006, adscrito al Programa de Ingeniería de Sistemas con el fin de que los estudiantes hicieran prácticas y actividades relacionadas con el desarrollo de software.

A partir de 2016 se decidió consolidar el CIDS como unidad encargada del desarrollo de software institucional, para lo cual se asignó la coordinación a un profesor de planta del programa para la formulación y dirección de proyectos, además, se asignaron docentes como asesores y se le asignaron recursos físicos y la contratación de un equipo base compuesto por tres ingenieros. Bajo este esquema inicial, se gestionaron proyectos con financiación interna, los cuales vinculaban estudiantes en el rol de practicantes, pasantes de investigación y equipo de apoyo para participar en la ejecución de proyectos. Este esquema permitió el desarrollo de productos de software estratégicos para la universidad, así como evidenciar que el esquema funcionaba. En ese sentido, en el año 2020 se formalizó la unidad como el Centro de Ingeniería y Desarrollo de Software - CIDS, cambiando su denominación de investigación a ingeniería y siendo adscrito a la Vicerrectoría de Extensión y Proyección Social con articulación con el programa de ingeniería de sistemas, en el cual se siguieron vinculando docentes como asesores expertos a proyectos, estudiantes y egresados de dichos programas.

El CIDS tiene entre sus funciones: *Promover la transformación digital y avance institucional en materia de tecnología, establecer lineamientos y metodologías para el desarrollo de software ejecutados desde y para la Universidad, el apoyar a las unidades organizativas de la Universidad que ejecuten proyectos que contemplen la generación de productos de software, generar lineamientos y políticas, entre otras*.

Para su funcionamiento se definió que se contará con un líder, además de un equipo base cornformado por un arquitecto de software, un líder de calidad y un líder técnico. Además, que se vincularan docentes expertos como asesores. El CIDS trabaja por proyectos, por lo cual se define para cada uno su equipo de trabajo, su presupuesto, sus entregables y el cronograma de ejecución. Así mismo, se continuó con la vinculación de estudiantes para realizar los desarrollos. Es importante decir que transversalmente el equipo base del CIDS hace acompañamiento y apoyo al soporte, evolución y desarrollo de los diferentes sistemas de información que se ejecutan desde las diferentes unidades. En la Figura 1 se aprecia el esquema de trabajo descrito.

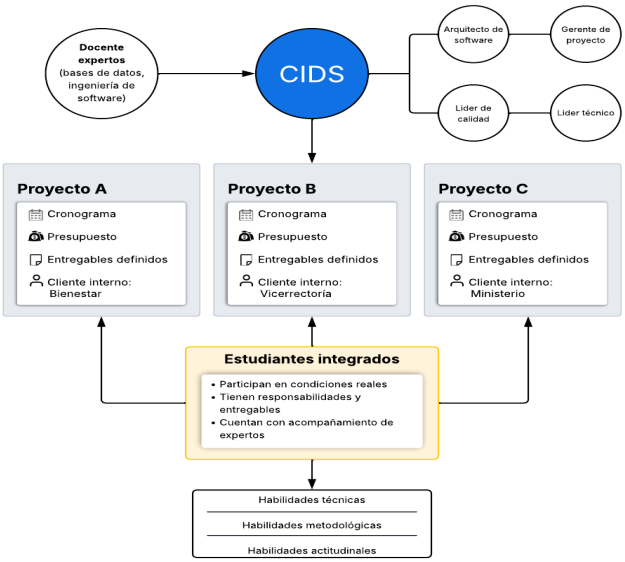


Figura 1. Esquema de trabajo del CIDS

C. Desarrollo de Soluciones de Software para la institución.

En el periodo comprendido entre 2016 a 2025 el CIDS ha ejecutado 39 proyectos, de los cuales 31 son de carácter interno y 8 son externos. Así mismo, ha desarrollado productos de nuevo conocimiento entre los que se destacan 10 artículos científicos y 6 ponencias. Además, se han registrado 16 productos de software. En cuanto al personal, ocho docentes han estado vinculados como asesores, se han contratado para los diferentes proyectos a 32 egresados y se han vinculado 63 estudiantes de los cuales 15 han sido pasantes, 18 practicantes y 30 ayudantes.

En relación con los desarrollos de las soluciones de software, se han implementado sistemas de interés general y para apoyar la gestión de dependencias. A continuación, se presentan algunos desarrollos para ejemplificar los procesos de transformación digital que dichas soluciones de software han generado. Para efectos de esta verificación, los desarrollos se presentan

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

enfatizando: (i) la situación previa de cada proceso (antes), (ii) el cambio habilitado por la solución (después) y (iii) el efecto observado en la operación institucional (impacto). Con ello, se busca evidenciar no solo el despliegue de plataformas, sino también su contribución a la eficiencia, trazabilidad, oportunidad de la información y mejora en la experiencia de los usuarios. Entre las soluciones de software que se destacan en la Unimagdalena se encuentran:

Portal web institucional (www.unimagdalena.edu.co)

Antes: La publicación de contenidos en el portal institucional dependía de un único webmaster y se centralizaba en la Oficina de Comunicaciones. Esto generaba sobrecarga operativa y limitaba la visibilidad de información relevante para comunidades específicas: noticias y eventos con alto impacto local (por unidad académica o administrativa) quedaban rezagados o no se publicaban en el portal principal.

Después: Se implementó un esquema de gestión descentralizada del contenido, manteniendo una estructura jerárquica donde la oficina de Comunicaciones continúa como productor y vocero del contenido oficial institucional, mientras que cada dependencia académico-administrativa puede actualizar su sección del portal con noticias y eventos de interés para su comunidad, teniendo mayor autonomía en la divulgación de su información. En este modelo, la Oficina de Comunicaciones cumple el rol de curaduría y supervisión editorial de lo publicado.

Impacto: Se incrementó significativamente el volumen y oportunidad de publicación de noticias y eventos, con comunicación en dos niveles (institucional y particular por dependencia). Se redujeron tiempos de salida de contenidos al distribuir responsabilidades, mejorando la pertinencia y la actualización continua de la información para los usuarios.

Portal de pagos – PSE (https://pse.unimagdalena.edu.co/)

Antes: El pago de facturas y servicios institucionales se realizaba principalmente mediante facturas impresas y pago en sucursales físicas. Este esquema afectaba de manera directa trámites masivos como el pago de matrículas, considerando la escala institucional (más de 20.000 estudiantes), y generaba fricciones logísticas y tiempos de recaudo más largos.

Después: Se habilitó un sistema de información que integró los canales de banca externa (pagos electrónicos) con el sistema financiero institucional. Con ello, el usuario puede mantener el flujo tradicional (factura física para pago en banco) y, además, realizar pagos por canales electrónicos habilitados para tal fin, asegurando conciliación y registro dentro del ecosistema institucional.

Impacto: Se disminuyeron los tiempos asociados al recaudo y, especialmente, el "rezago" entre el pago realizado por canal físico y la notificación/registro efectivo. En el canal electrónico (PSE) el recaudo se vuelve más inmediato, y el sistema ha soportado un volumen acumulado reportado superior a 500.000 transacciones, fortaleciendo la eficiencia operativa del proceso de pago y conciliación.

Sistema de talento humano (https://talentohumano.unimagdalena.edu.co/Sistema)

Antes: La información de personal administrativo y docente se gestionaba de forma física y, en algunos casos, en archivos de Excel dispersos, dificultando la obtención de una "fuente única de verdad". Esto implicaba jornadas extensas para consolidar datos y elevaba el riesgo de inconsistencias y reprocesos.

Después: Se construyó un sistema de información que actúa como interfaz integradora de múltiples fuentes (incluyendo el ERP tercerizado), centralizando en un solo ambiente la información del personal administrativo y docente, con acceso estructurado y disponibilidad para procesos internos.

Impacto: La centralización permitió habilitar servicios de autoservicio y automatización, como la generación de certificados laborales con firma digital, y mejoró la capacidad de reporte de la dependencia responsable hacia entidades externas, al contar con datos más consistentes, accesibles y trazables.

Videosferas (https://videosferas.com/)

Antes: El Programa de Cine y Audiovisuales producía un volumen alto de material multimedia que, históricamente, quedaba almacenado en medios físicos (memorias USB, discos, etc.), con baja capacidad de divulgación y sin un canal institucional eficiente para exhibición pública y posicionamiento de sus obras.

Después: Se consolidó una plataforma de exhibición digital que permite publicar, previa autorización de autores, documentales, animaciones, cortometrajes y otros contenidos producidos por docentes y estudiantes. Esta vitrina fortalece la circulación de obras, la visibilización de realizadores y el posicionamiento del programa en el ámbito audiovisual.

Impacto: La divulgación se volvió efectiva y con alcance ampliado, facilitando contactos y visibilidad para estudiantes y docentes. Durante la pandemia, la plataforma fue presentada como una alternativa familiar tipo "Netflix universitario", destacando su carácter gratuito y su oferta de contenidos audiovisuales.

Servicio matricula académica (https://matriculas.unimagdalena.edu.co/)

Antes: El proceso de matrícula operaba con una ventana limitada de aproximadamente 50 minutos por grupo (cerca de 500 usuarios), lo que generaba picos de demanda altamente concentrados y escenarios recurrentes de congestión. En la práctica, esto se traducía en episodios de alta presión para estudiantes y dependencias académicas/administrativas, con riesgos de indisponibilidad parcial del sistema, reprocesos y extensión del calendario de matrícula hasta por dos semanas, afectando la oportunidad, la confiabilidad y la percepción de calidad del servicio institucional.

Después: Con la modernización y habilitación del sistema se incrementó significativamente la capacidad de atención concurrente, permitiendo la participación de más de 5.000 estudiantes en simultáneo. Este cambio no solo amplió la escala operativa, sino que transformó el desempeño del proceso: se logró que cerca del 90% de la matrícula se ejecutara en los primeros 15 minutos, disminuyendo cuellos de botella y evitando que el acceso a cupos dependiera del turno asignado o de contingencias técnicas. En términos de equidad, el nuevo esquema me-

ISBN: 978-989-36481-2-4

joró las condiciones de acceso al proceso para la comunidad estudiantil, reduciendo asimetrías entre cohortes.

Impacto: La comunidad estudiantil percibió una mejora sustancial en la experiencia de registro académico, reflejada en mayor confianza en el sistema, disminución de la incertidumbre y menor necesidad de soporte reactivo durante la jornada de matrícula. A nivel institucional, la reducción del tiempo total del proceso y de la congestión disminuyó el estrés organizacional asociado, mejoró la continuidad del servicio y facilitó la gestión académica posterior (ajustes, validaciones y cierres), al contar con información consolidada en menor tiempo y con menos reprocesos. De forma complementaria, la estabilización del proceso contribuyó a mejorar la reputación digital de la institución en uno de los trámites más sensibles para estudiantes, al reducir incidentes visibles de caídas del sistema y fortalecer la percepción de eficiencia y confiabilidad del servicio. En la Tabla 1 se presenta un listado de soluciones de software que se implementaron para la institución.

TABLA 1. Otras soluciones de software institucionales

Eje misional	Soluciones desarrollados
Sistemas de interes general	• Sistema Avanzado de Bienestar Universitario – ABU • Sistema de información CIARP • Banco de Hoja de Vida Docente BDC • Repositorio Institucional de Biblioteca • Bodega de datos institucional • Gestión de normatividad interna y externa • Sistema de información gestión Consejo superior • COGUI
Para el eje de investigación	• Sistema de información para la Editorial Unimagdalena • Sistema de información para la gestión de la investigación • Apoyo para la gestión de Revistas Unimagdalena • Repositorio Oraloteca • Sistema de información para la gestión de eventos • Sistema de información para la Gestión del CIE
Para el eje de extensión y proyección social	• Sistema de información SIEG • Sistema de información SACE • Sistema de intermediación laboral SIL • Sistema de información ENGAGEDPRO • Sistema de información para la gestión de la investigación – SisVEX

En relación con los desarrollos para entidades externas se ha trabajado para la Asociación Hotelera y Turística de Colombia (COTELCO), Capítulo Magdalena, la Contraloría Departamental, así como para proyectos financiados con recursos del Sistema General de Regalías (SGR) de alcance nacional. Adicionalmente, se han adelantado desarrollos en articulación con instituciones del sector público local, incluyendo la Universidad del Distrito de Santa Marta, ampliando el impacto del portafolio más allá del ámbito interno y evidenciando capacidades de transferencia tecnológica y prestación de servicios especializados a terceros.

- Sistema de Información Turística del Magdalena y de Santa Marta D.T.C.H
- Sistema de información para la gestión de casos de la contraloría departamental del Magdalena
- Sistema de información para la divulgación e inscripción de aspirantes de la Universidad distrital de Santa Marta - USM
- HAC Ambiental del Caribe

D. Diseño de un modelo de medición de ACTI para el Centro de Ingeniería y Desarrollo Software - Unimagdalena

Considerando la importancia de ir registrando los avances logrados en los diferentes ámbitos, se vio la necesidad de contar con herramientas que permitieran hacer seguimiento al trabajo desarrollado por la institución en materia de desarrollo de software, por lo cual se desarrolló un modelo de medición de las Actividades de Ciencia, Tecnología e Innovación (ACTI) que realiza con el fin de tener indicadores de su gestión y su aporte a la institución. Este modelo de medición denominado MACTI-UM V1.0 contiene una batería de 40 indicadores, organizados en cinco dimensiones: insumo, proceso, resultados, productividad e impacto. Además, incorpora desagregaciones que permiten analizar la información desde diversas perspectivas, tales como tipo de vínculo, nivel de formación, unidad organizativa, y género, entre otras, ampliando así la capacidad analítica y operativa del modelo [12].

Entre los indicadores de impacto están: *Porcentaje de mejora en los procesos donde se implementan soluciones tecnológicas propuestas por la unidad*, *Porcentaje de mejora en indicadores institucionales gracias a soluciones de la unidad* y *Porcentaje de mejora en indicadores institucionales gracias a soluciones de la unidad*, que hacen parte de la categoría de Transformación digital. Una aplicación preliminar de este modelo en el CIDS permitió evidenciar una capacidad de ejecución y producción tecnológica representada en 39 proyectos (31 internos y 8 externos), así como el registro de 16 productos de software, además de una vinculación activa de talento mediante ocho docentes asesores, 32 egresados contratados y 63 estudiantes (15 pasantes, 18 practicantes y 30 ayudantes), constituyendo una base cuantitativa para el seguimiento del aporte institucional de la unidad. Entre los resultados de impacto se encontró los resultados presentados anteriormente en las soluciones descritas.

IV. Conclusiones

La transformación digital descrita se entiende, ante todo, como un proceso institucional que se materializa cuando la Universidad logra convertir necesidades misionales y administrativas en soluciones tecnológicas sostenibles, alineadas con la planeación y con capacidad de evolución. En ese marco, la consolidación de una unidad responsable del desarrollo (con metodología, roles, acompañamiento y continuidad) resulta determinante para que el software no sea un conjunto de iniciativas aisladas, sino un portafolio coherente que soporta la operación universitaria y habilita mejora continua de procesos y servicios. Los resultados presentados evidencian una dinámica consistente de ejecución y producción tecnológica (proyectos, productos de software y aportes de nuevo conocimiento), así

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

como el fortalecimiento del talento vinculado (docentes asesores, egresados y estudiantes) como mecanismo de construcción de capacidades instaladas. En conjunto, el portafolio de soluciones institucionales de interés general —financiadas con presupuesto central y orientadas a procesos transversales— refleja un tránsito desde esquemas manuales o centralizados hacia modelos con mayor integración, trazabilidad, oportunidad y autoservicio; es decir, cambios operativos verificables que constituyen el núcleo del impacto de la transformación digital.

Por otra parte, se ve la oportunidad de seguir fortaleciendo el CIDS como unidad desde un enfoque técnico, con lo cual, se espera en el futuro cercano el organizar y establecer los procesos dentro de un marco de madurez que permita gestionar adecuadamente los procesos de mejoramiento. Además, de buscar procesos de certificación que consoliden la unidad y permitan abrir nuevas oportunidades. Así mismo, se espera que la unidad pueda apoyar los nuevos desafíos que se vislumbran como lo son la interoperabilidad de los sistemas, la implementación de soluciones de analítica, inteligencia artificial, a su vez, que se trabaje en aspectos de gestión y gobierno de TI.

Finalmente, para asegurar sostenibilidad y escalabilidad, se identifica como línea de consolidación complementar el desarrollo de software con criterios verificables de calidad en medios digitales, particularmente en accesibilidad y usabilidad. Esto no solo responde a un deber de mejora institucional, sino también a exigencias normativas sobre acceso a la información pública y lineamientos de medios digitales. En esa dirección, el uso de guías y estándares reconocidos —como WCAG, ISO 9241 e ISO/IEC 25010— puede institucionalizar prácticas de evaluación y mejora continua, elevando la madurez de las plataformas, reduciendo barreras de acceso y fortaleciendo la experiencia de usuario [13] y la transformación digital como habilitador de capacidades y servicios institucionales. Además, es importante resaltar que si bien hay un apoyo institucional existen desafíos con relación a la dependencia presupuestal a la administración de la universidad, la alta rotación del talento, y el mantenimiento evolutivo de las soluciones. Por ello, resulta pertinente consolidar mecanismos de gobernanza y continuidad que reduzcan la dependencia presupuestal, mitiguen los efectos de la rotación del talento y aseguren el mantenimiento evolutivo de las soluciones, preservando su escalabilidad en el tiempo.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad del Magdalena por la confianza dada al trabajo realizado por el equipo de trabajo del CIDS. Así mismo, a los docentes, egresados y estudiantes que han hecho parte de la unidad.

Referências Bibliográfica

[1] R. García Duarte y J. A. Wilches Tinjacá, Eds., La educación superior en Colombia: Retos y perspectivas en el siglo XXI en Serie Miradas contemporáneas en educación, no. 3. Bogotá, Colombia: Universidad Distrital Francisco José de Caldas., 2020. ISBN: 978-958-787-177-7.

[2] R. Terrazas Pastor and R. Silva Murillo, "Education and the knowledge society [La educación y la sociedad del conocimiento]," *Perspectivas*, no. 32, pp. 145–168, 2013. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=425941262005.

[3] D. E. Soto Arango and A. Forero Romero, "The Latin American and Caribbean university: Challenges in the XXI century [La universidad latinoamericana y del Caribe: Retos en el siglo XXI]," *Revista Historia de la Educación Latinoamericana*, vol. 18, no. 26, pp. 279–309, 2016, doi: 10.19053/01227238.4375.

[4] L. A. Melo-Becerra, J. E. Ramos-Forero, and P. O. Hernández-Santamaría, "Higher education in Colombia: Current situation and efficiency analysis [La educación superior en Colombia: situación actual y análisis de eficiencia]," *Desarrollo y Sociedad,* no. 78, pp. 59–111, 2017, doi: 10.13043/dys.78.2.

[5] F. J. García-Peñalvo, "La transformación digital de las universidades: Hoja de ruta," presentado en *Seminario La Administración Electrónica en la Universidad Pública*, Salamanca, España, 2021. [En línea]. Disponible: https://bit.ly/3bQHTIC. doi: 10.5281/zenodo.4784074. Disponible en: http://repositorio.grial.eu/handle/grial/2273

[6] OECD, *Benchmarking Higher Education System Performance*. Paris, France: OECD Publishing, 2019. doi: 10.1787/be5514d7-en.

[7] T. Forero, "Diagnóstico de los aprendizajes en América Latina y el Caribe: el Informe PISA," presentado en el *6th Foro Regional de Política Educativa*, en línea, 2022, Argentina, 2023, 14 pp. [En línea]. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000386982_eng

[8] Consejo Superior - Universidad del Magdalena, *ACS06-21 Plan de Desarrollo Universitario UNIMAGDALENA COMPROMETIDA 2020–2030*. Santa Marta, Colombia, 2 de julio de 2021.

[9] P. Vera, *Plan de Gobierno 2016–2020: Una universidad más incluyente e innovadora*, 2016. [En línea]. Disponible en: https://www.unimagdalena.edu.co/Content/Public/Docs/Entrada_15/adjunto_15-20210205093719_304.pdf

[10] P. Vera, «Plan de Gobierno Unimagdalena 2020-2024. Por una universidad aún más incluyente e innovadora.» Accedido: 2 de febrero de 2000. [En línea]. Disponible en: https://www.unimagdalena.edu.co/Content/Public/Docs/Entrada_15/adjunto_15-20241210145937_592.pdf

[11] P. Vera, *Plan de Gobierno UNIMAGDALENA 2020–2024: Por una universidad aún más incluyente e innovadora*. [En línea]. Disponible en: https://www.unimagdalena.edu.co/Content/Public/Docs/Entrada_15/adjunto_15-20241210145937_592.pdf. [Accedido: 2 de febrero de 2000].

[12] M. P. González-Zabala and C. Polo-Castro, "Modelo de medición de ACTI para unidades de ingeniería y desarrollo de software universitarias: Caso CIDS Universidad del Magdalena," en *XXI Congreso Latino-Iberoamericano de Gestión Tecnológica y de la Innovación (ALTEC 2025)*, Santiago de Chile, Chile, Oct. 2025.

[13] J. Pineda, C. Polo-Castro, and M. P. González-Zabala, "Diseño de una política de accesibilidad y usabilidad para sistemas de información web: Caso Universidad del Magdalena [Design of an Accessibility and Usability Policy for Web Information Systems: A Case Study of the Universidad del Magdalena]," en *20th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI 2025)*, Lisbon, Portugal: Information and Technology Management Association (ITMA), 2025. [En línea]. Disponible en: https://cisti.eu/proceedings/proceedingscisti2025ptes.pdf

Arbomonitor: Uma abordagem orientada por dados para vigilância de arboviroses baseada em sistemas de informação

Arbomonitor: A data-driven approach to arbovirus surveillance based on information systems.

João Pedro Pereira Frutuoso
Departamento de Computação,
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)
Mossoró - RN, Brasil
JOAO.FRUTUOSO@alunos.ufersa.edu.br

Mikael Johnatan da Silva Azevedo
Departamento de Computação,
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)
Mossoró - RN, Brasil
mikael.azevedo@alunos.ufersa.edu.br

Amanda Gondim de Oliveira
Departamento de Computação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)
Mossoró - RN, Brasil
amandagondim@ufersa.edu.br

Angélica Félix de Castro
Departamento de Computação,
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)
Mossoró - RN, Brasil
angelica@ufersa.edu.br

Paulo Gabriel Gadelha Queiroz
Departamento de Computação, Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)
Mossoró - RN, Brasil
pgabriel@ufersa.edu.br

***Resumo* — A vigilância epidemiológica de arboviroses enfrenta desafios relacionados não à escassez de dados, mas à ausência de sistemas de informação capazes de integrar, de forma proativa, análise descritiva, geoespacial e preditiva em apoio à tomada de decisão. Este artigo propõe o ArboMonitor, uma abordagem orientada por dados, baseada em sistemas de informação para a vigilância de arboviroses, implementada por meio de uma plataforma computacional modular. Diferentemente das soluções existentes, predominantemente descritivas, a abordagem integra visualização interativa, análise geoespacial por meio de mapas de calor e modelagem preditiva de casos em um único ambiente. O sistema foi desenvolvido a partir do estudo do problema com profissionais de saúde pública e avaliado empiricamente utilizando os modelos *System Usability Scale* (SUS) e *Technology Acceptance Model* (TAM). Os resultados indicam excelente usabilidade (SUS = 82,5) e alta aceitação (TAM), com respostas amplamente positivas nas categorias de utilidade percebida (no apoio à decisão), facilidade de uso percebida (interface intuitiva) e intenção de uso (integração à rotina profissional). Isso evidencia seu potencial para apoiar decisões estratégicas na vigilância epidemiológica. As contribuições do trabalho incluem a definição de uma abordagem conceitual replicável e a validação empírica de um sistema aplicado ao monitoramento de arboviroses.**

Palavras **Chave - Arboviroses; sistemas de informação; vigilância epidemiológica; análise preditiva.**

***Abstract* — Epidemiological surveillance of arboviruses faces challenges related not to data scarcity, but to the lack of information systems capable of proactively integrating descriptive, geospatial, and predictive analysis to support decision-making. This article proposes ArboMonitor, a data-driven approach based on information systems for arbovirus surveillance, implemented through a modular computational platform. Unlike existing, predominantly descriptive solutions, this approach integrates interactive visualization, geospatial analysis using heat maps, and predictive case modeling within a single environment. The system was developed based on a problem study with public health professionals and empirically evaluated using the System Usability Scale (SUS) and Technology Acceptance Model (TAM). Results indicate excellent usability (SUS = 82.5) and high acceptance (TAM), with overwhelmingly positive responses in the categories of perceived usefulness (decision support), perceived ease of use (intuitive interface), and intention to use (routine integration). This highlights its strategic potential in epidemiological surveillance. The contributions of this work include the definition of a replicable conceptual approach and the empirical validation of an information system applied to arbovirus monitoring.**

Keywords - Arboviruses; information systems; epidemiological surveillance; predictive analysis.

I. Introdução

Arboviroses como dengue, zika e chikungunya configuram-se como um dos principais problemas de saúde pública no Brasil, apresentando caráter recorrente e forte impacto nos

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

sistemas de saúde. A adaptação do mosquito *Aedes Aegypti* ao ambiente urbano, aliada a fatores ambientais e climáticos, têm contribuído para o aumento da complexidade do controle dessas doenças [1]. Nesse contexto, a vigilância epidemiológica torna-se um processo cada vez mais dependente da capacidade de coletar, integrar e analisar grandes volumes de dados de forma ágil.

A área da saúde tem sido uma das áreas mais beneficiadas pela tecnologia, por ser considerada detentora de problemas clássicos, possuidores de todas as peculiaridades necessárias para serem instrumentalizados por tais sistemas [2]. Neste contexto, a modelagem de algoritmos preditivos e sua implementação em sistemas computacionais viabilizam a antecipação de surtos de doenças como a dengue, a chikungunya e a zika. Ao integrar dados epidemiológicos a variáveis climáticas, técnicas de aprendizado de máquina e de aprendizado profundo superam as limitações do monitoramento tradicional, fornecendo informações estratégicas essenciais para a resposta rápida e para a adoção de ações preventivas pelos serviços de saúde pública [3].

Apesar da ampla disponibilidade de dados epidemiológicos provenientes de sistemas oficiais, observa-se que muitas soluções computacionais adotadas atualmente concentram-se em análises descritivas, limitando-se à apresentação de dados históricos consolidados. Essa abordagem dificulta a identificação antecipada de tendências e a atuação proativa por parte dos gestores públicos. Assim, o desafio central não reside na ausência de dados, mas na carência de sistemas de informação capazes de transformar esses dados em informação acionável para apoio à decisão.

Diante dessa lacuna, este trabalho propõe uma abordagem orientada por dados, com o objetivo de apoiar a vigilância epidemiológica de arboviroses. A abordagem foi implementada em um sistema de informação chamado ArboMonitor, que fornece integração de visualização interativa, análise geoespacial e modelagem preditiva. Além do desenvolvimento do sistema ArbMonitor, o estudo apresenta uma avaliação empírica de usabilidade e aceitação realizada com profissionais de saúde de Mossoró-RN. O objetivo foi validar a eficácia e a aplicabilidade da ferramenta em um contexto institucional real.

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta o estado da arte, destacando as limitações das soluções existentes; a Seção III descreve os procedimentos metodológicos adotados; a Seção IV detalha a abordagem orientada por dados; a Seção V apresenta as funcionalidades do sistema que implementa a abordagem; a Seção VI discute os resultados da avaliação empírica e analisa as ameaças à validade; e a Seção VII apresenta as conclusões e trabalhos futuros.

II. Estado da Arte

Nesta seção, discutem-se alguns conceitos importantes e apresentam-se sistemas computacionais aplicados às arboviroses.

A. Arboviroses no Brasil

O Brasil é um país tropical de grande extensão territorial (8.516.000 km^2) e com 211,8 milhões de habitantes. Mais de 1/3 deste território é coberto por florestas tropicais ou por outros ecossistemas naturais, com condições ideais para a ocorrência de diversas arboviroses. O principal vetor dessas doenças é o mosquito *Aedes Aegypti*, que pode inserir o vírus ao picar uma pessoa. Depois do período de incubação, esse vírus pode ser transmitido a outras pessoas que forem picadas pelo mesmo inseto [4]. Apesar dos esforços para a eliminação do mosquito transmissor, a dengue é considerada uma doença emergente em países tropicais e subtropicais, entre eles o Brasil. Diversos fatores podem estar associados aos casos recorrentes no país, dentre eles: a pluviosidade, as elevadas temperaturas, a introdução e/ou circulação de um ou mais sorotipos do vírus e a crescente proporção de pacientes acometidos pela forma grave da doença [5].

B. Mossoró, Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil

Mossoró é a segunda cidade mais importante do Estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. O município estende-se por 2.099,3 km² e contava com 297.378 habitantes no último censo de 2022. A densidade demográfica é de 141,7 habitantes por km² no território do município [6].

Mossoró tem enfrentado surtos recorrentes de dengue, chikungunya e zika nos últimos anos, com dados indicando uma flutuação significativa nos casos, frequentemente associada ao período chuvoso e a altos índices de infestação do mosquito *Aedes Aegypti* [8].

Nos últimos anos, o panorama em Mossoró se apresentou da seguinte maneira [9]:

- **2021:** Dados de janeiro a julho de 2021 mostraram uma queda expressiva nos casos confirmados de dengue, chikungunya e zika em comparação com o mesmo período de 2020, com reduções de 87%, 97% e 95%, respectivamente.
- **2022:** Houve um aumento acentuado no número de casos. Um boletim epidemiológico apontou que Mossoró registrou 860 casos de arboviroses até outubro, dos quais 487 foram confirmados como dengue. Outros relatos no início do ano indicaram um crescimento de mais de 800% no número de casos de dengue no estado, refletindo a situação local. O primeiro Levantamento Rápido de Índices para *Aedes Aegypti* (LIRA) do ano classificou o município como de alto risco, com índice de 5,0%.
- **2023:** O ano registrou uma redução geral dos casos de dengue, chikungunya e zika em todo o Rio Grande do Norte em comparação com 2022, conforme boletins estaduais.
- **2024:** Boletins epidemiológicos estaduais indicaram um aumento de casos prováveis de zika em comparação com 2023, tanto no sexo feminino quanto no masculino, até a semana epidemiológica 46. A incidência de chuvas na região continuou sendo um fator de preocupação para a proliferação do mosquito.

C. Sistemas computacionais para monitorar doenças infecciosas

A utilização de sistemas de informação no apoio à vigilância epidemiológica tem se intensificado nos últimos anos, especialmente por meio de painéis interativos e plataformas de visualização de dados. Essas ferramentas desempenham um papel

ISBN: 978-989-36481-2-4

relevante ao facilitar o acesso a informações epidemiológicas e promover maior transparência.

No Brasil, o ecossistema de saúde pública dispõe de diversas ferramentas tecnológicas. O mais conhecido é o SINAN (Sistema de Informação de Agravos de Notificação) [12], principal base oficial de casos notificados de arboviroses, utilizado em todas as esferas governamentais para alimentar séries históricas. No monitoramento de outras síndromes, o SIVEP-Gripe [10] atua na investigação da Síndrome Respiratória Aguda Grave (SRAG). Para a visualização do cenário epidemiológico, destacam-se o Painel de Monitoramento de Arboviroses do Ministério da Saúde [13], que centraliza indicadores de incidência nacional, e os diversos painéis epidemiológicos estaduais, como o painel de casos do Rio Grande do Sul [14], que apresentam o panorama de casos confirmados e óbitos por município.

Entretanto, a análise da aplicação dessas ferramentas revela limitações práticas para a gestão municipal. A grande maioria das plataformas governamentais, como o SINAN e os painéis estaduais, operam de forma predominantemente descritiva, consolidando o que já ocorreu. Por outro lado, existem iniciativas avançadas voltadas para a antecipação de cenários, a exemplo do InfoDengue [11], que produz alertas precoces preditivos baseados no risco de transmissão. Contudo, mesmo com essas inovações, observa-se frequentemente uma fragmentação metodológica: há uma separação entre os sistemas descritivos de rotina, as ferramentas de análise espacial interativa e os modelos de previsão.

Embora o ecossistema de saúde pública brasileiro conte com ferramentas robustas, a maioria apresenta lacunas na integração de funcionalidades essenciais para uma resposta ágil a nível municipal. Para fundamentar a necessidade do ArboMonitor, a Tabela I sistematiza as diferenças entre as soluções existentes e a abordagem proposta

TABELA I. Comparação Funcional entre Sistemas de Vigilância

Sistema	Natureza dos dados	Análise Espacial	Predição	Integração de Funções
SINAN	Próprio SINAN	Descritiva/ Histórica	Limitada/ Tabelas	Não
SIVEP-Gripe	SRAG	Descritiva/ Histórica	Não	Não
Painel MS	Descritiva (indicadores)	Mapas Estáticos	Não	Média
InfoDengue	Analítica/ Preditiva	Regional	Sim	Média
ArboMonitor (proposto)	Integrada (Descritiva/ Analítica)	Mapas de Calor Interativos	Sim (LSTM + Clima)	Alta

Nesse cenário, o desafio transcende a ausência de dados ou de previsões isoladas, residindo na necessidade de abordagens que integrem múltiplas camadas analíticas em um único ambiente. A abordagem apresentada neste trabalho foi concebida para preencher essa lacuna, articulando dados epidemiológicos descritivos, análise geoespacial de alta granularidade e modelagem preditiva em uma mesma plataforma. Para validar esta proposição conceitual, desenvolveu-se a sua instanciação tecnológica por meio do sistema ArboMonitor.

III. Procedimentos metodológicos

Esta pesquisa possui natureza aplicada, combinando a proposição de uma abordagem orientada por dados com sua respectiva validação empírica. O estudo foi estruturado em três etapas metodológicas principais: estudo do problema e definição da abordagem, instanciação tecnológica por meio do desenvolvimento de um sistema e avaliação com usuários finais.

A. Estudo do Problema e Definição da Abordagem

A concepção da abordagem orientada por dados exigiu, primeiramente, um estudo aprofundado do problema e do contexto de vigilância epidemiológica. Este estudo foi conduzido em duas frentes complementares: a observação das limitações das tecnologias existentes e a interação direta com gestores de saúde pública da cidade de Mossoró, no estado do Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil. Inicialmente, a análise de plataformas oficiais de monitoramento revelou que a maioria dos sistemas opera de forma estritamente descritiva, carecendo de mecanismos proativos, analíticos e preditivos. Simultaneamente, realizaram-se reuniões e entrevistas com os profissionais da Secretaria de Saúde de Mossoró para mapear o fluxo de trabalho local. Durante essa imersão, constatou-se que o monitoramento dependia de processos manuais e do uso intensivo de planilhas eletrônicas para a consolidação dos dados provenientes do SINAN, o que dificultava a formulação de respostas ágeis aos surtos. O cruzamento dessas limitações sistêmicas com as necessidades práticas relatadas pelos profissionais forneceu a base para definir os pilares da abordagem proposta, estruturada para transcender a mera visualização de dados e oferecer automação, análise geoespacial e suporte preditivo à decisão.

B. Desenvolvimento do Sistema

O desenvolvimento do ArboMonitor seguiu a metodologia Scrum: houve uma inspiração nos métodos ágeis ao utilizar a divisão do trabalho em sprints, entregas incrementais e participação de *stakeholders* durante o processo. Essa abordagem permitiu a incorporação contínua de feedback dos usuários ao longo do processo de desenvolvimento, contribuindo para alinhar a solução às necessidades reais do contexto de uso [17].

C. Avaliação com Usuários

A avaliação do sistema foi estruturada em duas fases combinando abordagens quantitativas e qualitativas. O estudo piloto de usabilidade foi conduzido com três estudantes universitários, que exploraram a plataforma livremente por até 30 minutos, respondendo ao questionário *System Usability Scale* (SUS) [15]. A avaliação principal, por sua vez, contou com a participação de dois profissionais da saúde pública vinculados à Prefeitura de Mossoró. Esta etapa iniciou-se com uma apresentação de 15 minutos sobre a ferramenta, seguida da execução de um roteiro prático. Durante a simulação de uso real, solicitou-se aos profissionais que realizassem as seguintes tarefas: criação de credenciais de acesso; importação de uma planilha com dados epidemiológicos do município; navegação e análise de informações no *dashboard*; utilização do módulo de previsão de casos; e visualização do mapa de calor. Ao término das tarefas, os participantes preencheram os formulários do SUS e do TAM [16], complementados por entrevistas curtas para a coleta de percepções qualitativas.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

IV. Abordagem Orientada por Dados Baseada em Sistemas de Informação

A abordagem proposta fundamenta-se na premissa de que sistemas de informação para vigilância epidemiológica devem ir além da apresentação de dados históricos. Nesse sentido, a abordagem definida estrutura-se em cinco pilares conceituais:

a) *Visualização Interativa:* Apresentação de dados epidemiológicos por meio de dashboards dinâmicos, permitindo análise temporal e comparativa.

b) *Análise Geoespacial:* A utilização de mapas de calor para identificação visual de áreas com maior concentração de casos.

c) *Modelagem Preditiva:* Incorporação de modelos de previsão de casos, com possibilidade de incluir variáveis ambientais.

d) *Gestão de dados:* Suporte à importação e ao gerenciamento de dados epidemiológicos atualizados.

e) *Controle de Acesso:* Diferenciação de perfis de usuários, assegurando a confidencialidade e o uso adequado das informações.

A arquitetura do sistema desenvolvido pode ser visualizada na Fig. 1 abaixo.

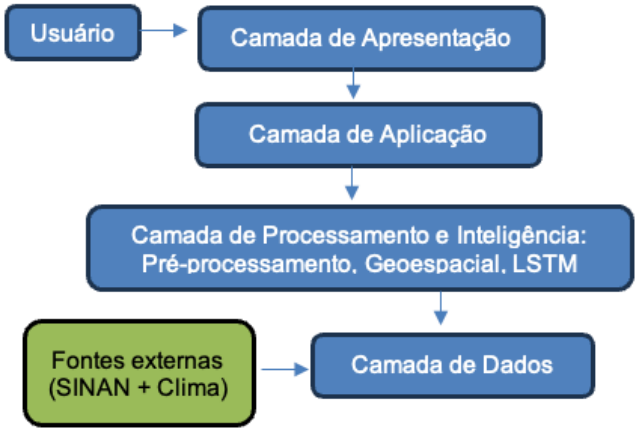


Figura 1. Arquitetura do sistema desenvolvido

Essa abordagem não se limita à implementação de uma ferramenta específica, podendo ser replicada em diferentes contextos e em diferentes escalas territoriais.

V. Funcionalidades do Sistema ArboMonitor

O ArboMonitor foi implementado com base nos pilares conceituais da abordagem apresentada na seção anterior e como uma plataforma web modular. Sua interface principal consiste em um dashboard público que apresenta indicadores gerais e gráficos de evolução temporal das arboviroses monitoradas.

A interface principal do sistema é um dashboard (Fig. 2), projetado para ser acessível a qualquer usuário, que centraliza os dados epidemiológicos de dengue, zika e chikungunya da cidade de Mossoró. A tela apresenta uma visão geral com o número total de notificações e bairros afetados, além de gráficos que permitem acompanhar a evolução temporal das doenças (casos por semana e acumulados).

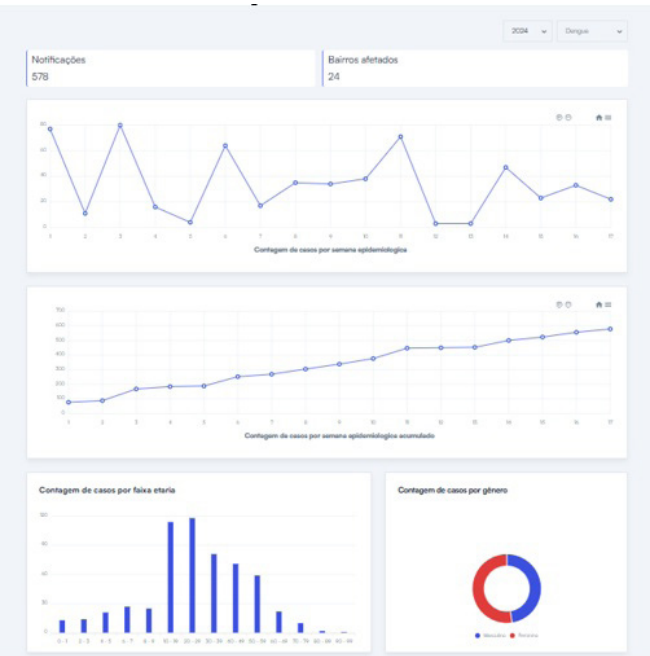


Figura 2. Dashboard do sistema ArboMonitor

Uma funcionalidade central é o mapa de calor interativo (Fig. 3), que permite a análise espacial da distribuição dos casos por bairro, facilitando a identificação de áreas prioritárias para intervenção.

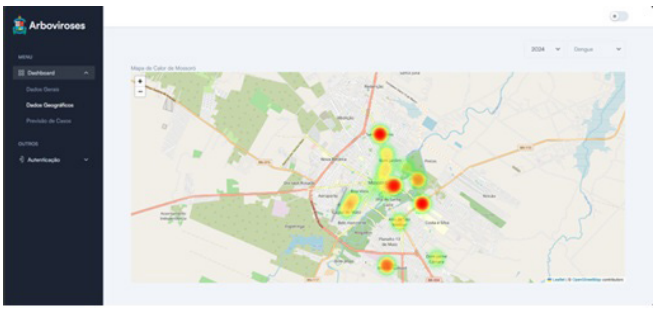


Figura 3. Mapa de Calor

Complementarmente, o sistema incorpora um módulo de análise preditiva baseado em redes neurais profundas do tipo *Long Short-Term Memory* (LSTM), selecionado por sua eficácia em capturar dependências temporais complexas e padrões sazonais. A arquitetura implementada consiste em uma camada oculta com 50 neurônios, utilizando a função de ativação ReLU para as saídas e Tanh para as ativações recorrentes das células de memória. O treinamento foi configurado com um batch size de 12, permitindo que a rede processe ciclos anuais completos antes da atualização dos pesos. Os parâmetros da rede foram otimizados via *GridSearchCV*. O modelo processa variáveis

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

exógenas como temperatura, pluviosidade e umidade, além de dados históricos defasados (30 e 60 dias), permitindo a projeção da incidência de casos para o ciclo mensal subsequente. Em testes comparativos, esta configuração de rede LSTM demonstrou um alto desempenho preditivo, alcançando um R^2 de 0.79, superando modelos clássicos como *Random Forest* e *Multilayer Perceptron* em termos de acurácia e erro quadrático médio (MSE) [3].

Nesta interface, apresentada na Figura 4, o usuário pode parametrizar variáveis exógenas meteorológicas — como índice pluviométrico, umidade relativa do ar e temperatura — permitindo que o modelo realize a inferência da incidência de casos para o ciclo mensal subsequente. O resultado é integrado dinamicamente ao gráfico de série temporal, fornecendo uma projeção que auxilia a vigilância antecipatória e o planejamento estratégico de ações de controle vetorial

A arquitetura modular adotada facilita a expansão da plataforma e a integração com outras bases de dados, reforçando seu potencial como sistema de informação para vigilância epidemiológica.

Figura 4. Dashboard do sistema ArboMonitor

Em síntese, o ArboMonitor consolida-se como uma ferramenta integrada de vigilância epidemiológica ao combinar visualização interativa, análise espacial e modelagem preditiva em uma única plataforma web. Ao articular dados históricos, variáveis meteorológicas e técnicas avançadas de aprendizado profundo, o sistema não apenas descreve o cenário atual das arboviroses em Mossoró, mas também antecipa tendências futuras, subsidiando decisões estratégicas mais assertivas. Sua arquitetura modular e expansível amplia as possibilidades de evolução tecnológica e integração com novas fontes de dados, fortalecendo seu papel como suporte inteligente à gestão pública e ao controle das arboviroses.

Do ponto de vista epidemiológico, a integração de análises espaciais e preditivas permite a identificação de regiões de alto risco, combinada com a previsão de tendências futuras de incidência. Essa dupla capacidade analítica apoia intervenções direcionadas, permitindo que gestores de saúde pública priorizem áreas críticas e antecipem as necessidades de alocação de recursos.

VI. Resultados e Discussão

Os resultados da avaliação empírica indicam uma recepção positiva do ArboMonitor. No estudo piloto, o sistema obteve pontuação SUS de 86,67 (avaliado por alguns alunos da Universidade), enquanto na avaliação principal com profissionais de saúde a pontuação foi de 82,5, valor considerado excelente segundo a literatura.

O formulário SUS (respondido por alguns alunos) aparece na Tabela II, onde é possível visualizar a média das respostas obtidas para cada uma das 10 perguntas do formulário, em uma escala de 1 (“Discordo totalmente”) a 5 (“Concordo totalmente”).

TABELA II. Resultado dos questionários SUS com os alunos

Pergunta	Média
Eu achei o sistema fácil de usar	5,00
Eu achei o sistema muito complexo.	1,67
Eu achei que o sistema foi bem fácil de aprender a usar.	5,00
Eu achei que o sistema foi muito difícil de usar.	1,00
Eu senti muita confiança ao usar o sistema.	5,00
Eu tive que aprender muitas coisas antes de me sentir confortável usando o sistema.	1,00
Eu achei o sistema muito intuitivo.	4,33
Eu precisei de apoio técnico para poder usar o sistema.	1,00
Eu achei o sistema muito simples de usar.	5,00
Eu me senti no controle ao usar o sistema.	5,00

A pontuação final do questionário, calculada pelo cálculo padrão do método SUS, foi de 86,67.

O estudo principal contou com a participação de profissionais da saúde pública vinculados à Prefeitura de Mossoró. Os dados foram coletados após a execução de um roteiro de tarefas que abrangia as principais funcionalidades do sistema. Os resultados do questionário do SUS aplicado aos profissionais estão apresentados na Tabela III.

TABELA III. Resultado dos questionários SUS com os profissionais

Pergunta	Média
Eu achei o sistema fácil de usar	5,00
Eu achei o sistema muito complexo.	2,50
Eu achei que o sistema foi bem fácil de aprender a usar.	4,50
Eu achei que o sistema foi muito difícil de usar.	1,50
Eu senti muita confiança ao usar o sistema.	3,50
Eu tive que aprender muitas coisas antes de me sentir confortável usando o sistema.	2,50
Eu achei o sistema muito intuitivo.	4,00
Eu precisei de apoio técnico para poder usar o sistema.	2,50
Eu achei o sistema muito simples de usar.	4,50
Eu me senti no controle ao usar o sistema.	4,50

A pontuação final desta avaliação foi de 82,5 com profissionais. Essa pontuação e os relatos qualitativos sobre a facilidade

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

de ‘ver’ os focos no mapa indicam que o ArboMonitor atua como um eficaz suporte cognitivo. Na Informática em Saúde, o sucesso de um sistema de apoio à decisão depende da sua capacidade de reduzir a carga mental do tomador de decisão. Ao substituir o cruzamento mental de tabelas e planilhas por uma visualização espacial de alta granularidade, o sistema minimiza o risco de erros de interpretação, permitindo que o gestor foque na estratégia de intervenção e não no processamento manual de dados.

A aceitação do sistema foi mensurada por meio de um questionário ***baseado*** no *Technology Acceptance Model* (TAM). Destaca-se que, no formulário TAM, a maioria das respostas concentrou-se em ‘concordo’ e ‘concordo totalmente’.

A alta utilidade percebida no modelo TAM valida a premissa de que a informática em saúde deve evoluir de repositórios de dados (como o SINAN e SIVEP-Gripe) para sistemas inteligentes de antecipação. A literatura aponta que a aceitação de tecnologias por profissionais de saúde é diretamente proporcional à percepção de que a ferramenta melhora o desempenho clínico ou gerencial. A valorização do módulo LSTM para projeção de casos demonstra que o ArboMonitor preenche a lacuna de ‘informação acionável’, transformando séries históricas em inteligência epidemiológica.

Para complementar os achados quantitativos do SUS e do TAM, as entrevistas curtas revelaram percepções qualitativas que reforçam o impacto prático da ferramenta na rotina da saúde pública. De modo geral, os profissionais destacaram que a transição de planilhas estáticas para um ambiente visual dinâmico reduz expressivamente o esforço cognitivo na interpretação dos dados epidemiológicos. A integração do mapa de calor e da modelagem preditiva foi o aspecto mais valorizado durante as interações. Ilustrando esse impacto, um dos participantes relatou sobre a análise espacial: *“A visualização no mapa de calor ajuda muito; em vez de cruzar dados de bairros mentalmente através de tabelas, nós conseguimos ver de forma mais direta para onde direcionar a nossa atenção”*.

Em relação à antecipação de cenários, outro profissional ressaltou a percepção sobre o módulo preditivo: *“Ter a projeção de casos para os próximos meses é algo muito interessante, pois traz uma informação adicional que pode apoiar o nosso planejamento”*. Os resultados do TAM evidenciaram que a ‘Facilidade de Uso Percebida’ não foi apenas estética, mas operacional, refletindo-se na ‘Intenção de Uso’ para a rotina profissional. Isso reforça a ideia que quando um sistema de informação é percebido como uma extensão natural do fluxo de trabalho — e não como uma tarefa burocrática adicional — as barreiras de adoção institucional são drasticamente reduzidas. A integração de múltiplas funções em uma interface clara é o que diferencia o ArboMonitor da fragmentação metodológica observada em ferramentas tradicionais.

Mais do que a visualização, o sistema possibilita a análise de padrões temporais. A série temporal observada revela tendências sazonais, com aumento da incidência durante os períodos chuvosos, sugerindo uma forte relação entre as condições climáticas e a propagação das arboviroses. Essas dinâmicas temporais reforçam a importância de integrar variáveis ambientais aos modelos preditivos.

O modelo LSTM fornece, além do desempenho preditivo, *insights* analíticos sobre a dinâmica da doença. Ao capturar dependências temporais e efeitos de defasagem (30 e 60 dias), o modelo destaca relações defasadas entre as condições ambientais e a incidência de casos. Essa capacidade permite a identificação de sinais precoces de surtos, apoiando a tomada de decisões proativas.

A principal ameaça à validade externa do estudo refere-se ao tamanho reduzido da amostra e à sua concentração em um único contexto institucional. Além disso, a avaliação foi realizada em ambiente controlado, o que pode não refletir integralmente as condições reais de uso.

Apesar dessas limitações, os resultados obtidos fornecem evidências iniciais relevantes sobre a viabilidade e o potencial da abordagem proposta, servindo de base para estudos futuros mais abrangentes.

VII. Conclusão e Trabalhos futuros

Este trabalho apresentou a proposição de uma abordagem orientada por dados para a vigilância de arboviroses, concebida para superar as limitações recorrentes de soluções predominantemente descritivas empregadas na saúde pública. A proposta conceitual fundamenta-se na integração de visualização interativa, análise geoespacial e modelagem preditiva, visando transformar dados epidemiológicos em informações estratégicas e antecipatórias, a fim de oferecer suporte efetivo à tomada de decisão.

Para validar a viabilidade técnica e conceitual desta abordagem, realizou-se a sua instanciação tecnológica por meio do desenvolvimento do sistema ArboMonitor, uma plataforma *web* modular. Os resultados da avaliação empírica, conduzida com profissionais de saúde pública, confirmaram a eficácia prática da solução, com excelente usabilidade (SUS = 82,5) e alta aceitação segundo os construtos do modelo TAM. Esses achados reforçam que a abordagem proposta, ao ser materializada em um sistema de informação, atende simultaneamente a requisitos técnicos, cognitivos e operacionais, aspectos críticos para a sua adoção em ambientes institucionais reais.

Do ponto de vista científico, a principal contribuição do trabalho reside na proposição e na validação de uma abordagem replicável, aplicável a diferentes contextos territoriais e epidemiológicos. Ao articular múltiplas camadas analíticas em um único sistema de informação, o ArboMonitor avança em relação às ferramentas existentes e demonstra como dados epidemiológicos podem ser transformados em informação acionável, favorecendo uma atuação mais proativa na vigilância de arboviroses.

Como trabalhos futuros, pretende-se ampliar a avaliação do sistema por meio de estudos longitudinais, com implantação contínua em contextos de uso real e acompanhamento de seu impacto nos processos decisórios das equipes de vigilância. Também está prevista a integração automática com bases de dados oficiais, como o SINAN, e a incorporação de variáveis ambientais e climáticas em tempo real, visando ao aprimoramento dos modelos preditivos. Adicionalmente, a evolução da abordagem inclui a exploração de técnicas mais avançadas de aprendizado de máquina e a adaptação do sistema para outras

ISBN: 978-989-36481-2-4

doenças sensíveis a fatores ambientais, ampliando seu escopo como plataforma de apoio à decisão em saúde pública.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fornecimento da bolsa PIBIC para o primeiro autor; à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pelo fornecimento da bolsa PICI para o segundo autor e ao Edital PROPPG 34/2025 – UFERSA pelo apoio financeiro.

Referências Bibliográfica

[1] T. N. Lima-Camara, "Emerging arboviruses and public health challenges in Brazil", Rev Saude Publica, 50. June 2016. DOI: 10.1590/S1518-8787.2016050006791.

[2] N. S. Nilson, "Principles of Artificial Inteligence", Springer Verlag, Berlin, 1982

[3] M. J. S. Azevedo, J. P. P. Frutuoso, A. F. Castro, A. G. Oliveira e P. G. G. Queiroz, "Comparação entre algoritmos de Machine Learning na predição de casos de Dengue," 57º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO), Gramado, RS, 2025. Disponível em: https://proceedings.science/sbpo/sbpo-2025/trabalhos/comparacao-entre-algoritmos-de-machine-learning-na-predicao-de-casos-de-dengue?lang=pt-br. Acesso em: 25 fev. 2026.

[4] S. L. A. Mota, M. C. J. Rabelo, K. C. Pimenta, L. S. Fonseca, S. C. Ferreira e V. E. F. Silva, "Arboviroses no Brasil: desafios para a saúde pública e o papel crucial do saneamento básico". ARACÊ , [S. l.], v. 6, n. 4, p. 11997–12010, 2024. DOI: 10.56238/arev6n4-066. Disponível em: https://periodicos.newsciencepubl.com/arace/article/view/1980. Acesso em: 15 jan. 2026.

[5] A. C. C. Felício, C. E. M. Rego, E. R. O. Magalhães, R. R. Silva, V. Ribeiro e J. T. Arruda. 2019. Fatores que contribuem para o aumento da incidência da dengue na atualidade. In: Suplemento 3 - ANAIS I CAMEG / ANAIS I CAMEG

[6] IBGE. 2026.. Disponível em: Mossoró (RN) | Cidades e Estados | IBGE. Acesso em: 23 fev. 2026

[7] G. F. F. Vieira, A. F. de Castro and A. G. de Oliveira, "Analysis of dengue data, in the municipality of Mossoró, Northeast Brazil, between the years 2015 and 2020, using Python language," 2023, 18th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), Aveiro, Portugal, 2023, pp. 1-7, doi: 10.23919/CISTI58278.2023.10211686.

[8] Portal da Prefeitura Municipal de Mossoró, "Mossoró divulga primeiro Levantamento Rápido de Índices para *Aedes Aegypti* do ano", 2024, Disponível em: https://prefeiturademossoro.com.br/noticias/mossoro-divulga-primeiro-levantamento-rapido-de-indices-para-aedes-aegypti-do-ano/12097#:~:text=O%20Centro%20de%20Controle%20de%20Zoonoses%20(CCZ),CCZ%2C%20a%20incid%C3%AAncia%20de%20chuvas%20na%20regi%C3%A3o. Acesso em: 15 Jan. 2026.

[9] SESAP, "Boletim Epidemiológico Arboviroses – Arboviroses Urbanas e Terrestres". 2024. Disponível em: http://www.adcon.rn.gov.br/ACERVO/sesap/DOC/DOC000000000345112.PDF. Acesso em: 15 Jan. 2026.

[10] Coordenadoria Geral de Vigilância em Saúde, "Sistemas de Informação – Gripe", 2025. Disponível em: https://vigilancia.saude.rr.gov.br/pagina-sistemas-gripe/. Acesso em: 15 Jan. 2026.

[11] FIOCRUZ, "InfoDengue – Análise Integrada de dados epidemiológicos e climáticos", 2025. Disponível em: https://info.dengue.mat.br/. Acesso em: 15 Jan. 2026.

[12] SINAN, "Sistema de Informação de Agravos de Notificação", 2016. Disponível em: https://portalsinan.saude.gov.br/sinan. Acesso em: 15 Jan. 2026.

[13] Brasil. Ministério da Saúde, "Painel de Monitoramento de Arboviroses," 2025. Disponível em: https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/saude-de-a-a-z/a/aedes-aegypti/monitoramento-das-arboviroses. Acesso em: 25 fev. 2026.

[14] Rio Grande do Sul. Secretaria da Saúde, "Painel de casos de dengue no Rio Grande do Sul," 2025. Disponível em: https://dengue.saude.rs.gov.br/. Acesso em: 25 fev. 2026.

[15] A. I. Martins et al., "European Portuguese validation of the System Usability Scale (SUS)," *Procedia Computer Science*, vol. 67, pp. 293-300, 2015.

[16] F. D. Davis, "Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology," *MIS Quarterly*, vol. 13, no. 3, pp. 319-340, 1989. DOI: 10.2307/249008. Acesso em: 25 fev. 2026.

[17] C. Brod, "Scrum. Guia Prático Para Projetos Ágeis", Editora Novatec. 2013

Reconceptualizando la madurez digital

Un enfoque centrado en la confianza para una transformación sostenible

Reconceptualizing Digital Maturity

A Trust-Centered Approach to Sustainable Digital Transformation

Ivan Alexis Ontibon Rojas
Facultad de Ingenieria
Universidad de la Salle
Bogotá, Colombia
iontibon85@unisalle.edu.co

Resumen — **La madurez digital se ha utilizado como marco para evaluar el progreso organizacional en contextos de transformación tecnológica. Sin embargo, en el mundo corporativo y en gran parte de la literatura se privilegian enfoques tecnocéntricos que asocian el desarrollo institucional con el grado de adopción de tecnologías, relegando a un segundo plano las condiciones estructurales necesarias para sostener las organizaciones y los procesos en el tiempo. Esta investigación aborda esta brecha mediante una revisión sistemática de la literatura orientada a identificar tensiones conceptuales y vacíos teóricos en los modelos predominantes de madurez digital.**

A partir de los hallazgos, se propone una reconceptualización de la madurez digital desde una perspectiva centrada en la confianza, definida como la capacidad organizacional para sostener la transformación digital mediante la inclusión de prácticas estructurales de seguridad como habilitadores para la resiliencia y legitimidad. El estudio desarrolla un modelo teórico en el que la madurez se comprende como un estado organizacional emergente como consecuencia de la interacción entre seguridad estructural, confianza institucional, resiliencia organizacional y legitimidad digital.

Esta propuesta amplía el marco conceptual del campo al desplazar el enfoque predominante, identificado en la revisión, que asocia la madurez digital principalmente con el nivel de adopción tecnológica. El análisis de los 35 documentos seleccionados evidenció tres patrones recurrentes: (i) una orientación tecnocéntrica que prioriza infraestructura, automatización y gestión de datos como indicadores centrales de madurez; (ii) el tratamiento de la seguridad como una dimensión operativa o etapa avanzada, más que como una condición estructural del desarrollo organizacional; y (iii) una limitada articulación entre transformación digital, confianza institucional y resiliencia organizacional.

Estos hallazgos revelan un vacío conceptual en torno al papel fundacional de la seguridad en la configuración de la madurez digital. En consecuencia, la reconceptualización propuesta contribuye a avanzar la comprensión teórica del fenómeno al integrar seguridad estructural, confianza institucional y legitimidad como capacidades interdependientes que sustentan la sostenibilidad de la transformación digital. Asimismo, ofrece una base analítica para futuras investigaciones orientadas a examinar empíricamente la relación entre confianza, seguridad y desempeño organizacional en entornos altamente digitalizados.

Palabras Clave - Transformación Digital; Madurez Digital; Confianza, Seguridad por Diseño; Organizaciones Resilientes, Gobierno Digital

Abstract **—Digital maturity has been widely used as a framework to assess organizational progress in contexts of technological transformation. However, both corporate practice and a significant portion of the literature tend to privilege technocentric approaches that associate institutional development with the degree of technology adoption, relegating the structural conditions required to sustain organizations and their processes over time to a secondary role. This study addresses this gap through a systematic literature review aimed at identifying conceptual tensions and theoretical voids within prevailing digital maturity models.**

Based on the findings, a reconceptualization of digital maturity is proposed from a trust-centered perspective, defined as the organizational capacity to sustain digital transformation through the integration of structural security practices as enablers of resilience and legitimacy. The study develops a theoretical model in which maturity is understood as an emergent organizational state resulting from the interaction between structural security, institutional trust, organizational resilience, and digital legitimacy.

This proposal expands the conceptual framework of the field by challenging the dominant view identified in the review that primarily associates digital maturity with levels of technology adoption. The analysis of the 35 selected documents revealed three recurrent patterns: (i) a technocentric orientation prioritizing infrastructure, automation, and data management as central indicators of maturity; (ii) the treatment of security as an operational dimension or advanced stage rather than as a structural condition of organizational development; and (iii) limited articulation between digital transformation, institutional trust, and organizational resilience.

These findings reveal a conceptual gap regarding the foundational role of security in shaping digital maturity. Consequently, the proposed reconceptualization advances the theoretical understanding of the phenomenon by integrating structural security, institutional trust, and legitimacy as interdependent capacities underpinning sustainable digital transformation. Furthermore, it provides an analytical foundation for future research aimed at empirically examining the relationship between trust, security, and organizational performance in highly digitalized environments.

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

ISBN: 978-989-36481-2-4

Palabras Clave - Digital transformation, Digital maturity, Trust, Security by design, Organizational Resilience, Digital Governance.

I. Introducción

La transformación digital se ha consolidado como un imperativo estratégico para las organizaciones contemporáneas [1], [2], particularmente en el sector público, en la cual la digitalización es asociada con un incremento en el nivel de eficiencia, transparencia y generación de valor público. En este contexto, los modelos de madurez digital han emergido como marcos de análisis clave para evaluar las capacidades institucionales y orientar procesos de cambio organizacional [3], [4]. Estos modelos han privilegiado dimensiones como infraestructura tecnológica, gestión de datos y optimización de procesos, asumiendo que la adopción tecnológica progresiva se traduce automáticamente en mayor desarrollo organizacional.

Sin embargo, esta premisa resulta cada vez más problemática. El aumento exponencial de ciberataques, la proliferación de riesgos asociados a la inteligencia artificial y la creciente dependencia de ecosistemas digitales han puesto en evidencia una tensión estructural en la literatura sobre la madurez digital, ya que durante los últimos años, organizaciones altamente digitalizadas han sido vulneradas, como lo han demostrado numerosos ataques a entidades gubernamentales de alto nivel y empresas privadas que disponen de presupuestos elevados para su ciberseguridad. Esta paradoja sugiere que la digitalización, por sí sola, no constituye un indicador suficiente de madurez institucional, surgiendo el interrogante ¿puede una organización considerarse digitalmente madura si es estructuralmente vulnerable?

A pesar de la amplia difusión de modelos de evaluación [5], [6], [7], [8]online public appeals—particularly those related to health care—have emerged as a crucial channel through which citizens articulate their needs and concerns. Objective This study aims to investigate the thematic structure, emotional tone, and underlying logic of governmental responses related to public medical appeals in China. Methods We collected messages posted on the "Message Board for Leaders" hosted by People's Daily Online between January 2022 and November 2023 to identify valid medical appeals for analysis. (1, la seguridad de la información ha sido tratada predominantemente como una capacidad operativa o un requisito técnico, más que como un elemento constitutivo de la madurez organizacional [4], [9], [10]. Esta limitación revela explícitamente un vacío conceptual relevante en la literatura, sobre la existencia de un marco que articule la madurez digital con la capacidad de las organizaciones para institucionalizar prácticas de seguridad desde el diseño de sus procesos y/o servicios.

En consecuencia, persiste una brecha conceptual respecto al papel estructural de la seguridad en la configuración de la madurez digital. La literatura carece de un marco integrador que explique cómo la institucionalización de prácticas de seguridad por diseño sustenta la confianza, la resiliencia y la legitimidad organizacional en contextos de transformación digital. Superar esta brecha permite ampliar la comprensión teórica del fenómeno y replantear los criterios mediante los cuales se evalúa el desarrollo digital institucional.

Este artículo parte de una premisa vista desde el enfoque en el cual una organización no puede considerarse digitalmente madura si no es estructuralmente segura. Desde esta perspectiva, la seguridad por diseño deja de ser un mecanismo de protección para convertirse en una condición habilitadora de la confianza organizacional [4], [9], [10] y la sostenibilidad de la transformación digital [11], [12]. Sobre esta base, el estudio desafía los enfoques tradicionales y propone una reconceptualización de la madurez digital desde una lógica centrada en la confianza institucional.

Así, al abordar este vacío conceptual, la contribución de este trabajo es doble. En primer lugar, introduce el concepto de madurez digital centrada en la confianza, posicionando la seguridad por diseño como un determinante estructural y no complementario de la madurez organizacional. En segundo lugar, desarrolla un instrumento analítico que integra gobernanza digital, resiliencia institucional y adopción tecnológica responsable, ampliando el marco teórico desde el cual se ha estudiado la transformación digital en entornos organizacionales complejos.

Con el propósito de abordar el vacío conceptual identificado y avanzar en la comprensión teórica de la madurez digital, este estudio se orienta a responder las siguientes preguntas de investigación:

RQ1: ¿Qué papel desempeña la seguridad por diseño como determinante estructural en la configuración de la madurez digital organizacional?

RQ2: ¿En qué medida la incorporación estructural de la seguridad contribuye a la construcción de confianza, resiliencia y legitimidad en los procesos de transformación digital?

Para darle respuesta a estas preguntas, se llevó a cabo una revisión sistemática de la literatura basada en los lineamientos PRISMA, con el propósito de identificar tendencias, brechas y convergencias en los modelos de transformación digital. Los hallazgos permitieron evidenciar la necesidad de avanzar hacia enfoques que superen las visiones y reconozcan la seguridad como un componente fundacional de la madurez institucional.

II. Marco Conceptual

A. Modelos de madurez digital

En la actualidad, la transformación digital se ha convertido en un fenómeno que impacta de manera significativa las dinámicas sociales, económicas y políticas a nivel global impulsando el crecimiento, reestructurando los modelos de negocio, aportando a la creación de valor para los clientes, contribuyendo a la sostenibilidad.

Su alcance es posible observarlo en la modernización de procesos y tecnologías en las organizaciones, además, es notoria la capacidad con la que cuentan los gobiernos que adoptan nuevas tecnologías para responder a los desafíos que se presentan mejorando la eficiencia, transparencia y sostenibilidad, algunos ejemplos de esto se pueden ver reflejados en la automatización de trámites tributarios, plataformas de datos abiertos e inteligencia artificial (IA) en operaciones estadísticas entre otros casos.

En este sentido, las organizaciones enfrentan varios retos entre ellos alinear sus estrategias de Transformación Digital (TD) con estándares internacionales para promover la confianza digital por medio de la seguridad de la información como la es-

ISBN: 978-989-36481-2-4

tructura por diseño para la innovación tecnológica responsable [2], [1], [13], [14], [15].

La digitalización, por tanto, trasciende de solo la adopción tecnológica y se configura como una estrategia de gobernanza, en la cual proteger los datos, impulsaría la resiliencia organizacional y garantizar el uso ético de tecnologías se constituyen como ejes fundamentales para garantizar el desarrollo sostenible y la legitimidad institucional [3], [4].

Sin embargo, el proceso de transformación digital no está exento de tensiones y brechas estructurales, informes recientes evidencian que los niveles de madurez digital en gobiernos latinoamericanos presentan limitaciones en términos de integración de marcos de ciberseguridad, talento especializado y confianza ciudadana [16], [17], [18], [19]. Además, se suma la irrupción de la inteligencia artificial generativa, que, pese a que ofrece oportunidades para mejorar la eficiencia administrativa, plantea desafíos asociados a la ética, transparencia, seguridad de la información y protección de datos [20], [21], [22].

Estas tensiones obligan a repensar la manera en que los modelos de gobernanza digital incorporan la seguridad de la información en sus procesos de Transformación Digital, como elemento estructural que parte de su estrategia y no únicamente como defensa, bajo el principio de security as strucutre [23], [24]data-driven decision-making, and system integration. This paper presents a systematic and comprehensive survey of ICS security, integrating design principles, risk models, threat taxonomies, and mitigation strategies. Using a Structured Literature Review (SLR

B. Seguridad por diseño

La integración de la seguridad de la información y la inteligencia artificial generativa en la transformación digital demanda un enfoque multidisciplinar que articule marcos normativos, capacidades técnicas y prácticas organizacionales.

Este enfoque debe permitir reducir las vulnerabilidades asociadas al cibercrimen y la manipulación de información, factores que han crecido exponencialmente [25], [26], [27], además, de fortalecer la confianza de los ciudadanos en las instituciones, asegurando que la innovación tecnológica esté guiada por valores éticos, responsabilidad social y sostenibilidad [4], [28], [29], por lo que resulta indispensable identificar y analizar las metodologías existentes para la transformación digital, evaluando sus fortalezas, brechas y buenas prácticas, con el propósito de adaptar dichas experiencias al contexto corporativo y a las prioridades de gobernanza de la información.

Durante décadas, la seguridad de la información fue concebida principalmente como un mecanismo de defensa frente a amenazas externas. Bajo esta perspectiva, se priorizaban medidas técnicas aisladas cuyo objetivo central era proteger la infraestructura tecnológica de ataques cibernéticos. No obstante, en el marco de la transformación digital actual, esta visión reactiva resulta insuficiente.

La seguridad debe asumirse como un eje estratégico que habilita la confianza digital en las instituciones [18], [30]. Este cambio de paradigma relacionado a la seguridad como estructura, integra la Seguridad de la Información desde las etapas iniciales del diseño de procesos, servicios y sistemas digitales [1], [4], [17], [23], [24]data-driven decision-making, and system integration. This paper presents a systematic and comprehensive survey of ICS security, integrating design principles, risk models, threat taxonomies, and mitigation strategies. Using a Structured Literature Review (SLR.

El enfoque de seguridad como estructura plantea la necesidad de incorporar controles, estándares y prácticas de protección de la información durante todo el ciclo de vida de la transformación digital no se evidencia una relación directa entre la madurez digital y la seguridad de la información. Esto conlleva a adoptar marcos internacionales, en búsqueda de contar con medidas de gestión de riesgos de ciberseguridad "apropiadas y proporcionales" impulsando así una adopción más proactiva de principios fundamentales con una visión futurista y resiliente [3], [15], [23], [24]"title":"The Global Risks Report 2025 (20th edition.

Es por ello, que más allá de los marcos normativos, la seguridad estructural exige comprender que las amenazas como el ransomware, la explotación de vulnerabilidades en infraestructuras críticas y la sofisticación de los ataques dirigidos a empresas privadas y al sector público van creciendo exponencialmente generando interrupciones en servicios esenciales que afectan la productividad y erosionan la confianza ciudadana y de los clientes.

Por el contrario, cuando existe un valor percibido en la protección de datos, los ciudadanos y clientes conciben a las instituciones como entidades responsables y seguras, este aspecto es fundamental para construir valor tanto para el cliente interno como para el externo, pues al fortalecer la confianza digital, se incrementa la disposición de los usuarios a adoptar servicios tecnológicos, impulsando así la transformación digital de la entidad [4], [9], [10], [21].

C. Confianza institucional / gobernanza

La confianza digital se ha convertido en un pilar estratégico que constituye la base sobre la cual los clientes adoptan servicios electrónicos y aceptan la innovación tecnológica como parte de su interacción con las empresas o con las entidades públicas. Esta relación directa entre confianza clientes y legitimidad institucional, refuerza la necesidad de que las instituciones conciban la gobernanza digital como un ejercicio de construcción de credibilidad, sostenibilidad y generación de valor [10], [15].

Es aquí donde emerge la ciber-resiliencia como un concepto central al reconocer que los ataques y las interrupciones digitales no pueden evitarse por completo, pero sí gestionarse de manera que minimicen su impacto y permitan una recuperación ágil sin perder la confianza de los clientes [16], [17]. La resiliencia digital implica que las organizaciones desarrollen capacidades para anticipar riesgos, resistir amenazas y adaptarse rápidamente a entornos de crisis. Esto requiere una combinación de medidas técnicas, planes de contingencia y una cultura organizacional que promueva la seguridad como parte de la misión institucional [4].

Algunos informes globales sobre riesgos confirman que la erosión de la confianza digital constituye una amenaza estratégica de primer orden. El Global Risks Report 2025 del WEF ubica la ciberseguridad, la desinformación y la falta de gobernanza digital efectiva entre los principales riesgos globales para la

ISBN: 978-989-36481-2-4

próxima década [15]. Esto tan solo ratifica que la confianza digital, la gobernanza colaborativa y la ciber-resiliencia no deben asumirse como dimensiones complementarias, sino como componentes estructurales de la transformación digital responsable.

Por medio de consultas realizadas sobre las metodologías para la transformación digital se observa que en la actualidad se encuentran centradas en modelos integrales que combinan dimensiones organizacionales, normativas y sociales. En este proceso, las instituciones buscan articular marcos de referencia que permitan la adopción tecnológica y al mismo tiempo la generación de valor y confianza institucional con sus partes interesadas [6], [7]. Esta transición implica reconocer que la transformación digital no es un evento puntual, es un proceso continuo de innovación, adaptación y gobernanza responsable.

Adicionalmente, la literatura resalta la importancia de incorporar principios de seguridad de la información como elemento estructural en las metodologías de transformación digital. Stefani, Costa, Gaspar, Goes, Monteiro, Petrili y Pereira (2025) proponen marcos de riesgo específicos para la digitalización, mientras que Marrucci, Mushtaq y Shah (2025) subrayan la relevancia de la ciberseguridad como elemento transversal de toda estrategia organizacional. Esta perspectiva es consistente con los lineamientos de organismos internacionales que destacan la ciber-resiliencia como condición indispensable para el éxito de los programas de digitalización [15], [17].

En síntesis, las metodologías de transformación digital en las instituciones deben evolucionar hacia modelos que equilibren la innovación tecnológica con seguridad estructural que va a generar confianza y legitimidad en los procesos demostrando una ruta ideal al contener toda una cadena de sucesos ordenados para alcanzar una madurez digital; solo así podrán adaptarse a contextos dinámicos y responder a las crecientes demandas de sus clientes y proveedores con servicios transparentes, inclusivos y sostenibles [1], [4], [15], [23], [24].

D. Hacia una reconceptualización de la madurez digital

La literatura sobre madurez digital ha evolucionado significativamente durante la última década, consolidándose como un campo clave para comprender los procesos de transformación organizacional. Sin embargo, la mayoría de los modelos existentes han privilegiado aproximaciones, que se centran en la adopción de tecnologías, la automatización de procesos y el desarrollo de capacidades analíticas. Aunque estos enfoques han permitido operacionalizar el concepto de madurez, también han tendido a subestimar el papel estructural de la seguridad en la sostenibilidad de la transformación digital.

Este estudio propone una reconceptualización de la madurez digital al posicionar la seguridad por diseño como un determinante estructural y no meramente operativo del desarrollo organizacional. Desde esta perspectiva, la madurez debe entenderse como la capacidad institucional para incorporar prácticas de seguridad que habiliten confianza, resiliencia y legitimidad en entornos altamente digitalizados desde sus inicios.

Al introducir el concepto de madurez digital centrada en la confianza, este trabajo amplía el marco teórico existente al desplazar el análisis desde una lógica predominantemente tecnológica hacia una comprensión institucional de la transformación digital. Este enfoque propone que la madurez organizacional emerge de las estructuras seguras que sostienen los procesos que son digitalizados o las tecnologías disruptivas adoptadas.

Asimismo, esta reconceptualización contribuye al cuestionar la suposición implícita de que la digitalización progresiva conduce de manera automática a estados superiores de desarrollo organizacional. Por el contrario, se plantea que la ausencia de seguridad estructural puede erosionar la confianza institucional y comprometer la legitimidad de los procesos de transformación, incluso en organizaciones tecnológicamente avanzadas.

III. Metodología

La presente investigación se desarrolló conforme a los lineamientos de PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) [31], con el objetivo de garantizar transparencia, trazabilidad y rigor en la identificación, selección y síntesis de la evidencia científica.

La revisión sistemática se orientó a analizar la producción académica relacionada con la transformación digital, la madurez digital y la integración de la seguridad de la información en contextos organizacionales, particularmente en el sector público. Más allá de un mapeo descriptivo, el estudio adoptó un enfoque analítico dirigido a identificar patrones conceptuales, brechas estructurales y tensiones teóricas en los modelos existentes.

El proceso metodológico se desarrolló siguiendo las cuatro fases definidas por PRISMA:

A. Identificación

Se realizó una búsqueda sistemática entre enero 2025 y febrero 2026 en bases de datos especializadas:

- Scopus, Web of Science, IEEE Xplore, ScienceDirect y SpringerLink.
- Complementadas con literatura técnica de organismos internacionales como ENISA, NIST, PwC, WEF y OSSTMM.

La estrategia de búsqueda se definió mediante operadores booleanos:

- (digital transformation OR digitalization OR maturity model OR public governance) AND (information security OR security by design OR cybersecurity OR AI governance).

B. Cribado

Se eliminaron registros duplicados mediante el gestor bibliográfico Zotero. Posteriormente, se realizó una selección inicial basada en título, resumen y palabras clave.

C. Elegibilidad

Los estudios fueron evaluados en texto completo aplicando criterios de inclusión y exclusión:

Criterios de inclusión:

- Publicaciones entre 2018 y 2026.

ISBN: 978-989-36481-2-4

- Idioma inglés o español.
- Artículos científicos, informes técnicos o capítulos de libro.
    - Enfoque en transformación digital, madurez digital o seguridad de la información.

Criterios de exclusión:

- Estudios sin enfoque organizacional o institucional.
- Publicaciones duplicadas.
- Documentos sin rigor académico o sin acceso al texto completo.

D. Inclusión

Se seleccionaron los estudios finales para la síntesis cualitativa, documentando el proceso mediante el diagrama PRISMA.

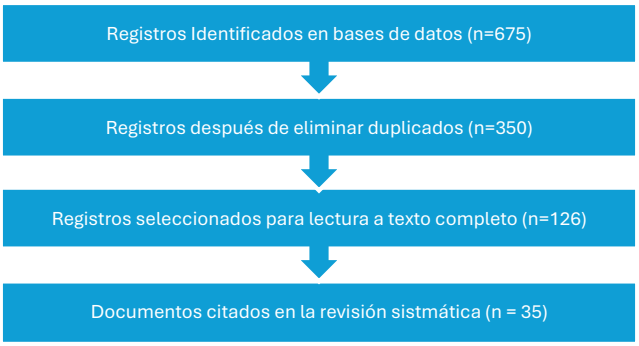


Figura 1. Diagrama PRISMA

IV. Estrategia De Análisis Conceptual

Los estudios seleccionados fueron analizados mediante un enfoque de codificación conceptual orientado a identificar patrones teóricos recurrentes en la literatura. El proceso incluyó una lectura analítica iterativa que permitió clasificar los estudios en función de las siguientes categorías:

- Enfoque de madurez digital (tecnocéntrico vs. organizacional).
- Tratamiento de la seguridad (operativo vs. estructural).
- Presencia de variables de confianza institucional.
- Integración de resiliencia organizacional.

A través de un análisis conceptual de la literatura sobre madurez digital, se identificaron tendencias, tensiones y vacíos que fundamentan la reconceptualización de este estudio. Los hallazgos se agruparon en tres categorías clave: seguridad estructural, confianza institucional y resiliencia organizacional.

A partir de esta síntesis interpretativa, se desarrolló un proceso de abstracción teórica destinado a integrar dichas categorías en un marco explicativo más amplio. Este enfoque permitió mapear el estado del conocimiento e interpretar las relaciones entre digitalización, seguridad y madurez organizacional, sentando las bases para la reconceptualización propuesta en este estudio.

V. Hallazgos conceptuales de la revisión

A. Predominio de visiones tecnocéntricas de la madurez digital

Hasta ahora la literatura muestra una orientación tecnocéntrica, en la que la madurez digital asocia principalmente el progreso organizacional con la adopción de tecnologías, automatización de procesos y desarrollo de capacidades analíticas. Esta perspectiva tiende a asumir una relación lineal entre digitalización y madurez, dejando en segundo plano factores estructurales como la seguridad y la confianza institucional.

Aun así, de los estudios analizados varios coinciden en incorporar la seguridad de la información como una dimensión relevante; sin embargo, no contienen el enfoque ideal, ya que suele conceptualizarse como una capacidad de soporte más que como un determinante estructural de la madurez organizacional. Como resultado, la seguridad en la información aparece como un objeto integrado en niveles avanzados de los modelos de madurez, en lugar de ser considerada una condición estructural generada en la fase de planeación del desarrollo digital.

Por otro lado, la literatura reciente sugiere un desplazamiento progresivo hacia reconocer la confianza institucional en entornos altamente digitalizados, la capacidad de las organizaciones para sostener procesos de transformación digital o institucional dependen de forma proporcional de su habilidad para garantizar entornos seguros, confiables y legítimos frente a su responsabilidad de proteger información y datos personales de los ciudadanos y grupos de interés.

Estos elementos evidencian la ausencia de un marco conceptual que integre y articule la digitalización, seguridad estructural y confianza institucional hacia una comprensión más amplia de la madurez organizacional. Esta fragmentación limita la capacidad explicativa de los modelos existentes y abre espacio para avanzar hacia enfoques que superen las visiones centradas solo en tecnologías.

B. Hacia una reconceptualización de la madurez digital

La madurez digital centrada en la confianza se define como la capacidad organizacional para sostener procesos de transformación digital mediante la institucionalización de prácticas estructurales de seguridad que habilitan confianza, resiliencia y legitimidad en entornos altamente digitalizados.

Los hallazgos de esta revisión evidencian la necesidad de superar las interpretaciones tecnocéntricas que han direccionado por ampliamente el estudio de la madurez digital en las organizaciones. Si bien estos enfoques han permitido comprender el papel de la adopción tecnológica en los procesos de transformación, tienden generar conceptualizaciones de relación lineal entre digitalización y desarrollo organizacional, relegando las condiciones estructurales que hacen posible el cambio en entornos altamente digitalizados.

En respuesta a lo anterior, este estudio propone una conceptualización de la madurez digital como elemento que trasciende la lógica tradicional del hardware y software en las empresas y se sitúa como pilar para el análisis las capacidades institucionales para sostener procesos de transformación digital de manera segura y confiable. Desde una perspectiva organizacional, la

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

madurez no puede reducirse al despliegue de herramientas tecnológicas o sistemas de información orientados a asegurar estabilidad operativa y gestión de riesgos, esta debe comprenderse como una condición estructural que trasciende la sofisticación tecnológica.

En este marco, se introduce el concepto de madurez digital centrada en la confianza, el cual es definido como la capacidad organizacional para sostener procesos de transformación digital mediante la institucionalización de prácticas estructurales de seguridad capaces de habilitar confianza, resiliencia y legitimidad en entornos digitalizados.

Este concepto conlleva a comprender el mundo del desarrollo digital en las organizaciones de otra manera, hasta ahora los modelos tradicionales han ubicado la seguridad como una dimensión complementaria relacionada a grandes inversiones en despliegues tecnológicos lo que es proporcional a etapas avanzadas de madurez, sin embargo, el enfoque propuesto la concibe como una condición estructural del proceso de transformación; por consiguiente, la seguridad deja de ser un mecanismo reactivo de protección para convertirse en un elemento estructural que viabiliza la continuidad, estabilidad y credibilidad de las iniciativas digitales.

Este enfoque, la madurez digital centrada en la confianza amplía el marco teórico existente al ofrecer una comprensión más integradora del fenómeno, superando las visiones tradicionales desarrolladas sobre el enfoque de las tecnologías y aporta una base conceptual para interpretar la transformación digital como un proceso que requiere innovación y estabilidad estructural. Sobre esta base, la siguiente sección desarrolla las dimensiones que operacionalizan este constructo y permiten avanzar hacia un modelo analítico coherente con la reconceptualización propuesta.

VI. Propuesta de Instrumento de Evaluación de Madurez Digital

La revisión de literatura y los informes analizados permiten identificar un conjunto de tendencias, brechas y buenas prácticas que orientan la construcción de un instrumento de evaluación de madurez digital. Los hallazgos sugieren que, aunque existe un avance en la adopción de marcos de referencia y estrategias de transformación digital, persisten vacíos en la integración de la seguridad de la información como estructura y que brinden la confianza en las partes interesadas [7], [32], [33].

De manera transversal, los estudios coinciden en que la madurez digital no puede reducirse a la implementación tecnológica, sino que debe incluir dimensiones organizacionales, normativas, sociales y culturales. Por ejemplo, Li y Lu (2025) destacan que la resiliencia digital de las ciudades inteligentes depende de la articulación entre capacidades tecnológicas y factores sociales [34], mientras que Stefani, Costa, Gaspar, Goes, Monteiro, Petrili y Pereira (2025) proponen un marco de gestión de riesgos para la transformación digital que enfatiza la seguridad como eje estratégico [4]. Estos enfoques son consistentes con las recomendaciones de ENISA (2023) y el Global Risks Report 2025 del WEF, que sitúan la ciberseguridad y la confianza digital como componentes críticos de la resiliencia institucional.

A. Modelo teórico de la madurez digital centrada en la confianza

A partir de la conceptualización propuesta y de las dimensiones identificadas, se desarrolla un modelo teórico orientado a explicar cómo la seguridad estructural, la confianza institucional, la resiliencia organizacional y la legitimidad digital interactúan para configurar estados avanzados de madurez digital.

En esta lógica, la seguridad estructural opera como el fundamento del modelo, al proporcionar las condiciones necesarias para gestionar el riesgo y reducir la incertidumbre en entornos altamente digitalizados. Sobre esta base, emerge la confianza institucional como un mecanismo que estabiliza las relaciones organizacionales y favorece la adopción de iniciativas digitales.

B. Dimensiones de la madurez digital centrada en la confianza

La reconceptualización propuesta sugiere que la madurez digital centrada en la confianza se configura a partir de un conjunto de capacidades organizacionales que dependen y trascienden a la adopción tecnológica que reflejan condiciones estructurales que permiten sostener procesos de transformación digital de forma estable, segura y legítima. Este marco se conforma de un constructo el cual se articula en torno a cuatro dimensiones principales:

Tabla 1. Dimensiones de la madurez digital centrada en la confianza.

Dimensión	**Definición conceptual**	**Función dentro del modelo**	**Manifestación organizacional**
Seguridad estructural	Capacidad organizacional para integrar prácticas de gestión del riesgo y protección digital como elementos constitutivos de su arquitectura institucional.	Actúa como fundamento del modelo al reducir incertidumbre y estabilizar los procesos de transformación digital.	Institucionalización de seguridad por diseño, gestión preventiva del riesgo, integración transversal de controles.
Confianza institucional	Percepción de confiabilidad generada por la organización a partir de la solidez de sus estructuras digitales y de gobernanza.	Opera como mecanismo legitimador que facilita la adopción y sostenibilidad de iniciativas digitales.	Transparencia en procesos digitales, cumplimiento normativo, consistencia en la gestión de datos y riesgos.
Resiliencia organizacional	Capacidad para anticipar, absorber y adaptarse a disrupciones derivadas de la digitalización sin comprometer continuidad ni desempeño.	Refuerza la sostenibilidad del modelo al permitir adaptación frente a escenarios de incertidumbre tecnológica.	Continuidad operativa digital, planes de contingencia, aprendizaje organizacional frente a incidentes.
Legitimidad digital	Reconocimiento social e institucional de que las prácticas tecnológicas adoptadas son apropiadas, responsables y coherentes con expectativas normativas.	Consolida la madurez como estado organizacional emergente y socialmente validado.	Alineación ética en uso de tecnologías, cumplimiento de estándares, aceptación por grupos de interés.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

C. Estructura analítica del modelo

Cada dimensión del modelo para alcanzar la madurez se concibe como un proceso evolutivo que refleja la consolidación progresiva de capacidades organizacionales las cuales se evalúan en una escala de cinco niveles, construida a partir de la adaptación del modelo Cybersecurity Capability and Maturity Level [35] y el NIST Cybersecurity Framework Core [33], complementados con los principios de mejora continua de ISO/IEC 27001:2022 y las buenas prácticas del Open Source Security Testing Methodology Manual.

La descripción detallada de los gradientes se presenta a continuación:

Tabla 2. Gradientes de nivel de capacidades en madurez digital

Dimensión	**Seguridad estructural**	**Confianza institucional**	**Resiliencia organizacional**	**Legitimidad digital**
Nivel 1 – Inicial	Controles reactivos y fragmentados; ausencia de integración sistémica de la seguridad.	Baja percepción de confiabilidad digital; limitada transparencia organizacional.	Vulnerabilidad ante incidentes digitales; respuesta predominantemente reactiva.	Cumplimiento mínimo y enfoque normativo reactivo.
Nivel 2 – Básico	Cumplimiento normativo básico con políticas incipientes.	Mecanismos formales de cumplimiento y comunicación básica con partes interesadas.	Protocolos básicos de recuperación ante interrupciones tecnológicas.	Alineación parcial con marcos regulatorios y estándares éticos.
Nivel 3 – Intermedio	Gestión formal del riesgo e integración parcial en procesos digitales.	Gestión consistente de datos y riesgos que fortalece la credibilidad institucional.	Planes de continuidad digital institucionalizados y aprendizaje organizacional sistemático.	Integración consistente entre transformación digital, normativa y responsabilidad institucional.
Nivel 4 – Avanzado	Seguridad por diseño incorporada en la planificación estratégica y tecnológica.	Confianza integrada como variable estratégica en la toma de decisiones digitales.	Gestión anticipatoria del riesgo y adaptación estratégica frente a disrupciones.	Incorporación explícita de criterios de responsabilidad digital en el diseño de servicios y tecnologías.
Nivel 5 – Transformador	Seguridad institucionalizada como principio estructural que orienta la innovación y la sostenibilidad digital.	Alta legitimidad y reconocimiento institucional sostenido en entornos digitales complejos.	Capacidad adaptativa consolidada que permite sostener la transformación digital en escenarios de alta incertidumbre.	Legitimidad digital plenamente consolidada y validada por el entorno institucional y social.

Los gradientes presentados en la tabla 2, permiten caracterizar el nivel de consolidación de las capacidades estructurales que configuran la madurez digital centrada en la confianza. Más que establecer categorías rígidas, la escala ofrece una lectura evolutiva del desarrollo organizacional, evidenciando cómo una entidad transita desde configuraciones incipientes y predominantemente reactivas hacia estados estructuralmente integrados, en los que la seguridad, la confianza, la resiliencia y la legitimidad se institucionalizan como fundamentos de la transformación digital sostenible.

D. Dinámica evolutiva de la madurez digital centrada en la confianza

La progresión de los niveles no debe entenderse como una transición puramente lineal, sino como un proceso evolutivo y dinámico en el que las organizaciones pueden exhibir distintos grados de desarrollo según la capacidad analizada. en consecuencia, la madurez organizacional se configura como un proceso no homogéneo, en el que distintas capacidades pueden desarrollarse a ritmos diferenciados.

El nivel inicial refleja organizaciones incipientes, en las cuales predominan respuestas reactivas. A medida que la organización avanza, emergen necesidades que presionan la organización a crear y mecanismos de coordinación y nuevas estructuras que permiten ascender a estructuras sistemáticas.

El punto de inflexión se produce cuando las capacidades de seguridad, gobernanza y gestión del conocimiento comienzan a institucionalizarse generando una cultura y favoreciendo las condiciones de estabilidad que permiten sostener la transformación digital.

El estadio transformador representa, así, una configuración organizacional en la que la digitalización se encuentra plenamente respaldada por capacidades estructurales capaces de generar confianza y sostener la legitimidad en el tiempo.

Más que establecer categorías rígidas, esta escala permite interpretar trayectorias de maduración organizacional, identificar brechas estructurales y orientar procesos de fortalecimiento institucional coherentes con los principios de gobernanza digital responsable.

VII. Discusión

Los resultados aquí expuestos invitan a reconsiderar los modos en los que tradicionalmente se ha interpretado la madurez digital a nivel organizacional en contextos de transformación tecnológica, lo que ha sido analizado predominantemente desde enfoques tecnocéntricos que asocian el progreso con el grado de adopción de herramientas digitales. Sin embargo, los hallazgos de este estudio sugieren que dicha relación resulta insuficiente para explicar la sostenibilidad y seguridad de los procesos de digitalización en entornos actuales caracterizados por una creciente exposición al riesgo.

La reconceptualización propuesta mueve el foco analítico desde solo el uso de la tecnología hacia las condiciones estructurales ideales que deben ser tenidas en cuenta para sostener la transformación digital a través del tiempo.

La madurez digital centrada en la confianza introduce una comprensión alternativa al situar la seguridad estructural como fundamento y no como complemento de la evolución y digitalización organizacional, es importante reconocer que la digital-

ISBN: 978-989-36481-2-4

ización per se, no garantiza estados avanzados de madurez si no se encuentra respaldada por capacidades institucionales capaces de generar confianza y preservar la legitimidad.

Desde una perspectiva teórica, este estudio contribuye a ampliar el campo de investigación sobre transformación digital al articular elementos que han sido abordados de manera fragmentada en la literatura mientras los modelos convencionales han tendido a separar la adopción tecnológica de las dinámicas de gobernanza y gestión del riesgo, el modelo propuesto sugiere que la madurez es un estado que surge de la interacción entre estas capacidades dando confianza y generando valor público.

Este planteamiento dialoga con enfoques institucionales que entienden el cambio organizacional como un proceso dependiente de estructuras que aportan estabilidad frente a escenarios de incertidumbre. Bajo esta lógica, la resiliencia organizacional y la legitimidad digital adquieren un papel central al permitir que las organizaciones avancen en su digitalización y en la generación de capacidades para sostener los procesos y el negocio en situaciones de disrupción.

A este punto se generaron dos implicaciones teóricas como resultado de este trabajo. inicialmente, se propone una lectura más integradora de la madurez digital que supera las visiones con enfoque en instrumentos y herramientas digitales lo que abre espacio para futuras investigaciones orientadas a explorar la relación entre seguridad, confianza y desempeño organizacional.

En segundo lugar, el modelo desarrollado ofrece una base conceptual que permite reinterpretar los procesos de transformación digital como fenómenos estructurales, más que como trayectorias exclusivamente tecnológicas (tecnocentrismo).

Desde el punto de vista organizacional, esta perspectiva genera un nuevo paradigma sobre la transformación digital que indica que deben ser priorizadas las capacidades estructurales antes que solo la incorporación de tecnologías emergentes, para ello es necesario que las organizaciones identifiquen en qué condiciones la digitalización puede sostenerse de manera confiable. En este sentido, la seguridad por diseño se posiciona como un principio organizador del desarrollo digital.

En conjunto, estos hallazgos invitan a avanzar hacia marcos analíticos capaces de capturar la complejidad del fenómeno, reconociendo que la madurez digital no se define únicamente por la sofisticación tecnológica alcanzada, sino por la solidez institucional que la hace posible.

VIII. Conclusiones

Este estudio partió de la necesidad de revisar como es orientada y comprendida la madurez digital en las organizaciones. Del trabajo realizado se logró evidenciar que la literatura tiende a asociar el desarrollo digital con el grado de adopción tecnológica, los resultados de esta investigación evidencian que dicha perspectiva resulta limitada para explicar la sostenibilidad de los procesos de transformación en entornos caracterizados por una creciente complejidad y exposición al riesgo.

En respuesta a esta brecha, se propuso reconceptualizar la madurez digital desde una perspectiva centrada en la confianza, entendida como la capacidad organizacional para sostener la transformación por medio de prácticas estructurales de seguridad. Este enfoque permitió desplazar el análisis desde una lógica enfocada en las herramientas hacia una comprensión más integradora, en la que la seguridad, la resiliencia y la legitimidad operan como condiciones desde el inicio del desarrollo digital.

El resultado derivado de esta reconceptualización aporta una base analítica para interpretar la madurez como un estado configurado por la interacción de capacidades estructurales que permiten trascender la implementación tecnológica. De este modo, el estudio contribuye a ampliar el marco conceptual del campo y ofrece una alternativa para comprender la transformación digital como un proceso que requiere más que tan solo innovación.

Estos hallazgos abren nuevas líneas de investigación orientadas a examinar empíricamente la relación entre confianza, seguridad estructural y desempeño organizacional, así como se insta a explorar la aplicabilidad en distintos contextos institucionales. Futuras investigaciones podrían profundizar en la validación del constructo propuesto y analizar cómo estas capacidades evolucionan frente a escenarios de disrupción tecnológica.

En este punto finalizando este trabajo se sugiere que el verdadero desafío para las organizaciones no radica en adoptar nuevas tecnologías, el verdadero reto está en construir condiciones estructurales que permitan hacer organizaciones confiables y sostenibles. Desde esta perspectiva, la madurez digital deja de ser un indicador del nivel de digitalización alcanzado para convertirse en una expresión de la solidez institucional que la hace posible.

Referencias Bibliográficas

[1] S. Liu y X. Gu, «Strategic analysis of digital transformation for manufacturers considering innovation and digital technology spillover in a competitive environment», *J. Innov. Knowl.*, vol. 13, p. 100946, may 2026, doi: 10.1016/j.jik.2026.100946.

[2] S. F. Karabag, J. Simonsson, C. Berggren, M. Andreasson, y R. Eriksson, «Digital transformation as a multi-phase process: a longitudinal study of corporate strategy and business unit adaptation», *J. Bus. Res.*, vol. 202, p. 115796, ene. 2026, doi: 10.1016/j.jbusres.2025.115796.

[3] H. Lu, T. Wu, X.-M. Yao, y C.-M. Huangfu, «How and when digital transformation intensity influences employees' safety-related helping behaviors», *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 215, p. 124092, 2025, doi: 10.1016/j.techfore.2025.124092.

[4] C. Stefani, D. Mancini, y A. Braccini, «Cybersecurity and public trust in digital governance: Challenges and opportunities», *Gov. Inf. Q.*, vol. 42, n.º 1, pp. 101-122, 2025, doi: 10.1016/j.giq.2024.101722.

[5] H. Li, Z. Liu, Z. Zhang, L. Ping, W. Gu, y Y. Yao, «Public Medical Appeals and Government Online Responses: Big Data Analysis Based on Chinese Digital Governance Platforms», *J. Med. Internet Res.*, vol. 27, 2025, doi: https://doi.org/10.2196/70087.

[6] L. Marrucci, R. Mushtaq, y S. Shah, «Effective methodologies for digital transformation in the government sector: A systematic literature review», *Inf. Syst. Front.*, 2025, doi: 10.1007/s10796-025-10444-2.

[7] M. Tsakalerou, «Assessing digital transformation maturity: DESI adaptation in the public sector», *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 205, p. 122456, 2025, doi: 10.1016/j.techfore.2025.122456.

[8] T. Aljowder, M. Ali, y S. Kurnia, «Development of a Maturity Model for Assessing Smart Cities: A Focus Area Maturity Model», *Smart Cities*, vol. 6, n.º 4, pp. 2150-2175, 2023, doi: 10.3390/smartcities6040099.

[9] IEEE, «Requirements for trustworthy AI-enabled automated decision-making», *IEEE Secur. Priv.*, vol. 23, n.º 2, pp. 10-19, 2025, doi: 10.1109/MSEC.2025.1045678.

[10] S. J. Daly, A. Wiewiora, y G. Hearn, «Shifting attitudes and trust in AI: Influences on organizational AI adoption», *Technol. Forecast. Soc. Change*,

vol. 215, p. 124108, 2025, doi: 10.1016/j.techfore.2025.124108.
[11] L. S. Aichroth y R. Kempen, «Social sustainability and digital transformation - two birds with one stone? A concept paper for a mixed methods research design», presentado en Procedia Computer Science, 2024, pp. 362-370. doi: 10.1016/j.procs.2024.09.415.
[12] M. Alojail y S. B. Khan, «Impact of Digital Transformation toward Sustainable Development», *Sustain. Switz.*, vol. 15, n.º 20, 2023, doi: 10.3390/su152014697.
[13] A. Marrucci, R. Rialti, y M. Balzano, «Exploring paths underlying Industry 4.0 implementation in manufacturing SMEs: a fuzzy-set qualitative comparative analysis», *Management Decision*, vol. 63, n.º 6. pp. 1936-1959, 2025. doi: 10.1108/MD-05-2022-0644.
[14] PwC, «Global Digital Trust Insights 2025: ¿Cómo reducir las brechas para lograr la ciberresiliencia?», PricewaterhouseCoopers, 2025.
[15] World Economic Forum, «The Global Risks Report 2025 (20th edition)», WEF, Ginebra, 2025.
[16] Fortinet, «Informe sobre el estado de la tecnología operativa y la ciberseguridad 2024», Fortinet Research, 2024.
[17] European Union Agency for Cybersecurity (ENISA), «ENISA Threat Landscape 2023: July 2022 to June 2023», ENISA, 2023. doi: 10.2824/128458.
[18] Cámara Colombiana de Informática y Telecomunicaciones, «Estudio anual de ciberseguridad en Colombia», CCIT, Bogotá, 2023.
[19] Cámara Colombiana de Informática y Telecomunicaciones CCIT, «Tendencias Cibercrimen 2021 - 2022», 2021, Accedido: 26 de febrero de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.ccit.org.co/estudios/tendencias-del-cibercrimen-2021-2022-nuevas-amenazas-al-comercio-electronico/
[20] G. Silva-Atencio, «The challenges and opportunities for ethics in generative artificial intelligence in the digital age», *DYNA Colomb.*, vol. 92, n.º 236, pp. 26-35, 2025, doi: 10.15446/dyna.v92n236.117144.
[21] H. M. U. Khizar, A. Ashraf, J. Yuan, y M. Al-Waqfi, «Insights into ChatGPT adoption (or resistance) in research practices: The behavioral reasoning perspective», *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 215, p. 124047, 2025, doi: 10.1016/j.techfore.2025.124047.
[22] Z. Engin, E. Gardner, A. Hyde, S. Verhulst, y J. Crowcroft, «Unleashing collective intelligence for public decision-making: the Data for Policy community», *Data Policy*, vol. 6, 2024, doi: 10.1017/dap.2024.2.
[23] A. Saini, K. Krishan, y M. S. Gaur, «Analyzing ICS security: A survey of design principles, risks, threats, and mitigation methods», *Comput. Electr. Eng.*, vol. 132, p. 110967, abr. 2026, doi: 10.1016/j.compeleceng.2026.110967.
[24] F. Teichmann, «Cybersecurity risks in mining's operational technology: Implications of OT vulnerabilities and EU NIS2 compliance», *Extr. Ind. Soc.*, vol. 25, p. 101774, mar. 2026, doi: 10.1016/j.exis.2025.101774.
[25] S. R. Matthijsse, M. S. van't Hoff-de Goede, y E. R. Leukfeldt, «To report or not to report: Exploring the motivations and factors associated with reporting of ransomware victimisation among entrepreneurs», *J. Crim. Justice*, vol. 97, p. 102378, mar. 2025, doi: 10.1016/j.jcrimjus.2025.102378.
[26] S. Mushtaq y M. Shah, «Mitigating Cybercrimes in E-Government Services: A Systematic Review and Bibliometric Analysis», *Digital*, vol. 5, n.º 1, 2025, doi: 10.3390/digital5010003.
[27] Y. C. Tok, «A Smart City Infrastructure ontology for threats, cybercrime, and digital forensic investigation», *Forensic Sci. Int. Digit. Investig.*, vol. 52, p. 301883, 2025, doi: 10.1016/j.fsidi.2025.301883.
[28] J. Squalli, «Environmental altruism, egoism, or hypocrisy? Environmental awareness, emissions, and electric and hybrid vehicle adoptions», *Sustain. Futur.*, vol. 9, p. 100517, 2025, doi: 10.1016/j.sftr.2025.100517.
[29] A. Tiron-Tudor, A. Labaditis (Cordos), y D. Deliu, «Future-ready digital skills in the AI era: Bridging market demands and student expectations in the accounting profession», *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 215, p. 124105, 2025, doi: 10.1016/j.techfore.2025.124105.
[30] P. Colombia, «Global Digital Trust Insights 2024: Tendencias de la ciberseguridad en Colombia. Poniendo la seguridad en el centro de la innovación», PricewaterhouseCoopers, 2024.
[31] M. J. Page *et al.*, «PRISMA 2020 explanation and elaboration: updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews», *BMJ*, vol. 372, p. n160, 2021, doi: 10.1136/bmj.n160.
[32] P. Colombia, «CEO Survey 2025: 28° Encuesta global anual de presidentes», PricewaterhouseCoopers, 2025.
[33] NIST, «National Cyber Security Index», 2022, Accedido: 7 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: https://ncsi.ega.ee/
[34] R. Li y Y. Lu, «Toward a resilient and smart city: Analysis on enablers for smart city resilience using an integrated DEMA^{TEL}–ISM–ANP method», *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 215, p. 124081, 2025, doi: 10.1016/j.techfore.2025.124081.
[35] J. Boutemeur, I. Bakatsis, I. Lella, A. Malatras, R. Gavrila, y S. De Crescenzo, «ENISA Cybersecurity Threat Landscape Methodology», European Union Agency for Cybersecurity (ENISA), ago. 2025. doi: 10.2824/1888892.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Evaluación de la Arquitectura de un Sistema Recomendador Basado en Ontologías para Objetos de Aprendizaje en Carreras de Ingeniería

Evaluation of the Architecture of an Ontology-Based Recommender System for Learning Objects in Engineering Courses

Valeria Bertossi and Milagros Gutiérrez
Universidad Tecnológica Nacional –
Facultad Regional Santa Fe
Santa Fe, Agentina
Email: {milagrosgutierrez, valeriabertossi}@gmail.com

Lucila Romero
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Universidad Nacional del Litoral
Santa Fe, Argentina
Email: lucila.rb@gmail.com

***Resumen* — La creciente adopción de la formación basada en competencias en los programas de carreras de ingeniería, exige recursos de aprendizaje digitales de alta calidad, alineados con resultados de aprendizaje bien definidos. Un sistema recomendador basado en ontologías brinda soporte a los profesores en el desarrollo de Objetos de Aprendizaje (OA), integrando conocimiento pedagógico y tecnológico.**

Este artículo presenta una primera aproximación a la evaluación del diseño arquitectónico del sistema recomendador. Para ello, se ha utilizado el Método ATAM (Análisis Trade off Architecture Method). La arquitectura aplica un patrón en capas que modulariza para simplificar el abordajede un sistema complejo. La arquitectura tiene las siguientes capas: una capa de conocimiento compuesta por ontologías, una capa de recomendación estructurada como un agente inteligente con módulos de percepción, inferencia y crítica, y una capa de interfaz responsable de la interacción del sistema con herramientas de autor externas y documentos de gestión académica.

La evaluación basada en ATAM constituye un proceso en etapas y fases en el que se identifican stakeholders que colaboran con el equipo de evaluación centrándose en atributos de calidad como la modificabilidad, la interoperabilidad y la mantenibilidad, identificando los puntos sensibles y las compensaciones derivadas del uso de modelos ontológicos y mecanismos de inferencia basados en reglas.

A partir de esta primera iteración en la evolución, se presentan diversas vías de evolución de la arquitectura hacia capacidades inteligentes mejoradas y componentes de recomendación escalables. Este trabajo representa el primer paso en un proceso iterativo de validación destinado a fortalecer la robustez arquitectónica de los sistemas de enseñanza inteligentes.

Palabras **clave – diseño arquitectónico, evaluación, validación, objetos de aprendizaje, ontologías, sistema recomendador.**

Abstract — **The The increasing adoption of competency-based training in engineering degree programs demands high-quality digital learning resources aligned with well-defined learning outcomes. An ontology-based recommendation system supports professors in developing Learning Objects (LOs), integrating pedagogical and technological knowledge.**

This article presents a first approach to evaluating the architectural design of the recommendation system. For this purpose, the ATAM (Analysis Trade-off Architecture Method) was used. The architecture applies a layered pattern that modularizes to simplify the approach to a complex system. The architecture has the following layers: a knowledge layer composed of ontologies, a recommendation layer structured as an intelligent agent with perception, inference, and critique modules, and an interface layer responsible for the system's interaction with external authoring tools and academic management documents.

The ATAM-based evaluation is a phased process that involves identifying stakeholders who collaborate with the evaluation team, focusing on quality attributes such as modifiability, interoperability, and maintainability. It also identifies sensitive issues and tradeoffs arising from the use of ontological models and rule-based inference mechanisms.

From this initial iteration, various pathways for architectural evolution toward enhanced intelligent capabilities and scalable recommendation components are presented. This work represents the first step in an iterative validation process aimed at strengthening the architectural robustness of intelligent teaching systems.

Keywords – architectural design, evaluation, validation, learning objects, ontologies, recommender system.

I Introducción

La adopción del Enfoque Basado en Competencias en las carreras de Ingeniería ha transformado significativamente el diseño curricular y las prácticas de enseñanza. Los resultados de aprendizaje se definen de manera explícita y se alinean con competencias profesionales, lo que exige recursos educativos digitales que garanticen coherencia pedagógica, alineación con-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

structiva e interoperabilidad tecnológica. En este contexto, los Objetos de Aprendizaje (OA) adquieren un rol central como recursos modulares y reutilizables que integran principios de diseño instruccional con estándares de metadatos, tales como IEEE Learning Object Metadata (LOM) [4].

No obstante, el desarrollo de OA de calidad requiere la articulación de conocimientos disciplinar, pedagógicos y tecnológicos especializados. Si bien los docentes de Ingeniería poseen un alto dominio disciplinar, no siempre cuentan con formación específica en diseño instruccional, en el uso de estándares de metadatos educativos y en recursos pedagógicos que ayudan a alcanzar mejor las competencias planteadas. Esta situación genera una brecha entre los requerimientos del modelo educativo basado en competencias y las prácticas efectivas en el aula con la utilización de recursos educativos digitales adecuados.

Con el objetivo de abordar esta problemática, se propuso anteriormente un sistema recomendador, que asiste a los docentes en el proceso de desarrollo de Objetos de Aprendizaje y cuya base de conocimiento es una red de ontologías. La arquitectura de este sistema complejo es un modelo en capas para garantizar, entre otros atributos de calidad, la modularidad. Una de las capas de esta arquitectura está formada por la red de ontologías que formalizan conocimiento pedagógico en contextos académicos basados en competencias, estructuras conceptuales disciplinares y esquemas de metadatos LOM. Una segunda capa por sobre la entarior, corresponde al agente recomendador basado en reglas que implementa el ciclo de percepción – acción, con el objetivo de orientar a los docentes y proponer mejoras durante el proceso de diseño de los objetos de aprendizajes. La última capa que está más arriba corresponde a la interfaz con el usuario.

Si bien la arquitectura fue conceptualizada con fundamentos teóricos sólidos y cuenta con un nivel de implementación avanzado, aún no ha sido sometida a una evaluación arquitectónica sistemática. Considerando la creciente demanda de sistemas de aprendizaje inteligentes y la posibilidad de que estos evolucionen hacia enfoques que integren técnicas de aprendizaje automático, procesamiento de lenguaje natural y ontologías, resulta necesario analizar formalmente los atributos de calidad de la arquitectura y los posibles compromisos (trade-offs) derivados de sus decisiones de diseño.

En este trabajo se presenta una evaluación inicial de la arquitectura utilizando el método Architecture Tradeoff Analysis Method (ATAM). El objetivo es identificar puntos de sensibilidad, riesgos y compromisos asociados principalmente a atributos como la modificabilidad, la interoperabilidad, la mantenibilidad y la escalabilidad. A partir de los resultados obtenidos, se identifican posibles líneas de evolución arquitectónica orientadas a fortalecer las capacidades del sistema, preservando al mismo tiempo las ventajas del diseño arquitectónico en capas. Este trabajo constituye el primer paso de un proceso iterativo de validación y refinamiento de una arquitectura para un sistema recomendador para entornos educativos de carreras de Ingeniería.

II. Antecedentes

A. *Arquitecturas de software*

Un diseño arquitectónico de software representa la estructura de un sistema, incluyendo sus componentes, las relaciones e interfaces entre esos componentes y los principios que gobiernan su diseño y evolución [1]. La arquitectura impacta directamente en los atributos de calidad del sistema, por lo que su diseño es fundamental para la vida útil del mismo. Un diseño arquitectónico mal resuelto puede llevar al fracaso del proyecto de software [1], [2]. En consecuencia, el diseño arquitectónico establece las bases estructurales para satisfacer requerimientos no funcionales y atributos de calidad.

Para el sistema recomendador que es objeto de este trabajo, en el que el objetivo es realizar sugerencias sobre el diseño y desarrollo de material de enseñanza con su implementación en OA, la modificabilidad es una de las características más importantes que se debe tener en cuenta para el diseño de la arquitectura. Esto se debe existen numerosas modificaciones curriculares y de planes de estudio, se realiza actualización de metodologías pedagógicas y se incorporan permanentemente herramientas tecnológicas para la enseñanza que exigen adaptaciones frecuentes [3]. Asimismo, la interoperabilidad resulta crítica dado que se utilizan estándares de metadatos para describir OA y, al mismo tiempo, se requiere integración de las bases de conocimiento con herramientas externas o plataformas de enseñanza institucionales [4]. La mantenibilidad y la escalabilidad también son importantes dado que el sistema debe evolucionar incorporando nuevas funcionalidades, por ejemplo nuevos requerimientos docentes o de Secretaría Académica, a la vez que incrementa y alimenta su base de conocimiento.

Por su parte, el patrón arquitectónico en capas utilizado para el diseño del sistema recomendador organiza el sistema en niveles con responsabilidades claramente diferenciadas, donde cada capa ofrece servicios a la capa superior y utiliza los servicios de la capa inferior [5]. Este diseño promueve la el desacoplamiento y la modularización, por lo que facilita presentar la solución de un problema complejo mediante el abordaje de problemas más simples. Entre sus principales ventajas se encuentran la facilidad en el mantenimiento y la modificabilidad, dado que los cambios pueden localizarse en una capa específica sin afectar necesariamente al resto de las capas [1], [5]. Asimismo, este patrón facilita la reutilización de componentes.

Igualmente, el modelo en capas puede introducir limitaciones cuando se requiere alta flexibilidad o integración con sistemas distribuidos [6]. En escenarios como el del sistema recomendador, donde se presentan mecanismos de inferencia complejos y bases de conocimiento y ontologías articuladas, la rigidez estructural del modelo en capas puede generar tensiones arquitectónicas que deben ser analizadas cuidadosamente.

B. *Evaluación de la arquitectura*

La evaluación de una arquitectura de software en etapas tempranas del desarrollo del software permite identificar riesgos antes de que el sistema evolucione dado que en etapas más avanzadas los probelas o errores son mucho más costosos de modificar o solucionar [2]. Entre los métodos propuestos en la literatura, el Architecture Tradeoff Analysis Method (ATAM) se destaca por su enfoque sistemático para analizar cómo las decisiones en el diseño arquitectónico impactam en los atributos de calidad [2], [10].

ATAM propone la identificación de escenarios de calidad priorizados por los stakeholders, la construcción de un árbol de utilidad (Utility Tree) y el análisis de puntos de sensibili-

ISBN: 978-989-36481-2-4

dad y compromisos (trade-offs) entre atributos [10]. El método permite revelar riesgos arquitectónicos, supuestos implícitos y áreas donde las decisiones de diseño favorecen un atributo en detrimento de otro. En el contexto de la arquitectura del sistema recomendador, ATAM es un método de evaluación adecuado dado que permite examinar la tensión entre expresividad semántica (capa de ontologías y base de conocimiento), modificabilidad e integración del sistema. Por este motivo, su aplicación constituye un paso clave para fundamentar la evolución arquitectónica hacia, por ejemplo, nuevos modelos de Inteligencia Artificial.

III. Arquitectura del sistema recomendador

La arquitectura evaluada en este trabajo fue propuesta en trabajos anteriores como soporte para el desarrollo de Objetos de Aprendizaje (OA) en el marco de carreras de Ingeniería bajo el Enfoque Basado en Competencias [11][12][13]. Su objetivo principal es asistir a los docentes en la toma de decisiones pedagógicas y tecnológicas durante el proceso de diseño de recursos educativos digitales. La arquitectura adopta un patrón en capas y se organiza en tres niveles principales: Capa de Conocimiento, Capa Recomendadora y Capa de Interfaz. Esta estructuración busca separar responsabilidades, favorecer la modularidad y facilitar la evolución del sistema (figura 1).

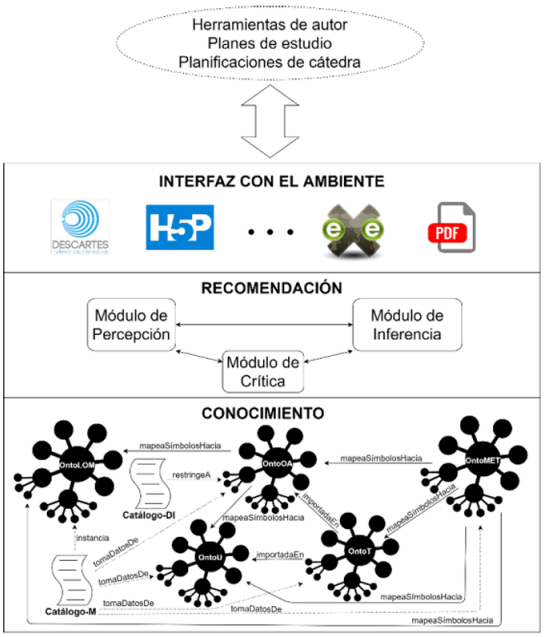


Figura 1. Arquitectura del sistema recomendador para recursos digitales en carreras de Ingeniería.

A. Capa de conocimiento

La Capa de Conocimiento constituye el núcleo semántico del sistema. Está compuesta por una red de ontologías interrelacionadas que modelan diferentes dimensiones del dominio educativo y tecnológico. Entre ellas se incluyen ontologías que conceptualizan los siguiente dominios: (i) Modelado de Objetos de Aprendizaje (OntoOA), (ii) Enseñanza basada en competencias (OntoU), (iii) Estructuras conceptuales disciplinares (OntoT), (iv) Metodologías de diseño instruccional (ontoMET), (v) Representación formal del estándar IEEE LOM (OntoLOM).

Estas ontologías fueron implementadas utilizando lenguajes formales: OWL y SWRL para reglas de inferencia, lo que permite la definición semántica de conceptos, relaciones, restricciones y reglas posibilitando, de esta manera, procesos de inferencia automática. La figura 2 muestra un extracto de las ontologías que integran la red de la capa de conocimiento.

La decisión de representar el conocimiento pedagógico y tecnológico mediante modelos ontológicos formales en lugar de estructuras relacionales tradicionales, favorece la interoperabilidad semántica y la reutilización del conocimiento, aunque introduce potenciales desafíos asociados al rendimiento y la escalabilidad del proceso de inferencia.

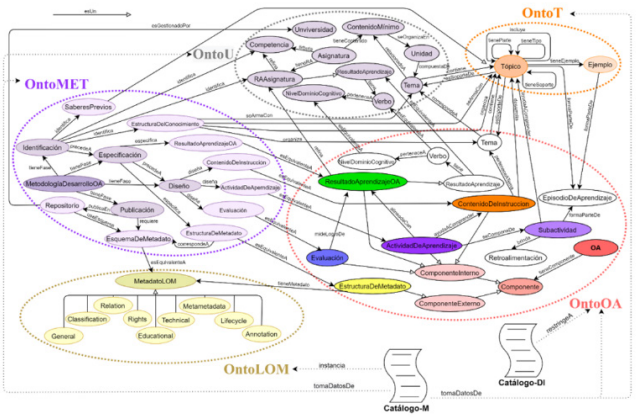


Figura 2. Extracto de las ontologías que integran la red de la capa de conocimiento

B. Capa Recomendación

La Capa Recomendación define un agente inteligente que implementa el ciclo percepción – acción, estructurado en tres módulos principales: (i) Módulo de Percepción, encargado de interpretar las entradas provenientes del entorno (por ejemplo, documentos institucionales o especificaciones del docente). (ii) Módulo de Inferencia, responsable de ejecutar el razonamiento sobre la base ontológica y aplicar reglas declarativas. Este módulo es el encargado de tomar la decisión sobre qué acción emprender. (iii) Módulo de Crítica, orientado a generar retroalimentación y sugerencias fundamentadas. Le permite al agente aprender de las acciones que realizó. Comprende un modelo de aprendizaje supervisado offline que permite ajustar políticas de ranking de recomendaciones.

La decisión de implementar un recomendador basado en conocimiento (knowledge-based recommender) sustentado en inferencia simbólica en lugar de técnicas estadísticas, tales como las usadas por los modelos de aprendizaje automático y los modelos generativos, está fundamentada en garantiza coherencia pedagógica, pero puede limitar la adaptabilidad automática frente a grandes volúmenes de datos o comportamientos emergentes de usuarios y a la performance en los tiempos de

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

respuestas.

C. Capa de interfaz

La Capa de Interfaz actúa como mecanismo de desacoplamiento entre el modelo semántico y el entorno externo. Permite la interacción con herramientas de autor, documentos institucionales en formato digital y potenciales plataformas académicas de enseñanza. Su función principal es traducir entradas heterogéneas hacia representaciones compatibles con la *Capa de Conocimiento*, y presentar las recomendaciones generadas por el agente de manera comprensible para el docente.

La decisión de definir esta capa, se debió a la necesidad de aislar el agente recomendador de las múltiples herramientas que pueden ser usadas en el diseño de OA, favoreciendo la modificabilidad ante cambios en herramientas externas, reduciendo el impacto sobre las capas inferiores.

La arquitectura ha sido implementada a través de un prototipo que permitió validar la factibilidad técnica y operativa de la misma [15]. De esta manera, la red de ontologías y los mecanismos de inferencia se encuentran formalizados e implementados en un entorno de prueba. En el prototipo sólo se consideró la integración con la herramienta H5P[14].

Esta implementación parcial permite realizar una evaluación arquitectónica preliminar basada tanto en el diseño conceptual como en evidencia empírica derivada de pruebas iniciales.

La estructuración en capas y el uso de modelos basados en conocimiento configuran una arquitectura semánticamente rica pero potencialmente sensible al crecimiento de la base de conocimiento y a la complejidad de las reglas de inferencia.

Por lo dicho anteriormente y entendiendo las características que se describieron, se considera adecuado evaluar la arquitectura mediante ATAM, con el objetivo de analizar las relaciones de compromisos entre los atributos de modificabilidad, interoperabilidad, mantenibilidad y escalabilidad.

IV. Evaluación arquitectónica mediante ATAM

Para cumplir con el objetivo planteado, se aplicó una versión acotada del método Architecture Tradeoff Analysis Method (ATAM) [10]. La misma se centró en la identificación de escenarios de calidad, la construcción preliminar de un árbol de utilidad y el análisis de puntos de sensibilidad y compromisos arquitectónicos.

Dado que la arquitectura se encuentra implementada en un escenario de prueba, la evaluación se realizó sobre la base del diseño conceptual, la documentación técnica existente y evidencia empírica limitada derivada de pruebas iniciales usando el prototipo. Asimismo, se planificaron entrevistas con docentes de Ingeniería (3–5 participantes) para validar y priorizar los escenarios de calidad identificados. En esta versión del artículo se reservan los resultados cuantitativos finales para una iteración posterior.

A. Identificación de stakeholders

Siguiendo los pasos de ATAM, lo primero fue la identificación de los interesados: docentes de las carreras de ingeniería, diseñadores y desarrolladores del sistema, responsables de su mantenimiento y evolución del software, responsables de gestión académica, especialistas en diseño instruccional y equipo de evaluación

Dado el ámbito de investigación en que este trabajo se está realizando, se consideraron especialmente estos grupos de stakeholders dentro de las carreras de Ingeniería en Sistemas de información, Ingeniería en Inform**ática** e Ingeniería en Inteligencia Artificial. Cada uno de estos actores priorizó diferentes atributos de calidad. Por ejemplo, los docentes priorizaron la modificabilidad. Los desarrolladores la interoperabilidad, modificabilidad y escalabilidad.

B. Escenarios de calidad y Árbol de utilidad

Se identificaron escenarios de casos de uso para los atributos bajo estudio: (i) modificabilidad, (ii) interoperabilidad, (iii) mantenibilidad y (iv) escalabilidad.

Escenario 1: Modificabilidad

Estímulo: Incorporación de una nueva metodología de diseño instruccional, didáctica o pedagógica..

Ambiente: Operación normal del sistema.

Respuesta esperada: Modificación específica en ontologías sin afectar la estructura global del sistema. Medida de respuesta: Impacto suave en la Capa Conocimiento.

Este escenario fue considerado de alta prioridad dado el dinamismo de los enfoques pedagógicos en educación superior.

Escenario 2: Interoperabilidad

Integración del sistema con una nueva herramienta de autor.

Ambiente: Actualización tecnológica.

Respuesta esperada: Adaptaciones livianas en la Capa Interfaz. Medida de respuesta: Sin modificaciones en la Capa Recomendadora.

Escenario 3: Escalabilidad

Estímulo: Incremento significativo en la cantidad de instancias de las ontologías, incremento de reglas y restricciones. Incorporación de nuevas ontologías.

Ambiente: Uso intensivo del sistema.

Respuesta esperada: Tiempos de inferencia aceptables. Medida de respuesta: Degradación imperceptible del rendimiento imperceptible para el usuario final.

Escenario 4: Evolución hacia la incorporación de nuevas tecnologías de IA

Estímulo: Incorporación de un módulo de recomendación que combine aprendizaje automático y razonamiento basado en conocimiento.

Ambiente: Proceso de evolución arquitectónica.

Respuesta esperada: Extensión controlada sin reestructuración completa del sistema. Medida de respuesta: Preservación de la capa de conocimiento, es decir, de la red de ontologías.

A partir de los escenarios identificados se construyó un árbol de utilidad preliminar, donde los atributos de calidad se organizaron jerárquicamente y cada escenario se priorizó según

ISBN: 978-989-36481-2-4

su importancia para los stakeholders y la dificultad estimada de implementación (figura 3 y 4).

C. *Análisis de puntos de sensibilidad*

El análisis realizado permitió identificar los siguientes puntos de sensibilidad: (i) Motor de inferencia ontológico: pequeñas variaciones en el número y complejidad de reglas impactan directamente en el rendimiento. (ii) Acoplamiento entre reglas y ontologías: cambios conceptuales pueden requerir ajustes múltiples. (iii) Estructura estrictamente en capas: limita la incorporación directa de componentes de aprendizaje automático con flujos de datos distintos. (iv) Dependencia de estándares formales (LOM): favorece interoperabilidad pero puede restringir flexibilidad. Estos elementos influyen de manera directa sobre los atributos priorizados. La tabla I muestra un resumen de este análisis.

UTILITY

Modificabilidad (Alta prioridad)

M1 – Incorporación de nuevas metodologías pedagógicas
Escenario: Cuando se incorpora una nueva metodología de diseño instruccional, el sistema debe permitir extender las ontologías pedagógicas sin modificar las capas de recomendación ni de interfaz. Prioridad: Alta | Dificultad: Alta

M2 – Actualización de reglas pedagógicas
Escenario: Cuando se actualizan reglas SWRL asociadas a criterios pedagógicos, el motor de inferencia debe aceptar las modificaciones sin requerir cambios en las ontologías base. Prioridad: Alta | Dificultad: Media

M3 – Extensión del modelo ontológico
Escenario: Cuando se agregan nuevos conceptos disciplinares o pedagógicos, el sistema debe permitir extender el modelo ontológico sin afectar | la arquitectura General. | Prioridad: Alta | Dificultad: Media

Figura 3. Árbol de utilidad preliminar derivado de la primera iteración en la aplicación de ATAM. QA Modificabilidad.

D. *Identificación de Trade-offs*

UTILITY
Interoperabilidad (Prioridad Media–Alta)
I1 – Integración con nuevas herramientas de autor
Escenario: Cuando se integra una nueva herramienta de autor, el sistema debe adaptarse mediante cambios limitados en la capa de interfaz. Prioridad: Media–Alta | Dificultad: Media

I2 – Evolución del estándar LOM
Escenario: Cuando aparece una nueva versión del estándar LOM, el sistema debe permitir adaptar OntoLOM sin afectar el resto de la red ontológica. Prioridad: Media | Dificultad: Media

Escalabilidad (Prioridad Alta)
E1 – Crecimiento de la base ontológica
Escenario: Cuando aumenta significativamente el número de instancias y ontologías en la base de conocimiento, el sistema debe mantener tiempos de inferencia aceptables para el usuario. Prioridad: Alta | Dificultad: Alta
E2 – Incremento de reglas SWRL
Escenario: Cuando aumenta el número de reglas de inferencia, el motor de razonamiento debe mantener un rendimiento estable. Prioridad: Media | Dificultad: Alta

Mantenibilidad (Prioridad Media)
MA1 – Localización de errores
Escenario: Ante un error en una regla o en una ontología, el desarrollador debe poder localizar el problema sin recorrer todo el sistema. Prioridad: Media | Dificultad: Media

Figura 4. Árbol de utilidad preliminar derivado de la primera iteración en la aplicación de ATAM. QA Interoperabilidad, Escalabilidad, Mantenibilidad

La aplicación de ATAM permitió detectar compromisos relevantes: (i) Expresividad semántica vs. rendimiento: mayor formalización ontológica incrementa la carga de razonamiento. (ii) Control pedagógico vs. adaptabilidad automática: el sistema recomendador basado en reglas garantiza coherencia, pero limita aprendizaje autónomo. (iii) Separación estricta de capas vs. flexibilidad evolutiva: mejora la modularidad, aunque puede dificultar integraciones no previstas. Estos trade-offs evidencian que la arquitectura es robusta en términos de coherencia conceptual y modificabilidad estructural, pero presenta desafíos ante escenarios de escalabilidad e incorporación de otras tecnologías de inteligencia artificial.

Tabla 1. Análisis de puntos de sensibilidad

Escenario	**Análisis de puntos de sensibilidad**			
	Descripción	**Prioridad**	**Dificultad**	**Impacto**
M1	Nueva metodología de diseño instruccional	Alta	Alta	Capa de conocimiento
M2	Actualización de reglas pedagógicas	Alta	Media	Motor de inferencia
M3	Nuevos conceptos ontológicos	Alta	Media	Modelo ontolgógico
I1	Integración con herramienta externa	Media- Alta	Media	Capa de interfaz
I2	Adaptación a nueva version LOM	Media	Media	OntoLOM
E1	Crecimiento base ontológica	Alta	Alta	Rendimiento
E2	Incremento reglas SWRL	Media	Alta	Motor de inferencia
MA1	Localización de errores	Media	Media	Reglas
MA2	Actualización nmodular	Media	Baja	Comportamiento

E. *Riesgos arquitectónicos identificados*

Se identificaron riesgos preliminares asociados al crecimiento no controlado de las ontologías, incremento del tiempo de inferencia en escenarios complejos y la necesidad futura de reestructuración parcial para integrar modelos de aprendizaje automático. Estos riesgos justifican la exploración de alternativas arquitectónicas evolutivas.

V. Evolución arquitectónica

A partir del análisis realizado donde se identificaron las fortalezas y debilidades de la arquitectura, se plantea una evolución incremental de la arquitectura, orientada a fortalecer las capacidades de inferencia del sistema sin comprometer las ventajas del diseño original en capas. En este sentido, se propone la incorporación de una *Capa de Servicios Inteligentes* complementaria a la red de ontologías existente. Esta extensión no modifica la arquitectura en capas, sino que la desarrolla aún más mediante un enfoque que combina la recomendación basada en conocimiento (knowledge-based recommender), componentes de aprendizaje automático entrenados, servicios desacoplados orientados a análisis de datos, procesamiento de lenguaje natural para la población de las ontologías. En este esquema, el núcleo la red de ontologías sigue siendo la fuente de conocimiento explícito y materializa la coherencia pedagógi-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

ca, mientras que los servicios inteligentes pueden: (i) ajustar el ranking de recomendaciones, (ii) detectar patrones de uso, (iii) sugerir optimizaciones basadas en datos históricos. (iv) poblar ontologías de manera automática. Este enfoque apunta a la adaptabilidad del sistema.

La evolución propuesta impacta en los atributos evaluados mediante ATAM: (i) Modificabilidad: La incorporación de servicios desacoplados podría aumentar la flexibilidad evolutiva si se mantiene un bajo acoplamiento con el núcleo ontológico. (ii) Escalabilidad: La externalización de ciertos procesos de análisis permitiría aliviar la carga del motor de inferencia principal. (iii) Interoperabilidad: La adopción de servicios podría facilitar la integración con plataformas institucionales y herramientas externas. Sin embargo, esta transición introduce como desafío la necesidad de definir mecanismos claros de comunicación entre capas. La evolución arquitectónica propuesta no se presenta como un rediseño definitivo, sino como una hipótesis estructural que deberá ser evaluada en iteraciones futuras del proceso ATAM. En particular, se prevé: (i) Volver a evaluar los escenarios de calidad tras la incorporación de servicios inteligentes. (ii) Analizar nuevos puntos de sensibilidad asociados a componentes de aprendizaje automático. (iii) Comparar el impacto en tiempos de respuesta y mantenibilidad. De este modo, la arquitectura evolucionará de manera controlada.

Si bien la presente evaluación corresponde a una primera iteración, sigue las fases formales de ATAM y se complementará con la validación de las partes interesadas en trabajos posteriores. ATAM fue seleccionado debido a su enfoque explícito en el análisis de equilibrio entre los atributos de calidad, lo cual es fundamental para las arquitecturas basadas en ontologías, donde la riqueza semántica influye en el rendimiento y la escalabilidad. El trabajo implementa un sistema recomendador basado en ontolgías que garantiza la coherencia pedagógica. Se propone la incorporación de mecanismos de aprendizaje automático como una evolución.

Este artículo comprende la primera iteración de la evaluación arquitectónica. La validación empírica con stakeholders está en curso y completará las conclusiones realizadas hasta el momento.

VI. Conclusiones

En este trabajo se presentó la primera iteración de la evaluación arquitectónica de un sistema recomendador basado en ontologías, diseñado para asistir a docentes de carreras de Ingeniería en el desarrollo de Objetos de Aprendizaje bajo el Enfoque Basado en Competencias. La arquitectura, estructurada según un patrón en capas e integrada por una red de ontologías y reglas de inferencia, fue analizada mediante una aplicación acotada del método Architecture Tradeoff Analysis Method (ATAM). La evaluación permitió identificar escenarios de calidad prioritarios, así como puntos de sensibilidad y compromisos relevantes entre atributos tales como modificabilidad, interoperabilidad, mantenibilidad y escalabilidad. En particular, se evidenció una tensión entre la riqueza semántica del modelo ontológico y el rendimiento del sistema ante el crecimiento de la base de conocimiento. Asimismo, se detectaron posibles limitaciones asociadas a la incorporación futura de tecnologías de aprendizaje automático. Este resultado preliminar refuerza la necesidad de una validación arquitectónica sistemática como práctica dentro del ciclo de vida del software.

Como línea de trabajo futuro, se prevé completar la fase de entrevistas con docentes para validar y priorizar empíricamente los escenarios de calidad identificados. Asimismo, se proyecta una segunda iteración del análisis arquitectónico que incorpore la propuesta de evolución hacia una arquitectura con servicios inteligentes. Esta nueva iteración permitirá evaluar el impacto de dicha extensión sobre los atributos de calidad previamente analizados. En síntesis, este trabajo constituye el primer paso de un proceso iterativo de evaluación y refinamiento arquitectónico orientado a consolidar sistemas recomendadores educativos robustos y evolutivos, capaces de articular formalización semántica con capacidades inteligentes emergentes.

Referencias

[1] L. Bass, P. Clements y R. Kazman, *Software Architecture in Practice*, 4rd ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2022.

[2] P. Clements, R. Kazman y M. Klein, *Evaluating Software Architectures: Methods and Case Studies*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley, 2002.

[3] J. Biggs y C. Tang, *Teaching for Quality Learning at University*, 4th ed. Maidenhead, UK: McGraw-Hill, 2011.

[4] IEEE Learning Technology Standards Committee, "IEEE Standard for Learning Object Metadata (IEEE 1484.12.1-2002)," 2002.

[5] F. Buschmann, R. Meunier, H. Rohnert, P. Sommerlad y M. Stal, *Pattern-Oriented Software Architecture: A System of Patterns*. Chichester, UK: Wiley, 1996.

[6] M. Richards y N. Ford, *Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach*. Sebastopol, CA, USA: O'Reilly, 2020.

[7] T. R. Gruber, "A translation approach to portable ontology specifications," *Knowledge Acquisition*, vol. 5, no. 2, pp. 199–220, 1993.

[8] N. Guarino, "Formal Ontology in Information Systems," in *Proceedings of FOIS 1998*, Trento, Italy, 1998, pp. 3–15.

[9] I. Horrocks, P. F. Patel-Schneider y F. van Harmelen, "From SHIQ and RDF to OWL: The making of a Web Ontology Language," *Journal of Web Semantics*, vol. 1, no. 1, pp. 7–26, 2003.

[10] R. Kazman, M. Klein y P. Clements, "ATAM: Method for Architecture Evaluation," CMU/SEI-2000-TR-004, Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 2000.

[11] V. Bertossi, "Diseño de una arquitectura de Sistema Recomendador para el desarrollo de objetos de aprendizaje en Carreras de Ingeniería", Tesis doctoral, 2025.

[12] V. Bertossi, M. Ale, M. Gutiérrez, J. Bourlot and L. Romero, "Design and development of Learning objects based on conceptual model: Competency-based approach," *2022 17th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, Madrid, Spain, 2022, pp. 1-6, doi: 10.23919/CISTI54924.2022.9866892. keywords:{Instruments;Information systems;Software;Ontologies;Videos;Reliability;Recommender systems;Learning Object;Ontology;Recomender system;Competences based approach},

[13] Bertossi, V., Romero, L., Gutiérrez, M. (2024)."Sistemas recomendadores para el desarrollo de objetos de aprendizaje para educación en ingenierías: una revisión sistemática". Revista de Educación a Distancia (RED). 24(77). DOI: https://doi.org/10.6018/red.572291¨. https://revistas.um.es/red/article/view/572291.

[14] H5P – Create and Share Rich HTML5 Content and Applications

[15] Novillo, Bertossi, V. Desarrollo de un Prototipo de Sistema Recomendador para el Dise;o de Objetos de Aprendizaje en Carreras de Ingeniería. Informe de Proyecto Final de Carrera de Ingeniería en Sistemas de Información. Enlace a Repositorio institucional https://hdl.handle.net/20.500.12272/13171.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Uso de Inteligência Artificial no Apoio à Classificação de Grupo Etário em Conteúdos Netflix

Use of Artificial Intelligence to Support Netflix Age-Group Classification

Denis Cicau[1], Diogo Vidazinha[1], Isabel Sofia Brito [1, 2]
[1]Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Beja
Beja, Portugal
[2]Center of Technology and Systems (UNINOVA-CTS) and Associated Lab of Intelligent Systems (LASI), 2829-516 Caparica, Portugal
deniscicau@gmail.com; vidazinhadiogo@gmail.com; isabel.sofia@ipbeja.pt

Resumo — **Este artigo analisa em que medida modelos clássicos de aprendizagem supervisionada, aplicados exclusivamente a metadados tabulares de conteúdos da Netflix, conseguem apoiar a classificação etária em três grupos: *Kid*s, *Teen* e *Adult*. O estudo utiliza um conjunto de dados público com 8716 instâncias e um *workflow* implementado no Orange, ferramenta de *Data Mining*, para preparação de dados, modelação e avaliação. Foram comparados os algoritmos Decision Tree, kNN, Regressão Logística Multinomial e Random Forest, recorrendo à validação cruzada estratificada com 10 partições e às métricas Area Under the Curve (AUC), Accuracy, F1, Precision, Recall e Matthews Correlation Coefficient (MCC). Os resultados evidenciam desempenho global moderado, tendo o Random Forest apresentado o comportamento mais consistente entre os modelos testados. A análise dos erros revela maior dificuldade na separação entre as classes *Teen* e Adult, sugerindo que metadados estruturais simples contêm sinal preditivo útil, mas insuficiente para uma discriminação robusta entre categorias semanticamente próximas. O estudo contribui com uma *baseline* reproduzível e interpretável, útil em contexto exploratório, pedagógico e de apoio à organização de catálogos digitais.**

Palavras-Chave — **Netflix, classificação etária, aprendizagem automática supervisionada, data mining.**

Abstract — **This paper analyzes which classical supervised learning models, applied exclusively to tabular metadata from Netflix titles, can support age-group classification into three categories: Kids, Teen, and Adult. The study uses a public dataset with 8716 instances and an Orange, Data Mining tool, workflow for data preparation, modelling, and evaluation. Decision Tree, kNN, Multinomial Logistic Regression, and Random Forest were compared using stratified 10-fold cross-validation and the metrics Area Under the Curve (AUC), Accuracy, F1, Precision, Recall, and Matthews Correlation Coefficient (MCC). Results show moderate overall performance, with Random Forest achieving the most consistent behavior among the tested models. Error analysis highlights the difficulty of separating Teen and Adult classes, suggesting that simple structured metadata contains useful predictive signal, although insufficient for robust discrimination of semantically close categories. The study contributes a reproducible and interpretable *baseline*, useful in exploratory, pedagogical, and catalog-support settings.**

Keywords — Netflix, age-group classification, supervised learning, data mining.

I. Introdução

A classificação automática de conteúdos digitais tem relevância crescente em plataformas de *streaming*, nomeadamente em tarefas relacionadas com organização de catálogos, adequação etária, recomendação e apoio à decisão. Apesar disso, a literatura tem privilegiado abordagens baseadas em texto, áudio e vídeo para previsão de classificações etárias, sendo menos frequente a análise da capacidade preditiva de metadados tabulares simples, normalmente disponíveis em sistemas de catálogo. Neste contexto, o problema de investigação consiste em avaliar em que medida metadados estruturados de conteúdos Netflix permitem classificar títulos em grupos etários. A questão de investigação formulada é a seguinte: até que ponto modelos clássicos de aprendizagem supervisionada, aplicados exclusivamente a metadados tabulares, conseguem classificar títulos Netflix em grupos etários com desempenho útil e interpretável?

A previsão automática de adequação etária tem sido estudada sobretudo com informação não estruturada. Existem abordagens que predizem classificações etárias com base em texto, nomeadamente diálogos ou guiões, explorando características linguísticas como suporte a modelos supervisionados [11]. Outros trabalhos analisam informação multimodal em trailers, combinando vídeo, áudio e texto, e mostram que essa integração pode melhorar o desempenho na tarefa de age-*suitability* [12]. Foram igualmente propostos conjuntos de dados e análises específicas para investigação de age *appropriateness* em filmes, reforçando a relevância do problema e a importância de métricas adequadas [10]. Em contraste com essas abordagens, este trabalho adota uma perspetiva mais simples e interpretável, baseada apenas em metadados tabulares, como tipo de conteúdo, ano de lançamento, duração e contagens derivadas. Esta opção é relevante porque permite construir uma *baseline* reproduzível, de baixo custo computacional e mais próxima de cenários em que apenas informação de catálogo está disponível. Para garantir transparência metodológica, foi utilizado o Orange [1], que permite construir *workflows* visuais e avaliar modelos com validação cruzada estratificada [2].

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

No que respeita à avaliação, métricas como F1 e Area Under the Curve (AUC) são comuns em problemas de classificação; no caso multiclasse, a AUC pode ser generalizada por médias entre pares de classes [7]. Além disso, o coeficiente Matthews Correlation Coefficient (MCC) é frequentemente recomendado em cenários com desbalanceamento nas classes por fornecer uma medida mais equilibrada do que a Accuracy [8]. Embora a discussão clássica do MCC seja frequentemente apresentada no caso binário, esta métrica pode ser estendida para K classes com base na matriz de confusão [9]. Assim, os principais contributos deste estudo são: (i) a construção de uma variável-alvo agregada para classificação multi-classe em grupos etários; (ii) a comparação de diferentes algoritmos clássicos no Orange sob o mesmo protocolo experimental; (iii) a análise interpretativa dos erros, da relevância das variáveis; e (iv) a discussão das limitações de uma abordagem baseada apenas em metadados estruturados.

Este artigo está dividido em cinco seções. A seção I apresenta o problema e a motivação para a escolha do data set. A seção II descreve as decisões tomadas em cada fase da metodologia usada. As seções III e IV descrevem a avaliação do modelo e analisam os resultados. Por último, a seção V apresenta as conclusões do estudo.

II. Metodologia

Este estudo segue uma abordagem inspirada no processo KDD (Knowledge Discovery in Databases), na medida em que inclui etapas de seleção e preparação dos dados, transformação de variáveis, aplicação de algoritmos de classificação e interpretação dos resultados obtidos. [14]

A. Dataset e Variáveis

O conjunto de dados utilizado [13] contém 8716 instâncias e foi obtido a partir de um repositório público com conteúdos Netflix. A variável-alvo, designada *rating_group*, possui três classes: *Kids, Teen* e *Adult,* cuja distribuição pode ser consultada na Tabela I. Como variáveis preditoras, foram consideradas *type, release_year, duration_min, seasons, cast_count, genre_count e country_count*. A variável *rating_group* foi construída a partir do atributo rating do conjunto de dados referido anteriormente, agregando as classificações em três níveis de maturidade. No grupo *Kid*s foram incluídas classificações tipicamente infantis, como TV-Y, TV-Y7 e G; no grupo *Teen* foram agregadas classificações intermédias, como TV-PG, TV14, PG e PG-13; no grupo *Adult* foram incluídas classificações maduras, como TV-MA, R e NC-17. Esta agregação reduz a granularidade do rótulo original, mas permite formular uma tarefa multi-classe mais estável e adequada aos metadados disponíveis.

Tabela I. Distribuição da variável-alvo rating_group

Classe	Instâncias	Percentagem
Adult	4009	46.0%
Teen	3799	43.6%
Kids	908	10.4%

A Tabela II apresenta uma síntese das variáveis utilizadas no estudo.

Tabela II. Dicionário resumido das variáveis utilizadas

Variável	Tipo	Descrição
type	Categórica	Tipo de conteúdo (Movie ou TV Show)
release_year	Numérica	Ano de lançamento
duration_min	Numérica	Duração em minutos, quando aplicável
seasons	Numérica	Número de temporadas, quando aplicável
cast_count	Numérica	Número de elementos do elenco
genre_count	Numérica	Número de géneros associados
country_count	Numérica	Número de países associados
rating_group	Alvo	Grupo etário agregado: Kids, Teen, Adult

B. Engenharia de Features

Para enriquecer os dados com variáveis numéricas simples, foram criadas contagens a partir de campos textuais compostos por listas separadas por vírgulas:

- *cast_count*: número de elementos no elenco (cast);
- *genre_count:* número de géneros associados (listed_in);
- *country_count*: número de países associados (country).

Na prática, estes campos foram convertidos em listas e foi aplicada a contagem de itens. Nos casos em que os campos textuais originais se encontravam vazios ou ausentes, foi atribuído o valor 0 às variáveis derivadas correspondentes, por representar ausência de elementos contabilizáveis. Esta transformação procurou capturar, de forma simples, aspetos estruturais do conteúdo, assumindo que maior diversidade de géneros, países ou elementos do elenco pode refletir diferenças no perfil de produção e no público-alvo.

C. Pré-processamento no Orange

O *workflow* implementado no Orange [1] incluiu as seguintes etapas:

- *Select Columns*: definição de *rating_group* como variável-alvo;
- *Impute:* Esta etapa de imputação foi mantida para tratar eventuais valores em falta remanescentes nas restantes variáveis do conjunto de dados, não se aplicando às contagens derivadas já definidas previamente com valor zero quando os campos textuais originais se encontravam ausentes.;
- *Continuize:* transformação de variáveis categóricas, como type, em representação numérica;
- *Preprocess:* normalização ou padronização das variáveis, necessária para modelos sensíveis à escala, como o kNN.

A imputação por média e moda foi adotada como estratégia simples e consistente com o carácter exploratório do estudo, permitindo preservar o número total de instâncias e evitar a exclusão de registos potencialmente úteis. Embora esta abordagem possa reduzir alguma variabilidade e introduzir simplificação dos dados, foi considerada adequada neste contexto por

ISBN: 978-989-36481-2-4

facilitar uma comparação homogénea entre os modelos.

A Fig. 1 resume o workflow implementado no Orange, desde a preparação dos dados até à avaliação e análise, incluindo ranking de atributos, matriz de confusão, curvas *Receiver Operating Characteristic* (ROC), inspeção de erros e visualização de regras [2].

D. Justificação da Escolha de Algoritmos

As técnicas selecionadas são adequadas a um problema de classificação supervisionada com dados tabulares e *features* mistas, combinando variáveis categóricas e numéricas. A escolha de modelos clássicos permite comparar famílias distintas sob o mesmo protocolo experimental, fornecendo uma base sólida de comparação entre abordagens lineares, não lineares, baseadas em instâncias e baseadas em ensembles.

Foram escolhidos quatro modelos por representarem famílias complementares:

- Decision Tree: modelo interpretável, útil para visualização de regras e compreensão de decisões;
- kNN: *baseline* baseada em instâncias e distância, adequada para comparação com modelos mais complexos [4];
- Regressão Logística Multinomial: modelo linear probabilístico adequado a problemas com variável dependente nominal com mais de duas classes, permitindo avaliar até que ponto existe separabilidade aproximadamente linear entre *Kids*, *Teen* e *Adult* [5];
- Random Forest: ensemble de árvores com maior robustez e capacidade de generalização, preservando algum nível de interpretabilidade através da importância dos atributos [3].

III. Experiências e avaliação

A. Validação e Métricas

A avaliação foi realizada com validação cruzada estratificada de 10 partições no *widget* Test & Score do Orange [2]. As métricas utilizadas foram AUC, Accuracy (CA), F1, Precision, Recall e MCC.

No Test & Score, as métricas por classe (Precision, Recall e F1) foram reportadas como média sobre as classes (Average over classes), correspondente a uma macro-average, de forma a reduzir o efeito da classe maioritária.

O MCC foi incluído por ser frequentemente considerado mais informativo do que a *Accuracy* em contextos desbalanceados [8]. Dado que o presente problema é multi-classe, o MCC foi reportado na forma aplicável a K classes, derivada da matriz de confusão, conforme proposto por Gorodkin [9]. De forma complementar, para AUC em classificação multi-classe, considera-se a generalização baseada em médias entre pares de classes [7].

B. Matriz de Confusão e Resultados Globais

A matriz de confusão foi utilizada para compreender os padrões de erro por classe. No Orange, esta foi reportada com a opção Show = Number of instances. Neste estudo, as linhas representam a classe real (Actual) e as colunas a classe prevista (*Predicted*). A Fig. 2 apresenta a matriz de confusão do Random Forest, modelo que obteve melhor desempenho global.

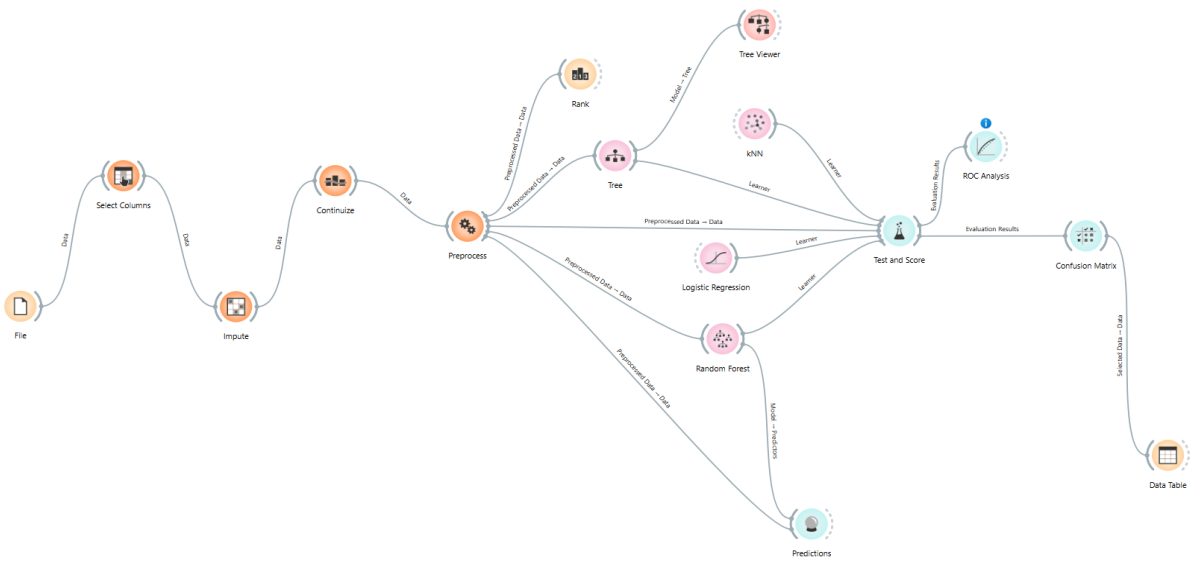


Figura 1. Workflow do Orange

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

		Predicted			
		Adult	Kids	Teen	∑
Actual	Adult	2458	146	1405	4,009
	Kids	242	398	268	908
	Teen	1543	170	2086	3,799
	∑	4,243	714	3,759	8,716

Figura 2. Matriz de confusão

A Tabela III apresenta os resultados obtidos com validação cruzada estratificada.

Tabela III. Resultados das métricas de avaliação dos modelos com validação cruzada

Scores

Model	AUC	CA	F1	Prec	Recall	MCC
Tree	0.718	0.885	0.405	0.437	0.377	0.342
kNN 3	0.747	0.899	0.417	0.526	0.345	0.374
Logistic Regression	0.818	0.897	0.338	0.515	0.251	0.311
Random Forest 200	0.850	0.907	0.496	0.570	0.438	0.450
kNN 11	0.815	0.904	0.446	0.558	0.372	0.406
Random Forest 50	0.847	0.905	0.494	0.557	0.444	0.448

C. *Tuning de Hiperparâmetros*

Para reforçar a robustez do estudo, foram testadas pequenas variações de hiperparâmetros:

- kNN: $k \in \{3, 7, 11\}$;
- Random Forest: número de árvores igual a 50 e 200.

Observou-se variação ligeira nos resultados, mantendo-se o Random Forest como o modelo mais consistente. A Fig. 3 ilustra esta comparação no Test & Score [2]. Para o restante estudo, adotou-se a configuração com melhor desempenho médio, correspondendo a kNN com k = 7 e Random Forest com 200 árvores.

D. *Curvas ROC*

A análise ROC [6] foi usada como complemento para comparar a separabilidade entre classes. Em problemas multiclasse, a leitura das curvas ROC e da AUC deve ser interpretada por classe, tipicamente numa perspetiva one-vs-rest, ou através de medidas agregadas [7]. A Fig. 4 apresenta as curvas ROC dos modelos.

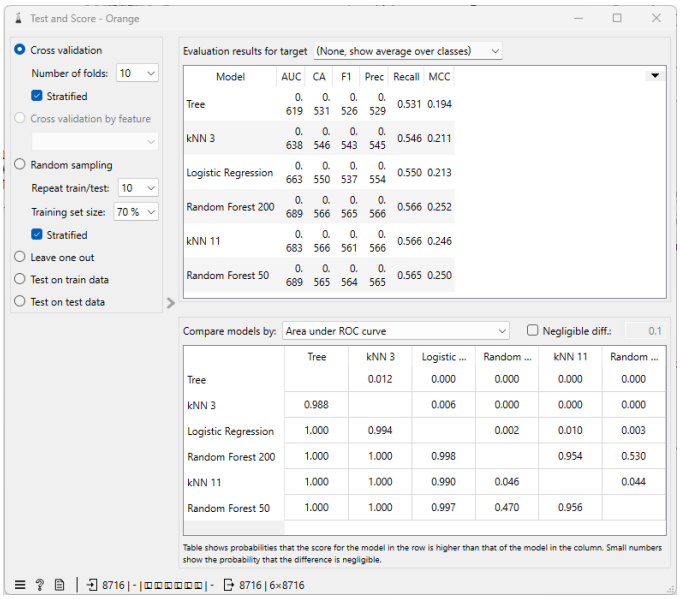


Figura 3. Resultados do Test&Score

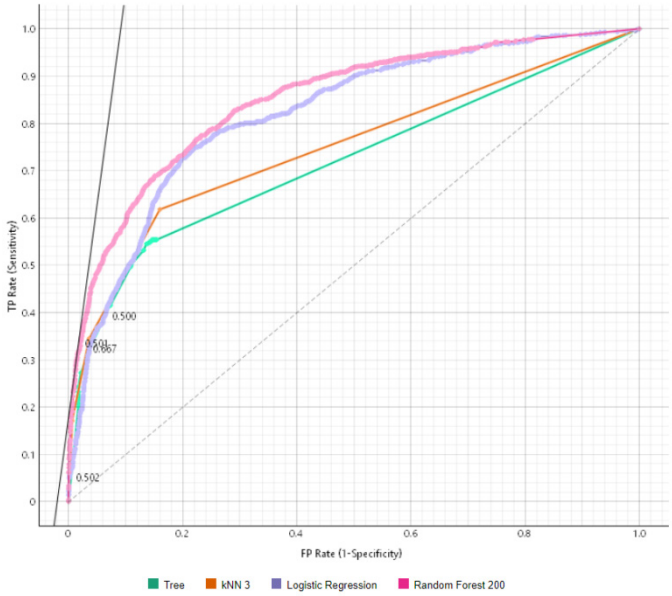


Figura 4. Curvas ROC dos modelos

IV. Resultados e discussão

A. *Baseline e Efeito do Desbalanceamento*

Uma *baseline* simples consiste em prever sempre a classe maioritária. Com base na matriz de confusão apresentada na

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Fig. 2, a classe *Adult* representa aproximadamente 46% do conjunto de dados (4009/8716). Assim, a Accuracy de 56.9% obtida pelo Random Forest corresponde a um ganho modesto de cerca de 11 pontos percentuais face a essa referência.

Este resultado deve ser interpretado com cautela, uma vez que o conjunto de dados apresenta desbalanceamento entre classes, nomeadamente uma menor representação da classe *Kid*s. Neste cenário, métricas como F1 e MCC são mais informativas do que a Accuracy, por refletirem melhor a qualidade da classificação em contextos assimétricos [8], [9].

B. Interpretação dos Erros

A matriz de confusão mostra que a principal dificuldade do modelo se situa na fronteira entre *Teen* e *Adult*. Em particular, muitos títulos da classe *Teen* foram classificados como *Adult* e, simetricamente, muitos conteúdos *Adult* foram classificados como *Teen*. Este padrão sugere que as features utilizadas (ano de lançamento, duração e contagens derivadas) não capturam de forma suficientemente discriminante a diferença semântica entre estas duas categorias.

C. Interpretação do MCC

O melhor valor de MCC obtido foi 0,256, correspondente ao Random Forest. Este valor indica associação positiva entre as previsões e os valores reais, embora ainda de magnitude fraca a moderada. Tal reforça a ideia de que os metadados estruturais contêm algum sinal útil, mas insuficiente para uma separação robusta entre classes próximas. Este resultado é coerente com a literatura, que frequentemente recorre a atributos mais semânticos, como descrições textuais, diálogos ou informação multimodal, para melhorar a discriminação entre níveis de maturidade [11], [10], [12].

D. Importância dos Atributos

Foi aplicado o *widget* Rank com Information Gain para estimar a relevância dos atributos. A Fig. 5 apresenta o ranking obtido. De forma geral, *duration_min* e *genre_count* surgem como variáveis mais informativas, o que é coerente com a hipótese de que a duração e a diversidade de géneros influenciam a adequação etária. Uma inspeção exploratória sugere que conteúdos *Kid*s tendem a apresentar durações mais curtas, enquanto títulos *Teen* e *Adult* mostram maior variabilidade. Esta tendência ajuda a compreender o papel de *duration_min* no processo de classificação.

#		Info. gain
1	duration_minutes	0.067
2	genre_count	0.046
3	release_year	0.025
4	seasons	0.023
5	country_count	0.016
6	type=TV Show	0.016
7	cast_count	0.007

Figura 5. Ranking dos atributos

	rating_group	rating_group(Random Forest 200)	type=TV Show	release_year	duration_minutes	seasons	cast_count	genre_count	country_count
1	Teen	Adult	-0.66436	0.773	0.6749	-0.454	0.762	-0.249	-0.178
2	Kids	Adult	1.50521	0.431	-1.3384	0.387	-0.472	-0.249	-0.178
3	Teen	Kids	1.50521	0.773	-1.3384	4.593	-1.090	-1.525	-0.178
4	Adult	Kids	1.50521	0.773	-1.3384	2.070	-1.295	-1.525	1.143
5	Teen	Kids	1.50521	0.659	-1.3384	0.387	0.145	-1.525	-1.500
6	Adult	Teen	-0.66436	-3.450	3.0946	-0.454	0.556	-0.249	1.143
7	Teen	Adult	-0.66436	0.773	1.0814	-0.454	-0.884	-0.249	-0.178
8	Teen	Kids	1.50521	0.773	-1.3384	0.387	-1.295	-0.249	-1.500
9	Teen	Adult	-0.66436	0.203	0.6168	-0.454	0.556	-0.249	-0.178
10	Adult	Teen	-0.66436	-0.482	0.7136	-0.454	0.556	-0.249	1.143

Figura 6. Exemplos de instâncias mal classificadas

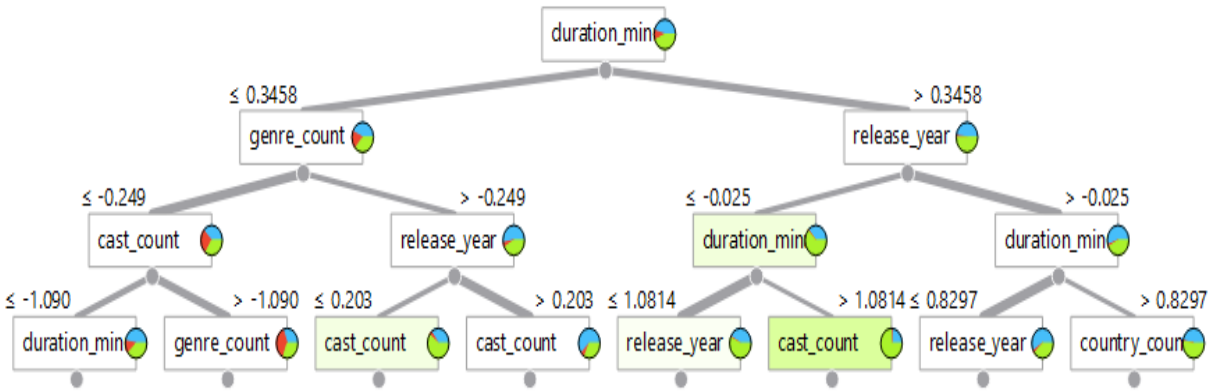


Figura 7. Árvore de decisão gerada pelo TreeViewer

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

E. Análise de Casos Mal Classificados

Para analisar falhas concretas, foram inspecionadas instâncias classificadas incorretamente com recurso aos widgets Predictions e Data Table, selecionando erros diretamente a partir da matriz de confusão. A Fig. 6 exemplifica esta análise. Em vários casos, conteúdos com durações elevadas e contagens de géneros semelhantes foram confundidos entre *Teen* e *Adult*, reforçando a limitação da representação adotada.

F. Interpretação de Regras

Embora o Random Forest tenha obtido o melhor desempenho global, a Decision Tree foi utilizada como apoio à interpretabilidade. O Tree Viewer permitiu observar os atributos que dominam as primeiras divisões do modelo. Na Fig. 7, verifica-se que duration_min surge na raiz, seguido de genre_count e release_year. Como os dados foram normalizados no pré-processamento, os limiares apresentados na árvore devem ser interpretados na escala transformada e não nos valores originais.

G. Limitações do estudo

Este estudo apresenta algumas limitações. Em primeiro lugar, a classificação foi baseada apenas em metadados tabulares, excluindo informação semântica potencialmente relevante, como descrições textuais, diálogos ou trailers. Em segundo lugar, a agregação da variável original rating em três grupos reduz a granularidade do problema e pode ocultar diferenças importantes entre classificações intermédias. Em terceiro lugar, o desbalanceamento das classes pode ter condicionado parte do desempenho observado. Por fim, algumas evidências visuais apresentadas correspondem a saídas do Orange, o que limita a legibilidade quando comparadas com gráficos ou tabelas especificamente desenhados para publicação.

V. Conclusão e Trabalho Futuro

O estudo mostrou que modelos clássicos de aprendizagem supervisionada, aplicados a metadados estruturados de conteúdos Netflix, conseguem captar algum sinal preditivo relativamente à adequação etária, ainda que com desempenho moderado. Entre os modelos avaliados, o Random Forest apresentou o melhor comportamento global, superando a *baseline* da classe maioritária, mas mantendo dificuldades evidentes na distinção entre *Teen* e *Adult*.

Do ponto de vista científico, os resultados sugerem que metadados tabulares simples são úteis para construir uma *baseline* reprodutível e interpretável, mas insuficientes para uma classificação robusta quando as classes representam níveis de maturidade semanticamente próximos. Do ponto de vista aplicado, esta abordagem pode ser útil em contexto exploratório, pedagógico ou como primeiro nível de apoio à organização de catálogos.

Como trabalho futuro, recomenda-se: (i) incorporar atributos mais semânticos, como descrições textuais; (ii) avaliar explicitamente técnicas de balanceamento de classes, como SMOTE ou class weights; (iii) realizar *tuning* mais sistemático; (iv) apresentar resultados adicionais para amostras balanceadas; e (v) extrair regras mais formais e interpretáveis da árvore de decisão, idealmente acompanhadas por medidas como suporte e confiança.

Declaração do uso de IA

Um modelo de linguagem de grande escala, Gemini, foi utilizado exclusivamente como ferramenta de apoio à redação científica, clarificação conceptual, revisão linguística e verificação de conformidade estrutural do artigo. Um exemplo representativo do *prompt* utilizado foi o seguinte:

"Vais atuar como revisor e avaliador do 2.º Trabalho Prático de Sistemas de Informação (artigo científico). Quero uma revisão rigorosa, prática e orientada ao enunciado, verificando a descrição do processo, a justificação dos algoritmos, a aplicação das métricas, a análise de resultados, a estrutura do artigo e os aspetos originais do trabalho."

Referências Bibliográficas

[1] J. Demšar, T. Curk, A. Erjavec, C. Gorup, T. Ho ˇ cevar, M. Milutinovi ˇ c,ˇ M. Možina, M. Polajnar, M. Toplak, A. Staric, M. Štajdohar, L. Umek, ˇ L. Žagar, J. Žbontar, M. Žitnik, and B. Zupan, "Orange: Data Mining Toolbox in Python," Journal of Machine Learning Research, vol. 14, pp. 2349–2353, 2013.

[2] Orange Data Mining, "Test & Score," [Online]. Available: https:// orange-datamining.com/widget-catalog/evaluate/testandscore/. Accessed: Jan. 2026.

[3] L. Breiman, "Random Forests" Machine Learning, vol. 45, no. 1, pp. 5–32, 2001.

[4] T. Cover and P. Hart, "Nearest Neighbor Pattern Classification," IEEE Transactions on Information Theory, vol. 13, no. 1, pp. 21–27, 1967.

[5] D. W. Hosmer, S. Lemeshow, and R. X. Sturdivant, Applied Logistic Regression, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.

[6] T. Fawcett, "An introduction to ROC analysis," Pattern Recognition Letters, vol. 27, no. 8, pp. 861–874, 2006.

[7] D. J. Hand and R. J. Till, "A Simple Generalisation of the Area Under the ROC Curve for Multiple Class Classification Problems," Machine Learning, vol. 45, pp. 171–186, 2001.

[8] D. Chicco and G. Jurman, "The advantages of the Matthews correlation coefficient (MCC) over F1 score and accuracy in binary classification evaluation," BMC Genomics, vol. 21, no. 6, 2020.

[9] J. Gorodkin, "Comparing two K-category assignments by a K-category correlation coefficient," Computational Biology and Chemistry, vol. 28, no. 5–6, pp. 367–374, 2004.

[10] E. Mohamed and L. A. Ha, "A First Dataset for Film Age Appropriateness Investigation," in Proceedings of the Twelfth Language Resources and Evaluation Conference, Marseille, France, 2020, pp. 1311–1317.

[11] M. Shafaei, N. Safi Samghabadi, S. Kar, and T. Solorio, "Age Suitability Rating: Predicting the MPAA Rating Based on Movie Dialogues," in Proceedings of the Twelfth Language Resources and Evaluation Conference, Marseille, France, 2020, pp. 1327–1335.

[12] M. Shafaei, C. Smailis, I. Kakadiaris, and T. Solorio, "A Case Study of Deep Learning-Based Multi-Modal Methods for Labeling the Presence of Questionable Content in Movie Trailers," in Proceedings of the International Conference on Recent Advances in Natural Language Processing (RANLP 2021), Held Online, 2021, pp. 1297–1307.

[13] Kaggle, "Netflix Movies and TV Shows," [Online]. Available: https: // www.kaggle.com/datasets/shivamb/netflix-shows. Accessed: Jan. 2026.

[14] A. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, and P. Smyth, "From Data Mining to Knowledge Discovery in Databases," AI Magazine, vol. 17, no. 3, pp. 37–54, 1996.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Limitações da verificação automática de conformidade com WCAG: um experimento com barreiras intencionais de acessibilidade

Limitations of automated WCAG conformance verification: an experimental study with intentional accessibility barriers

Reinaldo Ferraz
Centro de Estudos sobre Tecnologias Web - CEWEB.br
NIC.br
São Paulo, SP, Brasil
reinaldo@nic.br

Jeniffer Deus
Centro de Estudos sobre Tecnologias Web - CEWEB.br
NIC.br
São Paulo, SP, Brasil
jeniffer@nic.br

***Resumo* — A verificação automática de conformidade com as diretrizes WCAG é amplamente utilizada na avaliação de acessibilidade. Este trabalho investiga suas limitações por meio de um experimento controlado no qual uma página web foi construída para maximizar a conformidade sintática, mantendo barreiras intencionais que comprometem a percepção e a operação do conteúdo. A página foi avaliada por múltiplas ferramentas automáticas em três ciclos experimentais realizados entre 2019 e 2025. Os resultados mostram que a maioria das ferramentas ainda não detecta barreiras funcionais críticas, embora melhorias graduais tenham sido observadas. O estudo evidencia a discrepância entre validação automatizada e acessibilidade efetiva, reforçando a necessidade de abordagens híbridas de avaliação.**

Palavras **Chave acessibilidade web; avaliação automática de acessibilidade; diretrizes wcag; conformidade sintática de código.**

***Abstract* — Automated verification of WCAG conformance is widely used in accessibility evaluation. This study investigates its limitations through a controlled experiment in which a web page was designed to maximize syntactic conformance while incorporating intentional barriers that compromise perception and operability. The page was evaluated using multiple automated tools across three experimental cycles conducted between 2019 and 2025. Results show that most tools still fail to detect critical functional barriers, although gradual improvements were observed. The findings highlight the gap between automated validation and effective accessibility, reinforcing the need for hybrid evaluation approaches.**

Keywords - Web Accessibility; Automated Accessibility Evaluation; WCAG Guidelines; Syntactic Code Conformance.

I. Introdução

A acessibilidade de uma aplicação depende mais da percepção, operação e compreensão de quem utiliza um sistema do que da simples aplicação de códigos sintaticamente corretos em uma página. É comum encontrarmos páginas web que atendem formalmente às diretrizes de acessibilidade e, ainda assim, apresentam barreiras para pessoas com deficiência. Essa discrepância evidencia que conformidade sintática nem sempre garante acessibilidade efetiva.

A verificação automática de acessibilidade consiste no uso de ferramentas que analisam o código HTML de uma página e verificam sua conformidade com os padrões desenvolvidos pelo W3C, especialmente as Web Content Accessibility Guidelines (WCAG). Embora existam diversas ferramentas disponíveis, nenhuma delas é capaz de verificar integralmente todos os critérios de sucesso das WCAG. Estudos indicam que a cobertura automática varia aproximadamente entre 32% [1] e 50% [2] dos critérios. Essas ferramentas são eficazes na identificação de problemas estruturais, como erros de marcação, hierarquia inadequada de cabeçalhos e ausência de texto alternativo em imagens. No entanto, não conseguem avaliar aspectos qualitativos, como a adequação semântica de um texto alternativo ou a efetiva compreensão do conteúdo por pessoas que o utilizam.

A verificação manual, por sua vez, envolve a atuação de profissionais responsáveis pela avaliação de acessibilidade, com o objetivo de identificar barreiras que não podem ser detectadas apenas pela análise sintática do código. Por meio dessa abordagem, é possível verificar se o texto alternativo de uma imagem transmite corretamente a informação pretendida ou se legendas e janelas de língua de sinais em vídeos são adequadas. Entretanto, a avaliação exclusivamente manual apresenta limitações práticas, especialmente na escala da Web, pois demanda tempo, esforço e recursos financeiros consideráveis [4], além de exigir conhecimento especializado das diretrizes de acessibilidade [3].

Diante dessas características, a avaliação de acessibilidade geralmente envolve a combinação de técnicas automáticas e manuais, buscando ampliar a detecção de barreiras. Ainda assim, permanece a questão sobre até que ponto a conformidade identificada por validadores automáticos reflete a experiência

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

real de uso por pessoas com deficiência.

Nesse contexto, este estudo busca responder às seguintes questões de pesquisa:

(RQ1) Em que medida ferramentas automáticas são capazes de identificar barreiras funcionais graves em uma página construída para maximizar conformidade sintática?

(RQ2) Em que medida os resultados obtidos indicam a necessidade de abordagens híbridas que combinem avaliação automática e análise humana na verificação de acessibilidade?

Este trabalho investiga as limitações da verificação automática de conformidade com as WCAG a partir de um experimento controlado. Para isso, foi desenvolvida uma página web projetada para maximizar a conformidade sintática aos critérios de sucesso, mantendo simultaneamente barreiras intencionais que comprometem sua navegação e uso. O código-fonte da página foi submetido a diferentes ferramentas automáticas de avaliação em três momentos distintos — 2019, 2021 e 2025. A análise comparativa dos resultados permite observar a capacidade dessas ferramentas de identificar barreiras funcionais críticas, bem como sua evolução ao longo do tempo.

A página utilizada no experimento encontra-se disponível em: http://reinaldoferraz.com.br/inacessivel/

II. Diretrizes de acessibilidade na Web

As Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo Web constituem a principal referência internacional para o desenvolvimento de aplicações web acessíveis. Segundo a própria documentação, as Web Content Accessibility Guidelines (WCAG) 2.2 reúnem recomendações com a finalidade de tornar o conteúdo da web mais acessível a pessoas com deficiência, incluindo condições relacionadas à visão, audição, mobilidade, fala, fotossensibilidade e aspectos cognitivos. Embora não contemplem todas as necessidades possíveis, essas diretrizes estabelecem critérios verificáveis que orientam a produção de conteúdo digital mais inclusivo para todas as pessoas [5].

As WCAG estão organizadas em quatro princípios fundamentais: Perceptível (o conteúdo deve poder ser percebido), Operável (a interface deve poder ser utilizada), Compreensível (o conteúdo e a navegação devem ser entendidos) e Robusto (o conteúdo deve ser suficientemente compatível com diferentes tecnologias e agentes de usuário). Esses princípios se desdobram em 13 diretrizes e 86 critérios de sucesso, que definem condições objetivas para a verificação de conformidade [5].

Cada critério de sucesso tem a função de estabelecer requisitos específicos para diferentes componentes da web, como imagens, formulários, tabelas, conteúdos multimídia e elementos interativos. Parte desses critérios pode ser verificada automaticamente, especialmente aqueles relacionados à estrutura do código, como a presença de texto alternativo ou a correta associação entre rótulos e campos de formulário. No entanto, diversos critérios dependem de análise contextual ou qualitativa, como a adequação semântica de descrições textuais em imagens ou a presença e qualidade de legendas em vídeos.

Essa distinção entre aspectos estruturais e aspectos interpretativos é relevante para a avaliação de acessibilidade. Enquanto a conformidade sintática pode ser identificada por ferramentas automáticas, a acessibilidade efetiva envolve também a compreensão do conteúdo e a experiência de uso, o que demanda análise humana. Assim, mesmo quando uma página apresenta poucos erros formais, isso não significa necessariamente que esteja livre de barreiras.

Além da documentação WCAG, existe ainda a especificação WAI-ARIA (Accessible Rich Internet Applications), que define papéis, estados e propriedades destinados a aprimorar a acessibilidade de interfaces dinâmicas e aplicações web complexas [6]. Embora o uso adequado de WAI-ARIA possa contribuir para a interoperabilidade com tecnologias assistivas, sua aplicação incorreta pode introduzir novas barreiras, nem sempre detectáveis por ferramentas automatizadas.

A página Web projetada para maximizar a compatibilidade sintática usa como base nos critérios de sucesso das WCAG e atributos de WAI-ARIA, mantendo simultaneamente barreiras intencionais de acesso. O processo de construção desse artefato é detalhado na seção seguinte.

III. Preparação da página e seleção das ferramentas

Para o desenvolvimento da página experimental, foram seguidas as diretrizes WCAG com o objetivo de maximizar a conformidade sintática com determinados critérios de sucesso. Garantiu-se a conformidade da página com os critérios 1.3.1, 2.4.2, 3.1.1, 3.3.1, 3.3.2, 4.1.1 e 4.1.2. Foram adicionados componentes comuns em aplicações web, como imagens, links e campos de formulário, de modo a simular uma estrutura típica de página. Cuidados específicos foram adotados para que as ferramentas automáticas reconhecessem o código como estruturalmente adequado.

As imagens foram inseridas por meio de CSS, como imagens de fundo aplicadas a elementos de lista, e não diretamente no HTML:

Código HTML:

```
<li id=”pic01”><span>Photo 01</span></li>
```

Código CSS:

```
#pic01{background-image: url(‘images/beach.jpg’);}
```

Essa estratégia foi adotada porque imagens aplicadas via CSS geralmente não são tratadas pelas ferramentas automáticas como conteúdo não textual sujeito ao critério 1.1.1. Assim, a presença da imagem pode não ser considerada na verificação automática.

Os campos de formulário foram estruturados seguindo as boas práticas de desenvolvimento acessível, com rótulos relacionados explícitamente aos seus campos:

```
<label for=”name”>Name:</label> <input type=”text” id=”name” name=”name” autocomplete=”name” placeholder=”Name”>
```

Também foram utilizados elementos semânticos como <section>, <nav>, <main>, <aside> e <footer>, assegurando a conformidade estrutural com critérios como 1.3.1 e 3.3.2.

O idioma da página foi corretamente declarado, os cabeçalhos seguiram ordem hierárquica adequada e foi incluído um agrupamento de campos de formulário, garantindo conformi-

ISBN: 978-989-36481-2-4

dade com critérios como 1.3.1, 3.1.1 e 3.3.2.

Não foi incluído conteúdo audiovisual, de modo que os critérios da diretriz 1.2 de mídias baseadas em tempo não se aplicam ao experimento.

Na etapa seguinte adicionamos as barreiras de acesso intencionais que não seriam plenamente detectadas por ferramentas de verificação automática. Elas serão explicadas abaixo.

Foi adicionada uma camada branca sobre toda a página, cobrindo a tela e dificultando o acesso por mouse e teclado, além de comprometer a leitura do conteúdo. Para evitar detecção imediata por análise de contraste, utilizou-se leve opacidade, permitindo visibilidade parcial do conteúdo. Essa intervenção compromete o princípio Perceptível, pois impede que o conteúdo e os componentes de navegação sejam adequadamente percebidos.

Adicionalmente, foi implementado um script para desabilitar a navegação por teclado, impossibilitando o acionamento de links e botões na página. Essa modificação compromete o princípio Operável.

No código HTML, foi incluída a seguinte meta tag específica para impedir o redimensionamento da página:

<meta name=”viewport” content= “user-scalable=no”>

Também foi adicionado o atributo aria-hidden=”true” ao elemento <body>, tornando o conteúdo invisível para tecnologias assistivas baseadas em leitores de tela.

O objetivo dessas intervenções foi criar uma situação em que a página mantivesse elevada conformidade estrutural com diversos critérios das WCAG, ao mesmo tempo em que apresentasse barreiras funcionais significativas.

A página foi então submetida a ferramentas automáticas de verificação listadas na “Web Accessibility Evaluation Tools List” [7] da Iniciativa de Acessibilidade Web do W3C. Foram priorizadas ferramentas com suporte às versões WCAG 2.0, 2.1 e 2.2. A utilização de múltiplas ferramentas justifica-se pelo fato de que diferentes validadores analisam subconjuntos distintos de critérios [8], o que permite uma comparação mais abrangente dos resultados.

Embora a página apresente elevada conformidade sintática com diversos critérios de sucesso, sua experiência de uso revela violações significativas dos princípios das WCAG. As intervenções realizadas comprometem, entre outros aspectos:

- O critério 1.1.1 (Conteúdo Não Textual), uma vez que imagens aplicadas via CSS não são identificadas como conteúdo relevante pelas ferramentas automáticas;
- O critério 2.1.1 (Teclado), devido ao bloqueio da navegação por meio de dispositivos de entrada;
- O critério 2.4.1 (Contornar Blocos), pois os mecanismos de navegação estrutural tornam-se inacessíveis após as intervenções realizadas;
- O critério 1.4.3 (Contraste Mínimo), pois a camada sobreposta compromete a legibilidade do conteúdo;
- O critério 2.4.7 (Foco Visível), tornando invisível a indicação de foco;
- O critério 3.3.2 (Rótulos ou Instruções), apesar da correta associação estrutural, os campos não são visíveis para as pessoas usuárias.

Partindo da hipótese de que nem todas essas barreiras seriam identificadas automaticamente pelos validadores automáticos, procedeu-se à execução dos testes com as ferramentas selecionadas.

IV. Execução do experimento

Na etapa seguinte do experimento, buscou-se verificar se o código desenvolvido seria considerado em conformidade por ferramentas de verificação automática, mesmo apresentando barreiras funcionais significativas relacionadas à navegação, percepção e operação da página.

Para cada ferramenta testada, registrou-se em relatório: o nome da ferramenta, a versão das diretrizes WCAG suportada (ou outro padrão utilizado), o número de erros identificados, o número de avisos emitidos e, quando disponível, a quantidade de itens verificados. Essas informações permitiram observar tanto o volume de problemas automaticamente detectados quanto os pontos indicados pelas próprias ferramentas para revisão humana.

As tabelas de resultados foram organizadas considerando o volume de erros reportados por cada ferramenta no primeiro ciclo de testes, em ordem crescente. Essa ordenação foi mantida nos ciclos subsequentes, excluindo-se apenas as ferramentas que foram descontinuadas ou que não estavam mais disponíveis nos períodos seguintes, a fim de preservar a comparabilidade longitudinal dos resultados.

Neste estudo, considerou-se como “erro” toda ocorrência classificada pela própria ferramenta como violação de critério de sucesso, independentemente do nível de severidade indicado. Os avisos foram registrados como recomendações para análise humana, sem serem computados como erros formais.

A variável independente considerada foi a ferramenta de verificação automática incluindo suas versões ao longo do tempo, enquanto o artefato avaliado (a página experimental) permaneceu inalterado nos três ciclos de teste, garantindo o controle da variável analisada.

O primeiro ciclo de testes foi realizado em 5 de junho de 2019, utilizando 20 ferramentas de verificação automática. Dentre elas, 13 não identificaram nenhum erro na página, 5 apontaram menos de 10 erros e apenas 2 registraram mais de 10 erros, conforme apresentado na Tabela I.

TABELA I. Verificação Executada Em 5 De Junho De 2019

Padrão	***Ferramenta***	***Erros***	***Avisos***	***Itens verificados***
WCAG 2.0	Examinator	0	-	85
WCAG 2.0	OAW Ecuador	0	7	85
WCAG 2.0	HTML CodeSniffer	0	0	25
WCAG 2.0	AccessMonitor	0	10	85

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Padrão	*Ferramenta*	*Erros*	*Avisos*	*Itens verificados*
WCAG 2.0	AChecker	0	87	-
WCAG 2.1	Color Contrast Accessibility Validator	0	-	-
WCAG 2.1	Taw	0	33	-
Outro	Ases Web	0	13	-
Outro	Google Light-house	0	11	-
WCAG 2.0	Wave	0	13	-
WCAG 2.0	Check My Colors	0	-	-
Outro	W3C Markup Validator	0	0	-
Outro	W3C CSS Validator	0	0	-
WCAG 1.0	Hera	2	38	86
WCAG 2.0	Hearcolors	2	13	-
Outro	Web Accessi-bility	2	-	-
WCAG 2.0	Functional Accessibility Evaluator 2.1	5	1	-
WCAG 2.0	CynthiaSays	6	-	-
WCAG 2.1	Mauve ++	16	2	-
WCAG 2.0	axe DevTools	42	-	-

A maioria das ferramentas não identificou erros formais relevantes. Os avisos emitidos por algumas delas, como o AccessMonitor, referiam-se principalmente à necessidade de verificação manual de contraste ou da visibilidade do mecanismo de salto para conteúdo. Isso reforça a importância de testes manuais de acessibilidade, já que uma página sem erro apresenta barreiras de acesso severas para pessoas com deficiência.

Os resultados foram arquivados para posterior comparação, considerando a possibilidade de atualizações nas ferramentas ao longo do tempo. Ressalta-se que o código HTML e CSS da página experimental permaneceu inalterado nos ciclos seguintes, garantindo o controle da variável analisada.

O segundo ciclo de testes foi realizado em 15 de junho de 2021, com 15 ferramentas disponíveis naquele momento. Entre elas, 8 não reportaram erros, 5 apontaram menos de 10 erros e 2 identificaram mais de 10 erros, conforme apresentado na Tabela II.

TABELA II. Verificação Executada Em 15 De Junho De 2021

Padrão	*Ferramenta*	*Erros*	*Avisos*	*Itens verificados*
WCAG 2.0	HTML CodeSniffer	0	7	-
WCAG 2.0	AccessMonitor	0	4	88
WCAG 2.1	Color Contrast Accessibility Validator	0	-	5
WCAG 2.1	Taw	0	24	-
Outro	Ases Web	0	17	-
Outro	Google Light-house	4	10	-
WCAG 2.0	Wave	0	13	-
WCAG 2.0	Check My Colors	21	-	-
Outro	W3C Markup Validator	0	1	-
Outro	W3C CSS Validator	0	0	-
Outro	Web Accessi-bility	2	-	266
WCAG 2.0	Functional Accessibility Evaluator 2.1	5	1	-
WCAG 2.0	CynthiaSays	6	-	-
WCAG 2.1	Mauve ++	3	2	-
WCAG 2.0	axe DevTools	43	7	-

Observou-se que algumas ferramentas anteriormente utilizadas haviam sido descontinuadas ou estavam indisponíveis. Comparativamente ao primeiro ciclo, verificaram-se diferenças nos resultados de ferramentas como Check My Colors, Google Lighthouse, Mauve++ e axe DevTools.

Considerando que o código da página não foi alterado, a variação nos resultados sugere atualizações nos mecanismos internos de verificação dessas ferramentas, possivelmente ampliando sua capacidade de detecção de determinados critérios.

O terceiro ciclo foi realizado em 10 de dezembro de 2025, com 12 ferramentas disponíveis. Nesse momento, 4 não apontaram erros, 5 registraram menos de 10 erros e 3 identificaram mais de 10 erros, conforme apresentado na Tabela III.

TABELA III. Verificação Executada Em 10 De Dezembro De 2025

Padrão	*Ferramenta*	*Erros*	*Avisos*	*Itens verificados*
WCAG 2.0	HTML CodeSniffer	0	7	-
WCAG 2.0	AccessMonitor	3	5	88
WCAG 2.1	AMAWeb	0	-	5
WCAG 2.2	Free Accessi-bility Checker	42	-	-
Outro	Ases Web	1	13	-
Outro	Google Light-house	5	10	-
WCAG 2.0	Wave	0	11	-
Outro	W3C Markup Validator	1	1	-
Outro	W3C CSS Validator	0	0	-
WCAG 2.2	moutvalid	12	-	21

ISBN: 978-989-36481-2-4

Padrão	*Ferramenta*	*Erros*	*Avisos*	*Itens verificados*
WCAG 2.1	Mauve ++	1	5	-
WCAG 2.0	axe DevTools	41	0	-

Observou-se que algumas ferramentas passaram a identificar problemas não anteriormente sinalizados, como o uso de atributo inadequado em uma tag HTML da página, detectado pelo AccessMonitor e pelo validador de Markup do W3C.

De forma geral, os três ciclos evidenciam que, mesmo com evolução gradual em determinadas ferramentas, a maioria dos validadores automáticos continuou apresentando baixa detecção de barreiras funcionais críticas introduzidas intencionalmente na página experimental. Reconhece-se, contudo, que as ferramentas analisadas possuem escopos distintos de cobertura e aplicam critérios próprios de classificação, o que pode influenciar a quantidade de ocorrências registradas.

V. Análise dos resultados

Inicialmente, como a página foi desenvolvida com o objetivo de atender aos critérios estruturais de validação, os primeiros testes apresentaram resultados majoritariamente favoráveis do ponto de vista sintático. A estratégia adotada consistiu em manter a conformidade formal com diversos critérios de sucesso, ao mesmo tempo em que existem barreiras funcionais intencionais. Entre essas barreiras, destacam-se o uso de atributos destinados a impedir o redimensionamento da tela e a ocultação de conteúdos de tecnologias assistivas por meio do atributo aria-hidden=”true”.

Os resultados do primeiro ciclo evidenciam que a maioria das ferramentas não identificou erros significativos, mesmo diante de barreiras que comprometiam diretamente a percepção e a operação da página. Esse achado reforça a distinção entre conformidade estrutural e acessibilidade efetiva, sugerindo que a detecção automática permanece limitada a aspectos predominantemente sintáticos baseados no código fonte da página.

Com o passar do tempo, observou-se evolução em determinadas ferramentas. Algumas passaram a identificar o uso inadequado do atributo aria-hidden=”true” em elementos que recebem foco por teclado, como links e campos de formulário, conforme apontado por ferramentas como Lighthouse e axe DevTools. Adicionalmente, o validador de marcação do W3C passou a classificar o atributo content=”user-scalable=no” como aviso, indicando maior sensibilidade a práticas potencialmente restritivas.

Ferramentas específicas de análise de contraste também demonstraram aprimoramento ao incorporar suporte a propriedades de CSS, como opacity, frequentemente utilizadas para reduzir o contraste visual sem alterar diretamente as cores declaradas. Nesse contexto, a ferramenta Check My Colors, que anteriormente não reportava inconsistências, passou a indicar erros nas análises mais recentes.

Essas mudanças sugerem que houve ampliação gradual da capacidade de detecção automática ao longo do período analisado, o que responde parcialmente à questão relacionada à evolução das ferramentas. No entanto, mesmo no terceiro ciclo de testes, persistiu um cenário em que parte significativa dos validadores não identificou barreiras funcionais críticas introduzidas na página experimental.

Outro aspecto observado foi a descontinuidade de diversas ferramentas utilizadas no primeiro ciclo, que não estavam mais disponíveis nos testes posteriores. Esse fator evidencia a instabilidade do ecossistema de validadores automáticos e pode impactar tanto a comparabilidade longitudinal quanto a confiabilidade de processos de avaliação baseados exclusivamente nessas ferramentas.

Deve-se considerar que o experimento foi conduzido a partir de um único artefato experimental, desenvolvido com características específicas para testar limitações de validação automática. Além disso, as ferramentas analisadas possuem escopos e metodologias internas distintas, o que pode influenciar a quantidade e a classificação das ocorrências registradas.

De forma geral, os resultados indicam que, embora haja progresso incremental na capacidade de verificação automática, permanece uma discrepância entre a validação formal de critérios e a acessibilidade efetiva da interface. No primeiro ciclo de testes, por exemplo, a maioria das ferramentas (13 de 20) não identificou qualquer erro, mesmo diante de barreiras funcionais críticas introduzidas intencionalmente. Esse resultado evidencia que a conformidade sintática não garante acessibilidade efetiva. Nesse contexto, reforça-se a necessidade de abordagens híbridas, conforme orientado pelo WCAG-EM [9], que recomenda a integração entre ferramentas automatizadas e análise humana estruturada.

VI. Conclusões

Este estudo investigou as limitações da verificação automática de conformidade com as diretrizes WCAG por meio de um experimento controlado, no qual uma página foi desenvolvida para maximizar a conformidade sintática, mantendo simultaneamente barreiras funcionais intencionais.

Os resultados evidenciam que, embora ferramentas automáticas sejam essenciais para otimizar processos de avaliação e identificar problemas estruturais, sua capacidade de detectar barreiras funcionais críticas ainda é limitada. No primeiro ciclo de testes, a maioria das ferramentas não identificou erros relevantes, mesmo diante de violações que comprometiam diretamente a percepção e a operação da página. Esse cenário confirma que conformidade estrutural não garante acessibilidade efetiva.

Observou-se evolução gradual em determinadas ferramentas ao longo dos ciclos realizados em 2019, 2021 e 2025, especialmente na identificação de uso inadequado de atributos como aria-hidden e em análises relacionadas a contraste e redimensionamento. No entanto, mesmo com esses avanços, persistiram lacunas significativas na detecção automática de barreiras introduzidas intencionalmente.

Esses achados indicam que a verificação automática, quando utilizada de forma isolada, pode levar à classificação de páginas como acessíveis mesmo na presença de obstáculos substanciais ao uso por pessoas com deficiência. Nesse contexto, reforça-se a importância da adoção de abordagens híbridas, combinando ferramentas automatizadas e análise humana qualificada por

ISBN: 978-989-36481-2-4

profissionais com conhecimento de padrões Web, como estratégia mais adequada para avaliação de acessibilidade na Web.

Reconhece-se, contudo, que o experimento foi conduzido a partir de um único artefato experimental e que as ferramentas analisadas possuem escopos distintos de cobertura. Ainda assim, os resultados contribuem com evidências empíricas para o debate sobre os limites da validação automática e sobre a necessidade de integração entre conformidade normativa e experiência real de uso.

VII. Trabalhos Futuros

Como continuidade deste estudo, iniciamos investigações relacionadas ao uso de ferramentas baseadas em inteligência artificial, especialmente modelos de linguagem de grande porte (Large Language Models — LLMs), na verificação de acessibilidade.

Os testes em andamento buscam avaliar se essas ferramentas são capazes de identificar barreiras que não são detectadas por validadores automáticos tradicionais, bem como analisar sua capacidade de auxiliar na verificação de critérios de sucesso que dependem predominantemente de avaliação humana, como a adequação semântica de descrições textuais e a compreensão contextual do conteúdo e requisitos previstos na diretriz 1.2 das WCAG (Mídias Baseadas em Tempo), que envolvem, por exemplo, a presença e a qualidade de legendas, audiodescrição e outras alternativas para conteúdo audiovisual.

A expectativa é compreender se modelos baseados em inteligência artificial podem atuar como complemento às ferramentas automatizadas convencionais, contribuindo para reduzir a lacuna identificada entre conformidade sintática e acessibilidade efetiva.

Adicionalmente, pretende-se ampliar o escopo experimental com a inclusão de diferentes tipos de páginas e aplicações, especialmente aquelas desenvolvidas com frameworks JavaScript modernos e conteúdos gerados dinamicamente. Essa ampliação permitirá investigar se as limitações observadas na detecção automática de barreiras de acessibilidade persistem em contextos mais complexos e próximos de aplicações reais.

Também se pretende aprofundar a combinação entre verificação automatizada e avaliação manual estruturada, com base em metodologias como o WCAG-EM [9].

Referências Bibliográficas

[1] P. D. Brajnik, "Automatic web accessibility evaluation: What needs to be done?," Proc. Int. Cross-Disciplinary Conf. Web Accessibility (W4A), 2004, pp. 1–10.

[2] J. P. Bigham, A. C. Cavender, J. T. Brudvik, and R. E. Ladner, "WebInSight: making web images accessible," Proc. 10th Int. ACM SIGACCESS Conf. Computers and Accessibility (Assets), 2008, pp. 181–188. doi: 10.1145/2461121.2461124.

[3] J. Lazar, A. Dudley-Sponaugle, and K.-D. Greenidge, "Improving web accessibility: a study of webmaster perceptions," Behaviour & Information Technology, vol. 26, no. 5, pp. 447–465, 2007. doi: 10.1080/07370024.2011.601670.

[4] A. Alghamdi, M. Sulaiman, A. Alghamdi, M. Alhosan, M. Mastali, and J. Zhang, "Building accessibility code compliance verification using game simulations in virtual reality," in Computing in Civil Engineering 2017, Reston, VA, USA: American Society of Civil Engineers (ASCE), 2017, pp. 262–270.

[5] World Wide Web Consortium (W3C), "Diretrizes de Acessibilidade para Conteúdo Web (WCAG) 2.2 — Tradução em Português do Brasil," W3C Recommendation, Oct. 2023. [Online]. Available: https://www.w3.org/Translations/WCAG22-pt-BR/. Accessed: Feb. 13, 2026.

[6] World Wide Web Consortium (W3C), "Accessible Rich Internet Applications (WAI-ARIA) 1.2," W3C Recommendation, Jun. 2023. [Online]. Available: https://www.w3.org/TR/wai-aria/. Accessed: Feb. 13, 2026.

[7] World Wide Web Consortium (W3C), "Web Accessibility Evaluation Tools List," W3C Web Accessibility Initiative (WAI). [Online]. Available: https://www.w3.org/WAI/test-evaluate/tools/list/. Accessed: Feb. 13, 2026.

[8] C. P. Kouroupetroglou and A. D. Kacorri, "Accessibility evaluation of e-learning systems," Electronic Notes in Theoretical Computer Science, vol. 150, no. 1, pp. 95–103, 2006. doi: 10.1016/j.entcs.2006.01.024.

[9] World Wide Web Consortium (W3C), "Website Accessibility Conformance Evaluation Methodology (WCAG-EM) 1.0," W3C Working Group Note, Feb. 2014. [Online]. Available: https://www.w3.org/TR/WCAG-EM/. Accessed: Mar. 3, 2026.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Avances en la Auditoría de Privacidad Basada en Ontologías para la Salud Móvil (*mHealth*)
Advances in Ontology-Driven Privacy Auditing for mHealth

Alejandro Pérez-Fuente, M. Mercedes Martínez-González
Grupo de Ingeniería de la Privacidad (IngPriv)
Universidad de Valladolid
Valladolid, España
alejandro.perez.fuente@uva.es, mercedes@infor.uva.es

***Resumen* — La gestión de la privacidad y la seguridad en el ecosistema del Internet de Todo (IoE) se ha convertido en un desafío crítico, especialmente en el ámbito de la salud móvil (*mHealth*), donde aplicaciones y dispositivos *wearables* procesan datos altamente sensibles de forma continua. Aunque existen repositorios masivos de aplicaciones móviles que facilitan el análisis empírico, estos carecen con frecuencia de metadatos contextualizados y actualizados sobre riesgos de privacidad, lo que dificulta la validación de herramientas de auditoría y la construcción de *Privacy-Enhancing Technologies* (PETs) robustas. Esta limitación impide disponer de un marco de referencia fiable (*ground truth*) que permita detectar inconsistencias, evaluar riesgos y mejorar la calidad de las garantías ofrecidas a desarrolladores y usuarios. Ante este vacío, la presente tesis desarrolla un enfoque innovador basado en la integración de ontologías y técnicas de Inteligencia Artificial para enriquecer semánticamente los metadatos y optimizar su explotación en repositorios especializados. En este artículo se presentan los avances alcanzados en la tesis doctoral.**

Palabras **Clave – privacidad; mHealth; aplicaciones móviles; ontologías; PET.**

***Abstract* — Privacy and security management within the Internet of Everything (IoE) ecosystem has become a critical challenge, particularly in the field of mobile health (mHealth), where applications and wearable devices continuously process highly sensitive data. Although large-scale mobile application repositories facilitate empirical analysis, they often lack contextualised and up-to-date metadata regarding privacy risks, which hinders the validation of auditing tools and the development of robust Privacy-Enhancing Technologies (PETs). This limitation prevents the establishment of a reliable ground truth capable of detecting inconsistencies, assessing risks, and improving the quality of the guarantees provided to developers and end users. To address this gap, this PhD research develops an innovative approach based on the integration of ontologies and Artificial Intelligence techniques to semantically enrich metadata and optimise their exploitation within specialised repositories. This article presents the progress made in the doctoral thesis.**

Keywords - privacy; mHealth; mobile applications; ontologies; PET.

I. Introducción

La gestión de la privacidad en el ecosistema del Internet de Todo (IoE) se ha vuelto una tarea sumamente compleja, impulsada por el procesamiento masivo de datos personales a través de una red de dispositivos interconectados [1]. En este escenario, los dispositivos *wearables* han suscitado un creciente interés en la comunidad científica al funcionar como sensores de monitorización continua del usuario. Cuya capacidad de seguimiento persistente plantea desafíos críticos que comprometen tanto la seguridad como la privacidad de la información recolectada [2,3].

No obstante, las implicaciones de seguridad trascienden la mera recolección de datos. Estos dispositivos actúan como fuentes de datos que nutren el ecosistema de la salud móvil (*mHealth*), donde la información se gestiona, almacena y analiza para la toma de decisiones clínicas o de bienestar. En el ámbito de *mHealth*, diversas investigaciones han documentado vulnerabilidades alarmantes y riesgos de exposición de datos sensibles que ponen en entredicho la confianza en estas tecnologías [4-6]. Como respuesta a estos problemas, han surgido las denominadas *Privacy-Enhancing Technologies* (PETs), sistemas diseñados para la detección y prevención de estos [7]. Algo imprescindible para proveer garantías de protección robustas acordes a la sensibilidad de los derechos en juego.

Sin embargo, el desarrollo y validación de estas soluciones se enfrenta a un obstáculo: la carencia de metadatos contextuales. Si bien existen repositorios de aplicaciones a gran escala, como AndroZoo [8], que permiten el acceso a volúmenes masivos de software, estos carecen a menudo de información específica sobre riesgos de privacidad. Esta ausencia impide que los desarrolladores e investigadores dispongan de un marco de referencia (*ground truth*) efectivo para validar sus herramientas y detectar conflictos de forma automatizada [9].

En este contexto, la combinación de ontologías y técnicas de Inteligencia Artificial (IA) ofrece un paradigma prometedor para optimizar la gestión y el análisis semántico de metadatos. Mientras que las ontologías proporcionan una representación estructurada que permite organizar y consultar el conocimiento de forma lógica, la IA posibilita la detección automática de inconsistencias y la generación de soluciones a escala. Bajo esta premisa, la presente tesis investiga el potencial de estas herramientas para elevar la calidad de los metadatos en repositorios especializados. Mediante su aplicación en un reposi-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

torio preexistente, el trabajo trasciende la función meramente descriptiva de las ontologías de privacidad para otorgarles un rol operativo. La principal innovación radica en la creación de un sistema híbrido que, al integrar lógica formal y capacidad computacional, transforma el conocimiento teórico en evidencia empírica capaz de detectar riesgos para usuarios y desarrolladores.

El resto del artículo se estructura de la siguiente manera: en la Sección II se describen las hipótesis y objetivos que forman la base del trabajo; en la Sección III se recopilan trabajos pasados de relevancia para la tesis; en la Sección IV se detalla la metodología que se emplea para la investigación de la tesis; y, en la Sección V, se exponen las conclusiones.

II. Hipótesis y Objetivos

La tesis se articula en torno a la siguiente hipótesis de trabajo, cuya validación se está abordando progresivamente: la integración de ontologías con técnicas de IA permite la construcción de mejores herramientas PET (*Privacy-Enhancing Technologies*) mediante un análisis semántico avanzado de los metadatos de las aplicaciones.

El objetivo principal de esta tesis es proponer, desarrollar y validar un enfoque que combine marcos ontológicos con técnicas de Inteligencia Artificial para potenciar la calidad y usabilidad de los metadatos en los repositorios de aplicaciones. Todo ello con el fin último de dar soporte a la gestión de la privacidad y la seguridad en el contexto del Internet de Todo (IoE).

A. Objetivos

A partir del objetivo principal, se definen como subobjetivos los siguientes:

1. Optimizar la gestión, consulta avanzada y análisis de metadatos de aplicaciones a través de técnicas de IA.
2. Diseñar e integrar marcos ontológicos que estructuren las relaciones entre datos y elementos de privacidad en entornos IoE, proponiendo una formalización de la coherencia entre las distintas fuentes de información.
3. Proponer, desarrollar y probar herramientas PET que combinen ontologías e IA para detectar riesgos de privacidad, validándolas en repositorios reales.
4. Proporcionar herramientas de visualización que faciliten la interpretación de los riesgos en privacidad para reducir la brecha entre el análisis técnico y la comprensión del usuario.

III. Estado del arte y Trabajo Relacionado

La revisión del estado del arte abarca el estudio de la privacidad en aplicaciones móviles, la disponibilidad de repositorios de metadatos y el potencial de las ontologías combinadas con la Inteligencia Artificial.

A. Privacidad y aplicaciones móviles

Las aplicaciones móviles son objeto de constantes estudios debido a su potencial impacto en la privacidad de los usuarios al ser dispositivos de uso diario. Si bien se han analizado sectores como las aplicaciones de mensajería, el control parental, etc. [10-12], el ecosistema de salud móvil (*mHealth*) ha adquirido una relevancia crítica debido a la alta sensibilidad de los datos que maneja. Las aplicaciones móviles de salud han sido analizadas exhaustivamente desde las dimensiones de seguridad y privacidad. En el ámbito de la ciberseguridad, la investigación se ha centrado en la verificación de políticas, el uso de protocolos de autenticación y firma segura, así como en estándares de cifrado e implementaciones de *blockchain* para proteger la integridad de la información [13-15]. En cuanto a la privacidad, los estudios subrayan una falta de transparencia en el tratamiento de los datos y la ausencia de mecanismos eficaces para la gestión de accesos [5,6,16,17].

B. Repositorios de metadatos y privacidad

Los repositorios de metadatos son una pieza fundamental para la investigación empírica sobre privacidad [9]. Proyectos de gran escala como AndroZoo, Exodus Privacy y PrivacyGrade han facilitado el análisis masivo de aplicaciones Android mediante la recolección de APKs y señales estáticas de privacidad [8,18,19]. Sin embargo, la mayoría de estas iniciativas presentan una limitación crítica en su alcance, ya que no incorporan elementos de privacidad y seguridad, como la sección de Seguridad de los Datos de Google Play[1]. Esta desactualización conlleva la omisión de hitos de privacidad fundamentales, tales como el sistema *Health Connect*[2] o el nuevo modelo de permisos vigente en Android [20].

C. Ontologías e Inteligencia Artificial

La integración de ontologías e inteligencia artificial se ha consolidado como una estrategia eficaz para potenciar sistemas inteligentes en entornos complejos y cambiantes. En ámbitos como el monitoreo industrial, la ciberseguridad y la predicción de eventos, las ontologías enriquecen semánticamente los datos, facilitan su integración desde múltiples fuentes y estructuran el conocimiento para que la IA lo explote mediante técnicas avanzadas de análisis y razonamiento [21-23].

En el ámbito de la privacidad y los datos personales destacan especialmente el *Data Privacy Vocabulary* (DPV) [24], que proporciona una taxonomía estandarizada de conceptos sobre el procesamiento de datos personales, finalidades y bases legales basado en el Reglamento General de Protección de Datos, y *DataSecOnt* [25], una ontología orientada a la privacidad que permite modelar de forma estructurada los tipos de datos que Google emplea en sus *privacy labels*.

IV. Metodología

El proyecto se fundamenta en los principios de la ingeniería de software y el diseño de sistemas, bajo el marco de Design Science Research (DSR). La metodología se estructura en cuatro fases iterativas: 1) Revisión de Literatura, que corresponde a la identificación del problema y motivación de DSR; 2) Desarrollo de la Ontología y Modelos de IA, alineada con la definición de objetivos de la solución; 3) Diseño e Implementación, que cubre el diseño y desarrollo tanto de la infraestructura como del prototipo; y 4) Pruebas de Concepto y Conclusiones, que

[1] https://support.google.com/googleplay/android-developer/answer/10787469
[2] https://developer.android.com/health-and-fitness/health-connect

ISBN: 978-989-36481-2-4

se corresponden con las etapas de demostración, evaluación y comunicación. Esta estructura garantiza un enfoque práctico y validado para abordar el problema de la privacidad y seguridad en el IoE.

A. Fases

En la Figura 1 se muestra un diagrama que contiene cada una de las fases de la metodología y sus resultados esperados.

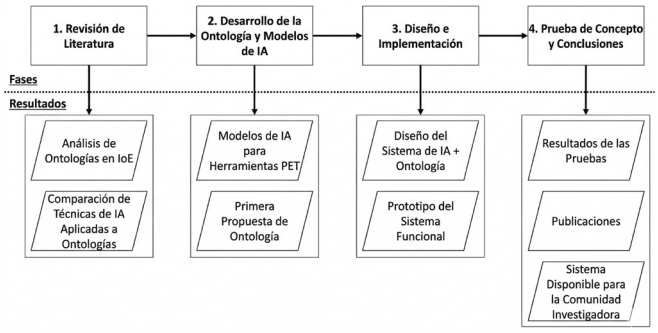


Figura 1. Metodología: Fases y Resultados Esperados.

1. Revisión de Literatura

Se lleva a cabo una revisión exhaustiva de la literatura sobre privacidad digital, gestión de metadatos, IA, ontologías y tecnologías de protección de la privacidad en el contexto del IoE. Esta fase se encuentra actualmente en progreso y ha permitido identificar los principales avances en el área y las lagunas de conocimiento existentes sobre las que se está trabajando.

2. Desarrollo de la Ontología y Modelos de IA

En esta fase, se desarrollan modelos de auditoría utilizando distintas aproximaciones: documental, de declaraciones, basada en análisis estático, con ontologías, etc. Por ahora, se han centrado los avances en el ecosistema de *mHealth*, donde se ha visto el potencial uso de las ontologías y como se podría hacer un uso integrado de estas [26-29]. Se ha llevado a cabo el primer estudio haciendo uso de las ontologías *DataSecOnt* y DPV [30]. Además, se está planificando la integración de estas con el uso de IAs.

3. Diseño e Implementación

En esta fase se diseñan e implementan los sistemas que utilizan los resultados de la fase anterior junto con arquitecturas de datos avanzadas para manejar grandes volúmenes de metadatos, que garanticen un almacenamiento eficiente y permitan consultas avanzadas, así como herramientas de visualización para facilitar la interpretación de los riesgos asociados al tratamiento de datos personales.

4. Prueba de concepto y Conclusiones

Esta fase incluye pruebas para evaluar el impacto de las soluciones propuestas. Se llevará a cabo una validación mediante la participación de usuarios y expertos en seguridad y privacidad, con el objetivo de ajustar las herramientas y validar su efectividad en la mejora de la gestión de la privacidad y la seguridad.

B. Desarrollo temporal y progreso de la investigación

Se plantea la realización en un plazo de tres años[3], con la siguiente distribución:

1. *Año 1: Inicio de la fase de revisión del estado del arte y primeras propuestas para herramientas PET.*

   Durante el primer año de investigación, se han alcanzado hitos significativos que sientan las bases operativas y conceptuales de la tesis. En primer lugar, se ha llevado a cabo la evolución y enriquecimiento semántico del repositorio App-PIMD, transformándolo de un almacenamiento estático en un ecosistema de datos multidimensional [29]. Esta mejora permite la integración de metadatos heterogéneos, como las políticas de privacidad y los indicadores de las *privacy labels* de Google Play. Este avance constituye un prerrequisito metodológico fundamental. Al dotar a la investigación de un conjunto de datos estructurado, permite la posterior formalización de la información mediante ontologías. De este modo, se superan las limitaciones de representatividad de los grandes repositorios preexistentes.

   Paralelamente, se ha avanzado en el modelado ontológico de la privacidad mediante estudios específicos en el sector de la salud móvil (*mHealth*). Estos trabajos analizan la privacidad desde dimensiones críticas como la transparencia [26] y la arquitectura de los sistemas gestores de metadatos de salud [27]. Sus resultados demuestran que es necesario formalizar los metadatos mediante vocabularios u ontologías para lograr una identificación de riesgos trazable y escalable. Estableciéndose el vocabulario DPV [24] y la ontología *DataSecOnt* [25] como potenciales bases conceptuales.

   Este tipo de marcos conceptuales permiten el uso de propiedades y operaciones avanzadas sobre los metadatos, como la inferencia o la subsunción. Por ejemplo, mediante el uso de ontologías que modelan semánticamente las políticas de privacidad con las *privacy labels*, se puede vincular semánticamente. Posteriormente, mediante la subsunción, el marco permite la comparación formal entre ambos documentos para garantizar su coherencia y correspondencia de forma trazable.

2. *Año 2: Desarrollo de modelos IA combinados con ontologías.*

   En la fase actual de la investigación, se ha materializado este marco conceptual mediante una propuesta de auditoría de lealtad de las declaraciones de privacidad, la cual ya ha sido aceptada para su publicación [30]. Utilizando los marcos ontológicos DPV [24] y DataSecOnt [25] como base, este trabajo permite automatizar la detección de discrepancias entre las políticas de privacidad y las

[3] A fecha actual (marzo 2026) el estudiante se encuentra al principio de su segundo año de tesis.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

privacy labels de Google Play. Los resultados preliminares revelan una brecha significativa en la lealtad del ecosistema *mHealth*: solo el 60,8% de las aplicaciones mantienen una coherencia total en las declaraciones. Además, también se ha identificado que más de un tercio de las aplicaciones que tratan datos de salud omiten esta declaración en la tienda y que un 38,9% incurre en sobredeclaración o etiquetado preventivo.

Este hito representa el primer paso crítico para la consecución de modelos avanzados que integran ontologías con IA, validando la viabilidad del uso de ontologías para el análisis de riesgos de privacidad con una capa superior que de trazabilidad y explicabilidad superior a los métodos de análisis tradicionales. La evaluación de este trabajo se ha realizado mediante un análisis estadístico comparando los resultados del análisis frente a un *ground truth* reducido, elaborado manualmente.

Para el cierre de este periodo, se prevé la consolidación de estos análisis ontológicos con IA para potenciarlos mediante herramientas PET (Privacy-Enhancing Technologies). El esfuerzo se centrará en:

El diseño arquitectónico del sistema integral, donde se armonizarán las técnicas de IA con la estructura semántica de las ontologías para garantizar consultas avanzadas y un razonamiento lógico a escala.

La implementación de un sistema en fase de producción, que servirá como entorno de ejecución para las pruebas de concepto sobre repositorios reales.

La integración de herramientas de visualización de riesgos, orientadas a reducir la brecha técnica y facilitar la interpretación de indicadores de privacidad tanto para desarrolladores como para usuarios finales.

3. *Año 3: Pruebas y conclusiones. Se realizarán pruebas con casos de estudio para comprobar la validez de las propuestas surgidas de este trabajo. Para ello se realizarán un conjunto de pruebas con aplicaciones cuyas vulnerabilidades o defectos son conocidas, comprobando si las herramientas propuestas son capaces de detectarlas correctamente. Paralelamente, se validarán los sistemas con expertos en seguridad y privacidad. Análisis de los resultados obtenidos y conclusiones.*

   Resultados esperados:

   - Datos con los resultados de las pruebas realizadas.
   - Conclusiones.
   - Publicaciones.
   - Productos disponibles para su utilización por la comunidad investigadora y el colectivo de desarrolladores.

Conclusiones

Hasta el momento, la tesis ha demostrado la viabilidad de enriquecer semánticamente repositorios de aplicaciones móviles y ha puesto de manifiesto el potencial de integrar ontologías con modelos de IA para la detección de inconsistencias en sus metadatos. En este contexto, y con el objetivo de proteger eficazmente la privacidad y la seguridad en entornos IoE, el trabajo avanza en la provisión de herramientas que apoyen a desarrolladores, expertos y usuarios en la mejora de la calidad de dicha protección. En particular, se explora la combinación de ontologías y técnicas de IA aplicadas a repositorios de metadatos para el desarrollo de herramientas PET que permitan elevar el nivel de calidad en los desarrollos actuales.

Agradecimientos

Este trabajo se incluye en las actividades del Proyecto Estratégico de Ciberseguridad App-PI (App Privacy Impact): Un ecosistema para la evaluación del impacto de apps para dispositivos móviles sobre la privacidad y seguridad de sus usuarios (C120.23_UVa), el cual se realiza al amparo de un convenio de colaboración entre la Universidad de Valladolid y la S.M.E. Instituto Nacional de Ciberseguridad de España M.P., S.A. para la promoción de proyectos estratégicos de Ciberseguridad en España, en el marco de los Fondos del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia, financiados por la Unión Europea (Next Generation).

Este trabajo ha sido financiado parcialmente por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades de España, en el marco del programa de ayudas para la Formación de Profesorado Universitario (FPU24/04222).

Referencias Bibligráficas

[1] Iftikhar, A., & Qureshi, K. N. (2023). Future privacy and trust challenges for IoE networks. En *Cybersecurity vigilance and security engineering of Internet of Everything* (pp. 193–218). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-45162-1_12

[2] Niksirat, K. S., Velykoivanenko, L., Zufferey, N., Cherubini, M., Huguenin, K., & Humbert, M. (2024). Wearable activity trackers: A survey on utility, privacy, and security. *ACM Computing Surveys*, *56*(7), Artículo 176. https://doi.org/10.1145/3645091

[3] Datta, P., Namin, A. S., & Chatterjee, M. (2018). A survey of privacy concerns in wearable devices. *2018 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 4549–4553. https://doi.org/10.1109/BigData.2018.8622110

[4] Cory, T., Rieder, W., & Huynh, T.-M. (2024). A qualitative analysis framework for mHealth privacy practices. *2024 IEEE European Symposium on Security and Privacy Workshops* (EuroS&PW), 24–31. https://doi.org/10.1109/EuroSPW61312.2024.00010

[5] Braghin, C., Cimato, S., & Della Libera, A. (2018). Are mHealth apps secure? A case study. *2018 IEEE 42nd Annual Computer Software and Applications Conference* (COMPSAC), 2, 335–340. https://doi.org/10.1109/COMPSAC.2018.10253

[6] Papageorgiou, A., Strigkos, M., Politou, E., Alepis, E., Solanas, A., & Patsakis, C. (2018). Security and privacy analysis of mobile health applications: The alarming state of practice. *IEEE Access*, 6, 9390–9403. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2799522

[7] Majeed, A., Bhana, R., Haq, A., Kyaruzi, I., Pervaz, S., & Williams, M. L. (2016). Internet of everything (IoE): analysing the individual concerns over privacy enhancing technologies (pets). *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.* (IJACSA), 7(3).

[8] Allix, K., Bissyandé, T. F., Klein, J., & Le Traon, Y. (2016). AndroZoo: Collecting millions of Android apps for the research community. *Proceedings of the 13th International Conference on Mining Software Repositories*, 468–471. https://doi.org/10.1145/2901739.2903508

[9] Geiger, F.-X., & Malavolta, I. (2018). Datasets of Android applications: A literature review. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.10069

[10] Feal, A., Calciati, P., Vallina-Rodriguez, N., Troncoso, C., & Gorla, A. (2020). Angel or devil? A privacy study of mobile parental control apps. *Proceedings on Privacy Enhancing Technologies*, 2020(2), 314–335. https://doi.org/10.2478/popets-2020-0029

[11] Leith, D. J. (2022). What data do the Google Dialer and Messages apps on Android send to Google? SecureComm 2022: *18th EAI International*

Conference on Security and Privacy in Communication Networks, 549–568. https://doi.org/10.1007/978-3-031-25538-0_29

[12] Liu, H., Leith, D. J., & Patras, P. (2023). Android OS privacy under the loupe: A tale from the East. *Proceedings of the 16th ACM Conference on Security and Privacy in Wireless and Mobile Networks* (WiSec '23), 31–42. https://doi.org/10.1145/3559009.3590203

[13] Shojaei, P., Vlahu-Gjorgievska, E., & Chow, Y. W. (2024). Security and privacy of technologies in health information systems: A systematic literature review. *Computers*, 13(2), Artículo 41. https://doi.org/10.3390/computers13020041

[14] Santos, J. A., Inacio, P. R., & Silva, B. M. (2021). Towards the use of blockchain in mobile health services and applications. *Journal of Medical Systems*, 45, Artículo 17. https://doi.org/10.1007/s10916-021-01704-5

[15] Ali, A., Al-Rimy, B. A. S., Alsubaei, F. S., Almazroi, A. A., & Almazroi, A. A. (2023). Healthlock: Blockchain-based privacy preservation using homomorphic encryption in internet of things healthcare applications. *Sensors*, 23(15), 6762. https://doi.org/10.3390/s23156762

[16] Fan, M., Yu, L., Chen, S., Zhou, H., Luo, X., Li, S., ... [incluir otros autores si figuran en la fuente original]. (2020). An empirical evaluation of GDPR compliance violations in Android mHealth apps. *2020 IEEE 31st International Symposium on Software Reliability Engineering* (ISSRE), 253–264. https://doi.org/10.1109/ISSRE5003.2020.00032

[17] Benjumea, J., Ropero, J., Rivera-Romero, O., Dorronzoro-Zubiete, E., & Carrasco, A. (2020). Assessment of the fairness of privacy policies of mobile health apps: Scale development and evaluation in cancer apps. *JMIR mHealth and uHealth*, *8*(2), Artículo e17134. https://doi.org/10.2196/17134

[18] Jin, H., Liu, M., Dodhia, K., Li, Y., Srivastava, G., Fredrikson, M., Agarwal, Y., & Hong, J. I. (2018). Why are they collecting my data?: Inferring the purposes of network traffic in mobile apps. *Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies*, *2*(4), Artículo 173. https://doi.org/10.1145/3287051

[19] Zhou, H., Li, W., Zhang, B., Ji, Q., Tan, Y., & Na, C. (2021). MAKG: A mobile application knowledge graph for the research of cybersecurity. En B. Qin, Z. Jin, H. Wang, J. Pan, Y. Liu, & B. An (Eds.), *Knowledge graph and semantic computing: Knowledge graph empowers new infrastructure construction* (pp. 321–328). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-6471-7_26

[20] Mayrhofer, R., Stoep, J. V., Brubaker, C., Hackborn, D., Bonné, B., Tuncay, G. S., Jover, R. P., & Specter, M. (2023). The Android platform security model. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.05572

[21] Hendriks, J., Azarm, M., & Dumond, P. (2024). Structured data ontology for AI in industrial asset condition monitoring. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 13(2), Artículo 23. https://doi.org/10.3390/jsan13020023

[22] Preuveneers, D., & Joosen, W. (2024). An ontology-based cybersecurity framework for AI-enabled systems and applications. *Future Internet*, 16(3), Artículo 69. https://doi.org/10.3390/fi16030069

[23] Amarà, J., Ströele, V., Braga, R., & David, J. M. N. (2024). From context to forecast: Ontology-based data integration and AI for events prediction. En *Proceedings of the 38th International Conference on Advanced Information Networking and Applications* (AINA-2024): Vol. 201. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies* (pp. 349–361). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-57870-0_31

[24] Pandit, H. J., Esteves, B., Krog, G. P., Ryan, P., Golpayegani, D., & Flake, J. (2025). Data privacy vocabulary (DPV) – version 2.0. En G. Demartini, K. Hose, M. Acosta, M. Palmonari, G. Cheng, H. Skaf-Molli, N. Ferranti, D. Hernández, & A. Hogan (Eds.), *The Semantic Web – ISWC 2024* (pp. 171–193). Springer Nature Switzerland.

[25] Gavino-Dias González, A. , Martínez-González, M. M. , & Pérez-Fuente, A. (2026). DataSecOnt: Ontología para la seguridad de los datos de Google Play. En *Actas de la XIX Reunión Española sobre Criptología y Seguridad de la Información* (RECSI 2026). [En prensa].

[26] Pérez-Fuente, A., Criado-Lozano, P.-A.; Martínez-González, M.M.. (2025). Fake Transparency: When Mobile Apps Say One Thing but Do Another. *Proceedings of Fourth European Workshop on Algorithmic Fairness*, in *Proceedings of Machine Learning Research* 294:369-375 Available from https://proceedings.mlr.press/v294/perez-fuente25a.html

[27] Pérez-Fuente, A., Martínez-González, M. M., Aparicio, A., & Criado-Lozano, P. A. (2025). ¿Es Health Connect la mejor garantía de Seguridad y Privacidad para los datos de salud? En *Actas de las X Jornadas Nacionales de Investigación en Ciberseguridad* (JNIC 2025). Universidad de Zaragoza. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=10228851

[28] Pérez-Fuente, A., & Martínez-González, M.M. (2026). PhD Proposal: Ontologies and Artificial Intelligence for Privacy Assessment in the Internet of Everything. En *Proceedings of the 17th International Conference on Ubiquitous Computing and Ambient Intelligence* (UCAmI 2025). Springer Nature. [En prensa]

[29] Pérez-Fuente, A., Martínez-González, M. M., Aparicio, A., & Criado-Lozano, P. A. (2026). Metadata-Based Privacy Assessment for Mobile mHealth. *Sensors*, 26(3), 870. https://doi.org/10.3390/s26030870

[30] Pérez-Fuente, A, Criado-Lozano, P.A., Martínez-González, M.M. (2026). Evaluación de la Lealtad en Apps de Salud: Análisis de Discrepancias Mediante Ontologías. *Actas de las XI Jornadas Nacionales de Investigación en Ciberseguridad* (JNIC 2026). Universidad Politécnica de Barcelona. [En prensa]

Análise Comparativa entre Regressão Logística e Random Forest na Previsão de Níveis Críticos de PM 2.5 em Beijing

Uma abordagem baseada no processo KDD com análise de dependências temporais e variáveis de atraso

Comparative Analysis between Logistic Regression and Random Forest in Predicting Critical Levels of PM 2.5 in Beijing

A KDD-based approach focusing on temporal dependency and lag variables

João Silva[1], Rui Pereira[1], Isabel Sofia Brito [1, 2]
[1]Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Beja
Beja, Portugal
[2]Center of Technology and Systems (UNINOVA-CTS) and Associated Lab of Intelligent Systems (LASI),
2829-516 Caparica, Portugal
24284@stu.ipbeja.pt ; 24478@stu.ipbeja.pt ; isabel.sofia@ipbeja.pt

Resumo — **Este artigo explora o uso de técnicas de *machine learning* e *data mining* para analisar o risco de partículas PM2.5 no meio atmosférico de Beijing entre 2010 e 2014. Com base nos dados obtidos, foi realizado um estudo sobre o seu potencial impacto na saúde humana, recorrendo à aprendizagem supervisionada e à análise de atributos temporais e ambientais, como temperatura, pressão atmosférica, velocidade do vento, entre outros. Este estudo formula o problema como uma tarefa de classificação binária de risco, com o objetivo de identificar dias de elevada exposição a PM2.5, contribuindo para sistemas de apoio à decisão em saúde pública. Na fase de treino e teste, foram criados dois modelos, um com o algoritmo *Logistic Regression* e outro com o algoritmo *Random Forest*. Os modelos foram avaliados através de métricas adequadas a problemas de classificação binária com potencial desbalanceamento, nomeadamente Precision, Recall, F1-Score e AUC-ROC.**

Palavras **Chave – PM2.5, aprendizagem supervisionada, Random Forest, Logistic regression.**

Abstract — **This article explores the use of machine learning and data mining techniques to analyze the risk associated with PM2.5 particles in the atmosphere of Beijing between 2010 and 2014. Based on the collected data, a study was conducted to assess their potential impact on human health, using supervised learning and analyzing temporal and environmental attributes such as temperature, atmospheric pressure, and wind speed, among others. This study formulates the problem as a binary risk classification task to identify days with high PM2.5 exposure, thereby contributing to public health decision support systems. During the training and testing phase, two models were developed: one using the Logistic Regression algorithm and the other using the Random Forest algorithm. The models were evaluated using metrics appropriate for binary classification problems with potential class imbalance, namely Precision, Recall, F1-Score, and AUC-ROC.**

Keywords – PM2.5, Supervised Learning, Random Forest, Logistic Regression.

I. Introdução

A região de Beijing, na China, é um dos lugares mais afetados pela poluição no mundo e consequentemente, isso faz com que a população sofra muito com problemas respiratórios causados por essa mesma poluição.Com o progresso de áreas como *data mining* e *machine learning*, os modelos preditivos estão a tornar-se cada vez mais precisos e cruciais nos processos de previsão e classificação. Este estudo foca-se em prever o risco de exposição de pessoas vulneráveis às micropartículas de poluição que têm um diâmetro de 2,5 micrómetros (intituladas de PM 2.5). O conjunto de dados analisado inclui registos de cada hora entre os anos de 2010 e 2014, totalizando 43824 registos com uma taxa de aproximadamente 3,4% de *outliers* e 4,72% de valores nulos, o que totaliza em 2068 registos nulos e 994 *outliers* nos valores de PM2.5. Esses dados foram obtidos no repositório de *machine learning* da Universidade da Califórnia em Irvine [1] e recolhidos pela embaixada dos Estados Unidos da América em Beijing e também pelo aeroporto da região [5]. O objetivo principal consiste em desenvolver um modelo preditivo capaz de classificar dias como sendo de alto ou baixo risco, com base em variáveis meteorológicas. Este estudo seg-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

ISBN: 978-989-36481-2-4

ue o processo Knowledge Discovery in Databases (KDD) para preparar os dados, tendo sido avaliados os algoritmos Logistic Regression e Random Forest para criar o modelo mais adequado. Acresce informar que o objetivo não é prever valores exatos de concentração, mas identificar de forma fiável situações de risco elevado para a população. Em sistemas de apoio à decisão em saúde pública, a falha na deteção de um episódio de poluição severa pode ter consequências graves, tornando a minimização de falsos negativos um critério prioritário na seleção do modelo. Alguns estudos semelhantes [2], [3] e [11], descritos na Seção II, demonstram o potencial e a importância da aplicação de técnicas de data mining e machine learning na área da saúde e na avaliação ambiental. Este trabalho contribui com: (i) a reformulação do problema como classificação de risco, (ii) a comparação de dois modelos interpretáveis e (iii) a validação temporal através de TimeSeriesSplit.

Este artigo encontra-se dividido em cinco seções, sendo a primeira a introdução, onde são apresentados o problema e a motivação. Na segunda seção são apresentados trabalhos relacionados que serviram de inspiração para a realização deste estudo. Na terceira seção a metodologia de estudo é descrita e por fim, nas seções quarto e cinco são analisados os resultados do estudo e apresentadas as conclusões do estudo.

II. Trabalhos Relacionados

O estudo "Spatial Correlation of PM 2,5 Pollution in Beijing- Tianjin-Hebei and Surrounding Cities Based on Complex Networks and Their Motif" [2] analisa a poluição por PM2.5 sob uma perspetiva espacial. Os resultados evidenciam fortes interdependências espaciais e efeitos de transbordo da poluição entre regiões, destacando cidades com papel central na propagação da poluição atmosférica e a importância de estratégias de governação ambiental coordenadas. Este estudo serviu de inspiração para o estudo atual com a diferença de que o presente trabalho adota uma abordagem temporal focada na classificação de risco diário

O estudo "Machine learning-based forecasting of air quality index under long-term environmental patterns: A comparative approach with XGBoost, LightGBM, and SVM" [11] investiga a previsão do índice de qualidade do ar sob padrões ambientais, comparando três métodos de machine learning: XGBoost, LightGBM e SVM. O objetivo é perceber qual desses modelos consegue prever melhor o AQI considerando a variabilidade climática e ambiental. Este estudo serviu de inspiração para o estudo atual como baseline e como modelo adicional, sobretudo para justificar a robustez da análise.

O estudo "Ambient particulate matter pollution and adult hospital admissions for pneumonia in urban China: A national time series analysis for 2014 through 2017" [3] investiga a relação entre exposições de curto prazo a PM2.5 e admissões hospitalares por pneumonia em adultos, através de modelos de séries temporais aplicados a dados reais de saúde pública. Este estudo conclui que aumentos nas concentrações de PM2.5 estão significativamente associados a um maior risco de hospitalização, reforçando o impacto direto da poluição atmosférica na saúde humana e a necessidade de mecanismos de alerta e prevenção.

Enquanto os trabalhos referidos se concentram maioritariamente na previsão das concentrações de PM2.5, na análise espacial da poluição ou na avaliação estatística dos seus impactos na saúde, o presente estudo diferencia-se ao formular o problema como uma tarefa de classificação de risco, distinguindo períodos de elevada e reduzida exposição a PM2.5. Adicionalmente, este trabalho privilegia modelos interpretáveis e computacionalmente eficientes, como a Regressão Logística e Random Forest, aliados a variáveis temporais e de atraso, seguindo o processo KDD. Esta abordagem visa fornecer suporte prático à tomada de decisão em contextos de saúde pública, complementando os estudos existentes com uma perspetiva orientada para a identificação de risco.

III. Metodologia

Este artigo aborda o processo *KDD*, tal como é descrito na Fig. 1, divide o processo de mineração de dados em 5 etapas, que vão desde a seleção dos atributos até à interpretação e avaliação dos resultados.

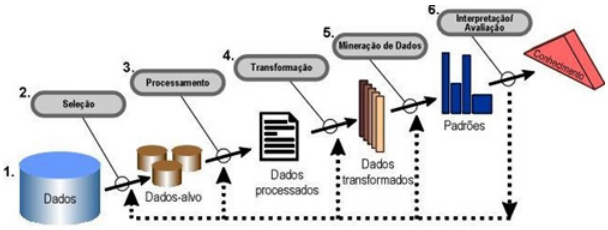


Figura 1. Representação do processo KDD Fonte [6]

A. Seleção, Pré-Processamento e Transformação

O conjunto de dados original continha aproximadamente 44 mil registos horários, dos quais 2068 apresentavam valores em falta, bem como cerca de 3,4% de *outliers* identificados pelo método Interquartile Range (IQR). Considerando que se trata de uma série temporal, a remoção de outliers poderia comprometer a continuidade temporal dos dados, tornando inconsistente a utilização de variáveis de atraso (lag). Adicionalmente, a exclusão desses valores não é recomendada, uma vez que correspondem precisamente a episódios de elevada poluição que o modelo pretende identificar.

Os dados foram agregados ao nível diário, resultando em 1770 observações. Destas, 1416 foram utilizadas para treino e 354 para teste. O pré-processamento consistiu na remoção de registos com valores em falta e na agregação dos dados através do cálculo de médias diárias.

Após a agregação, foram criadas variáveis de atraso correspondentes aos valores médios e máximos de PM2.5, bem como à temperatura média do dia anterior, com o objetivo de capturar dependências temporais associadas ao fenómeno de acumulação de poluentes.

Adicionalmente, foi definida a variável-alvo "risk", que assume o valor 1 quando a concentração média diária de PM2.5 ultrapassa 75 µg/m³ e o valor 0 caso contrário. Este limiar baseia-se nas normas da National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) da China, que estabelecem 75 µg/m³ como o valor diário a partir do qual se considera existir risco elevado, sendo este critério utilizado para a definição da variável binária.[4].

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

B. Mineração de Dados

Para a mineração de dados, aplicou-se a aprendizagem supervisionada, com a variável-alvo "risk", que assume o valor 1 quando a concentração média diária de PM2.5 ultrapassa 75 µg/m³ e o valor 0 caso contrário. O conjunto de dados foi dividido em 80% para treino e 20% para teste. A escolha dos algoritmos recaiu sobre Regressão Logística e Random Forest por representarem, respetivamente, um modelo linear interpretável e um modelo não-linear baseado em ensemble, permitindo comparar diferentes capacidades de generalização. Para além disso, a simplicidade e eficiência computacional destes algoritmos também foram tidas em consideração e fatores como a robustez e o tratamento interno dos dados com recurso a técnicas como a regularização L2 garantiram uma abordagem tanto do ponto de vista estatístico como do ponto de vista prático dado o contexto de saúde pública. A Regressão Logística oferece elevada interpretabilidade e eficiência em problemas de classificação binária, enquanto que a Random Forest permite capturar relações não-lineares complexas através de um conjunto de árvores de decisão. Assim, para Random Forest foram configurados 200 estimadores, mantendo os restantes hiperparâmetros por defeito, de forma a equilibrar desempenho e estabilidade. Utilizou-se o parâmetro class_weight = 'balanced', que ajusta automaticamente os pesos inversamente proporcionais às frequências das classes, garantindo que os dias de risco elevado (frequentemente em minoria no dataset) recebam a importância devida durante o treino.

No âmbito da Logistic Regression aplicou-se igualmente o peso de classes Balanced para maximizar o Recall em situações de risco. O modelo utiliza nativamente a regularização L2 (Ridge), que aplica uma penalização aos coeficientes de maior magnitude, prevenindo o *overfitting* ao evitar que o modelo se torne excessivamente sensível a ruídos nos dados meteorológicos.

A validação do modelo foi reforçada com a técnica *Time Series Split* [8] com 5 divisões. Esta escolha é crítica para dados temporais, pois garante que o treino ocorra sempre em períodos cronologicamente anteriores ao teste, simulando um cenário real de previsão e fornecendo uma estimativa de desempenho livre de "vazamento" de dados do futuro para o passado. Ao validar o modelo desta forma, obtemos uma estimativa muito mais confiável do seu desempenho em cenários reais e conseguimos identificar com maior precisão sinais de *overfitting* [7] [9], garantindo que a elevada performance do modelo se deve à sua capacidade de generalização e não apenas à memorização de padrões temporais específicos.

C. Avaliação

De maneira a obter uma boa avaliação de cada modelo, foram utilizadas as métricas de avaliação [10] *Precision*, *Recall*, *F1 Score* e *AUC* pois são as mais adequadas para avaliar os modelos criados.

- Precision: fundamental para avaliar os casos de falsos positivos, especialmente em sistemas que estão ligados diretamente à saúde e ao bem-estar humanos.
- Recall: mede a acurácia do modelo em prever corretamente dias de risco elevado (positivos reais), o que é crucial para um sistema no contexto do apoio à saúde pública.
- F1 Score: realiza o equilíbrio das métricas de Recall e Precision, o que neste caso é fundamental pois é crucial que o modelo consiga prever dias com poluição elevada, uma vez que pode ter consequências graves na saúde de pessoas vulneráveis, e quando um dia não apresenta um risco elevado visto que pode causar alarmismo desnecessário e até mesmo ter um impacto económico se o modelo fosse utilizado em um contexto como o de um hospital.
- AUC-ROC: Indica a capacidade do modelo de distinguir entre dias de alto risco e dias de baixo risco, o que é essencial no contexto do projeto.

Ambos os modelos foram avaliados com base nessas mesmas métricas, o que resultou na escolha do modelo que usou o algoritmo da Logistic Regression, tal como consta na Tabela 1.

TABELA I. Resultados das métricas de avaliação dos modelos

Modelos	Precision	Recall	F1 Score	AUC
Logistic Regression	0 - 70% 1 – 75%	0 – 76% 1 – 69%	0 – 73% 1 – 72%	81%
Random Forest	0 – 63% 1 – 69%	0 – 65% 1 – 68%	0 – 64% 1 – 69%	55%

IV. Resultados e Interpretação

Na Fig. 2 consta a matriz de confusão do modelo *Logistic Regression*. Ao ser testado com 20% dos registos totais (equivalente a 354 registos), o modelo demonstrou capacidade de identificação correta de 124 dias de risco elevado e 132 dias seguros, correspondendo a um Recall de 73% para a classe de risco. Registaram-se 57 falsos negativos, uma margem de erro que, embora crítica em um contexto de saúde, é justificada pela inconsistência de determinados fatores meteorológicos tais como a velocidade do vento. Ainda assim, os 41 falsos positivos obtidos situam a taxa de falsos alarmes em um patamar que não compromete a credibilidade do sistema.

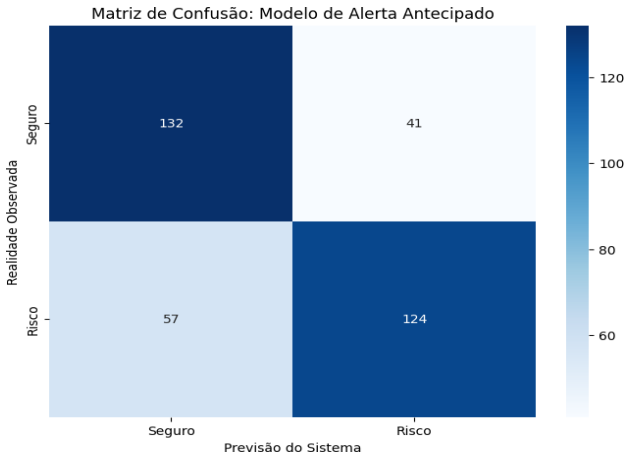


Figura 2. Matriz de confusão do modelo Logistic Regression

A Fig. 3 representa o impacto de cada variável, como, por exemplo, o ponto de orvalho, que possui um coeficiente de influência de cerca de 2.5, o que demonstra que a estagnação do

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

ar associada a valores elevados de ponto de orvalho é o principal motivo de acumulação de partículas. Em contrapartida, variáveis como a temperatura do dia anterior apresentam um coeficiente negativo de aproximadamente -2.5, indicando um efeito protetor ou de dispersão das partículas.

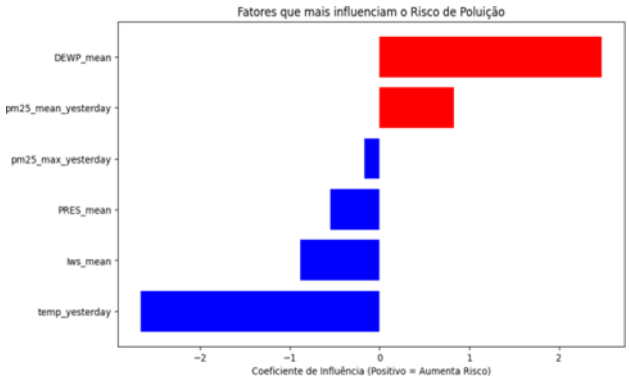


Figura 3. Influência das variáveis nos valores PM2.5

Para avaliar a eficácia do modelo de Regressão Logística, utilizou-se a curva ROC, ilustrada na Fig. 4, que resultou numa métrica AUC de 81%. O valor de AUC de 81% indica uma boa capacidade de discriminação entre classes, embora exista margem para melhoria em cenários de elevada variabilidade atmosférica. A trajetória da curva, significativamente acima da linha de referência, valida a robustez do sistema ao manter uma elevada taxa de deteção real, servindo como um complemento estatístico essencial ao valor de Recall de 73% obtido. Estes resultados sugerem que o modelo apresenta potencial para integração em sistemas de alerta, carecendo, contudo, de validação adicional em cenários externos.

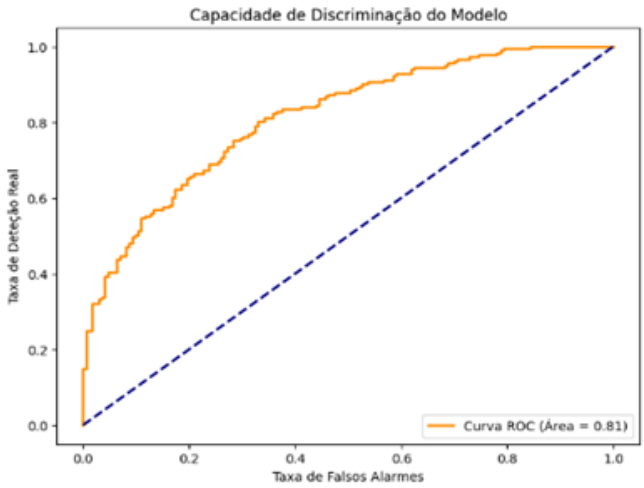


Figura 4. Curva ROC do modelo Logistic Regression

Ainda que o modelo Random Forest tenha apresentado valores bastante equilibrados, os valores gerais do modelo que utilizou o algoritmo Logistic Regression apresentaram melhores resultados em todas as métricas e ainda um resultado de F1 Score de 77% após ser validado pela técnica Time Series Split.

V. Conclusões

Este estudo propôs o desenvolvimento de um sistema preditivo para níveis críticos de partículas PM2.5 em Beijing, utilizando algoritmos de aprendizagem supervisionada para a classificação de risco. O objetivo central foi contribuir para o desenvolvimento de uma ferramenta de apoio à saúde pública capaz de identificar precocemente ambientes de risco e, assim, precaver a exposição de populações vulneráveis. A revisão da literatura corroborou a premissa de que a monitorização destas partículas é vital em metrópoles com elevada densidade populacional, onde a poluição atmosférica tem um impacto direto na morbilidade respiratória. Grande parte da literatura concentra-se na previsão contínua da concentração de PM2.5. Neste trabalho, reformulámos o problema como classificação binária de risco, alinhada com necessidades reais de decisão.

O desempenho do modelo, avaliado através de uma matriz de confusão e métricas de validação temporal, revelou um valor de Recall particularmente satisfatório para o contexto clínico. Num cenário de saúde pública, a prioridade reside na minimização de falsos negativos; falhar a deteção de um pico real de poluição é consideravelmente mais grave do que gerar um falso alarme. Enquanto o falso positivo causa apenas um inconveniente logístico, a ausência de um alerta necessário impede a adoção de medidas preventivas essenciais, colocando vidas em risco. Além da capacidade preditiva, o estudo permitiu identificar a influência direta de variáveis como o ponto de orvalho e a concentração do dia anterior na variação do risco.

Apesar das limitações iniciais quanto ao volume de dados após o agrupamento diário do dataset PRSA_data, os testes demonstraram que a Regressão Logística foi a técnica mais adequada pela sua robustez e interpretabilidade. Com o cumprimento dos objetivos propostos, este trabalho estabelece uma base para futuras implementações, tanto ao nível governamental, na definição de políticas de sensibilização ambiental, como no setor da saúde, permitindo uma gestão mais eficiente de recursos hospitalares em dias de elevado risco atmosférico. Por último, os resultados obtidos demonstram que modelos interpretáveis como a Regressão Logística podem fornecer um desempenho adequado na classificação de risco, constituindo uma base metodológica para futuras extensões com modelos mais complexos e dados adicionais.

Como trabalho futuro, será relevante expandir o conjunto de variáveis consideradas, integrando indicadores adicionais como os níveis de outros poluentes atmosféricos (NO_2, SO_2, O_3) e dados de mobilidade urbana. A inclusão de variáveis multivariadas poderá melhorar a capacidade do modelo de capturar interações ambientais complexas. Também poderão ser exploradas abordagens híbridas que combinem modelos interpretáveis com métodos mais avançados, como Gradient Boosting ou SVM permitindo comparar ganhos de desempenho face à perda de interpretabilidade. Para além disso, a exploração de técnicas mais avançadas e emergentes como deep learning também se revela como sendo promissora na previsão da qualidade do ar, tal como é analisado no artigo "A systematic survey of air quality prediction based on deep learning" [12].

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Referências Bibliográfica

[1] UCI Machine Learning Repository, "UCI Machine Learning Repository," [Online]. Available: https://archive.ics.uci.edu/.

[2] H. An, C. Zhang, J. Niu, and X. Dong, "Spatial correlation of PM2.5 pollution in Beijing–Tianjin–Hebei and surrounding cities based on complex networks and their motif," Journal of Environmental Engineering Technology, vol. 13, no. 6, pp. 2063–2071, 2023, doi: 10.12153/j.issn.1674-991X.20220825 .

[3] Y. Tian, H. Liu, Y. Wu, Y. Si, M. Li, Y. Wu, X. Wang, M. Wang, L. Chen, C. Wei, T. Wu, P. Gao, and Y. Hu, "Ambient particulate matter pollution and adult hospital admissions for pneumonia in urban China: A national time series analysis for 2014 through 2017," PLoS Medicine, vol. 16, no. 12, e1003010, 2019, doi: 10.1371/journal.pmed.1003010

[4] Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, "Ambient Air Quality Standards (GB 3095-2012)," Beijing, China, 2012.

[5] L. Wang, X. He, and Y. Gong, "Beijing PM2.5 Data Set," UCI Machine Learning Repository, 2017. [Online]. Available: https://archive.ics.uci.edu/dataset/381/beijing+pm2+5+data.

[6] A. Fayyad, G. Piatetsky-Shapiro, and P. Smyth, "Overview of the steps that compose the KDD process," in Figura 2.1 – Visão geral das etapas que compõem o processo de KDD. Available: https://www.researchgate.net/figure/Figura-21-Visao-geral-das-etapas- que-compoem-o-processo-de-KDD_fig1_236301730.

[7] X. Ying, "An overview of overfitting and its solutions," J. Phys.: Conf. Ser., vol. 1168, no. 2, 022022, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1168/2/022022.

[8] scikit-learn Developers, "TimeSeriesSplit," scikit-learn Documentation, [Online]. Disponível em: https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.model_selection.TimeSeriesSplit.html. [Acedido: 17 Abr. 2026]

[9] IBM. (2021, October 15). Overfitting. Online: https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/overfitting

[10] J. Han, M. Kamber, and J. Pei, Data Mining: Concepts and Techniques, 3rd ed. Burlington, MA, USA: Morgan Kaufmann, 2011.

[11] S. Tırınk, "Machine learning-based forecasting of air quality index under long-term environmental patterns: A comparative approach with XGBoost, LightGBM, and SVM," PLOS One, vol. 20, no. 10, e0334252, 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0334252

[12] Y. Zhang, X. Zhang, X. Li, and Y. Wang, "A systematic survey of air quality prediction based on deep learning," Alexandria Eng. J., vol. 95, pp. 129–146, Jul. 2024, doi: 10.1016/j.aej.2024.03.031.

Declarações de uso de IA

Neste artigo foi utilizada Inteligência Artificial Generativa para realizar a formatação das referências bibliográficas e para validar a coerência das seções.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Caracterización de vegetación de páramo a partir de imágenes UAV hiperespectrales y algoritmos de aprendizaje automático

Estudio de caso parque ecológico Matarredonda, Cundinamarca, Colombia

Characterization of páramo vegetation from hyperspectral UAV images and machine learning algorithms

Case study of the Matarredonda ecological park, Cundinamarca, Colombia

Erika Upegui, Fabian Molano, Javier Medina
Grupo de investigación GEFEM
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia
esupeguic@udistrital.edu.co, wfmolanop@udistrital.edu.co, rmedina@uditrital.edu.co

***Resumen* — El ecosistema de páramo en Colombia es muy importante debido a su alta biodiversidad y a su función vital en la regulación de los recursos hídricos. Las imágenes hiperespectrales embarcadas en plataformas UAV ofrecen una oportunidad para los análisis de agricultura y silvicultura gracias a su riqueza espectral (cientos de bandas) y su alta resolución espacial (centimétrica), presentándose como un tema de tendencia en la comunidad científica. Este proyecto busca la caracterización de la vegetación de páramo en el parque ecológico de Mataredonda que es un santuario ecológico que colinda con la zona rural de Bogotá (capital de Colombia). Para la realización del proyecto se cuenta con un ortomosaico de 270 bandas espectrales con una resolución espacial de 3,7cm. El proyecto se divide en dos fases, la primera enfocada a la caracterización espectral de las especies presentes en la zona de estudio, la cual se realiza con apoyo de un catálogo ilustrado de especies, la fotoidentificación en la imagen a través de la foto interpretación visual, donde se identifican 13 especies presente en la imagen. La segunda fase busca la espacialización de la distribución de las especies en la zona de estudio, para ellos se aborda en un primer tiempo la reducción de la dimensionalidad y posteriormente la clasificación supervisada. Los resultados muestran que los mejores resultados se obtienen con la imagen resultante de la Fracción de Ruido Mínima y con los clasificadores Random Forest que alcanza una precisión global de 81,6% y un coeficiente kappa de 0,8 - con la cual se espacializó la distribución de especies en el parque - seguido de Support Vector Machine que obtiene 80% de precisión global y un coeficiente kappa de 0.79.**

Palabras **Clave – imágenes UAV hiperespectrales; reducción dimensional; caracterización espectral; páramo; Matarredonda.**

***Abstract* — The páramo ecosystem in Colombia is very important due to its high biodiversity and its vital role in regulating water resources. Hyperspectral images carried on UAV platforms offer an opportunity for agricultural and forestry analyses due to their spectral richness (hundreds of bands) and high spatial resolution (centimeter-level), making them a trending topic in the scientific community. This project aims to characterize the páramo vegetation in the Mataredonda Ecological Park, an ecological sanctuary bordering the rural area of Bogotá (capital of Colombia). The project utilizes a 270-band orthomosaic with a spatial resolution of 3.7 cm. This project is divided into two phases. First phase focuses on the spectral characterization of the species present in the study area, which is carried out using an illustrated species catalog and photo-identification through visual photo-interpretation, identifying 13 species present in the image. Second phase aims to spatially map the distribution of species in the study area. This involves, firstly, dimensionality reduction and subsequently, supervised classification. Results shows that the best results are obtained with the Minimum Noise Fraction image and the Random Forest classifiers, achieving an overall precision of 81.6% and a kappa coefficient of 0.8 - with which the distribution of species in the park was spatialized - followed by Support Vector Machine, which achieves an overall precision of 80% and a kappa coefficient of 0.79.**

Keywords - hyperspectral UAV imagery; dimensional reduction; spectral characterization; páramo; Matarredonda.

I. Introducción

El uso de los vehículos aéreos no tripulados (UAV), más recientemente denominados UAS (Sistema de Aeronaves No Tripuladas), tiene una larga historia de avances y desarrollos tecnológicos; tomando como referencia los primeros decenios del siglo XIX cuando se realizan los primeros intentos de desarrollar aeronaves no tripuladas. En 2009, Eisenbeiss [1] planteó que los UAV se veían cada vez más como una alternativa atrac-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

tiva debido a su bajo costo, flexibilidad, disponibilidad y fácil preparación para el servicio, además podían operar en lugares peligrosos o temporalmente inaccesibles, proporcionar una visión general rápida de una situación, así como documentar un área detallada. Según el ministerio de Fomento de España [2] se estima que para el año 2035 haya una flota de 51400 UAV de uso comercial, lo cual generará un gran volumen de negocios y de empleos; igualmente señala que, en Estados Unidos, se prevé que de las 42.000 unidades registradas en 2016 se pase a 420.000 sobre el año 2022. De acuerdo con [3], los sensores han sido miniaturizados y/o adaptados para instalarse en una plataforma UAV, los cuales pueden agruparse en seis categorías, así: 1) estándar para el consumidor (COTS); 2) multiespectral; 3) hiperespectral (ya sea cámaras de imágenes o radiómetros); 4) LiDAR; 5) Térmico; y 6) Radar de apertura sintética (SAR).

De acuerdo con [4] los sistemas hiperespectrales a bordo de UAV pueden adquirir imágenes hiperespectrales con alta resolución espacial, los cuales, gracias a su bajo coste operativo, su alta flexibilidad y la capacidad de adquirir datos en tiempo real se han convertido en una importante fuente de datos para la monitorización agrícola mediante teledetección.

Respecto al monitoreo ambiental, [5] considera que las imágenes basadas en UAV ofrecen una resolución espacial ultrafina y flexibilidad en la adquisición de datos, lo que representa una gran oportunidad para mejorar los estudios de campo sobre plantas e *in situ*, permitiendo la identificación y el conteo de plantas individuales. Sin embargo, el mapeo preciso de plantas individuales a partir de imágenes de UAV sigue siendo un desafío, dada la gran variación en los tamaños y geometrías de las plantas individuales, así como en su distribución, lo cual es cierto incluso para los métodos de segmentación y clasificación semántica basados en aprendizaje profundo [5]. En su investigación probaron identificar y mapear frailejones (todas las especies de plantas de la subespecie *Espeletiinae*), las plantas dominantes en uno de los ecosistemas de gran altitud con mayor biodiversidad del mundo (es decir, los páramos) a partir de imágenes de UAV.

Más recientemente, en 2023, [6] reseñan que en 1998 se realizaron los primeros estudios sobre detección de especies arbóreas con imágenes hiperespectrales (AVIRIS), y en la actualidad, las imágenes hiperespectrales se siguen utilizando para ese fin. No obstante, con la ayuda de los UAV se pueden realizar de una manera más actualizada y menos agotadora que los estudios de campo.

Esta investigación busca caracterizar la vegetación de páramo del parque Ecológico Matarredonda, usando imágenes capturadas con la cámara Nano-Hyperspec de Headwall embarcada en el hexacóptero DJI matrice 600 pro empleando algoritmos de aprendizaje automático. El documento se divide en cinco sesiones, la segunda se dedica a un análisis bibliométrico alrededor de la ecuación "hyperspectral + uav + images"; la tercera presenta los materiales y métodos empleados para la investigación; la cuarta muestra los resultados y los analiza; la última sesión aborda las conclusiones de la investigación.

II. Análisis bibliométrico

Como marco de referencia de esta este proyecto, se realiza un análisis bibliométrico que abarca desde el 1 de enero de 2001 hasta el 28 de febrero de 2026, utilizando como expresión: "hyperspectral+uav+images". El corpus de datos corresponde a 1318 documentos de la base de datos de Scopus, provenientes de 359 fuentes distintas que incluye 3415 autores (fig 1). El análisis se realiza en biblioshiny [7] de Bibliometrix v 5.0. Las publicaciones en el tema de interés presentan un crecimiento anual de 15.9%, con un aumento importante a partir de 2020, donde se registran más de 100 artículo por año. Sin embargo, este número es pequeño en comparación con temáticas asociadas únicamente a los UAV, en donde se presentan 132,566 artículo para el mismo periodo de tiempo.

El autor más citado es Yue Zhang (con afiliación de China) quien también encabeza la lista de la mayor producción en el tema en los últimos años, seguido de Haikuan Feng (con afiliación de China), y de Eija Honkavaara (con afiliación de Finlandia) quien ocupa la misma posición en los artículos más citados. China es el país que ocupa el primer lugar en producción científica alrededor del tema, seguido de los Estados Unidos Finlandia. Los tres artículos más citados corresponden a: Zarco-Tejada PJ. (2012), Remote Sens Environ, Zhong Y. (2020), Remote Sens Environ, y Honkavaara E. (2013) Remote Sens. Por su parte, las tres revistas que más publican estas temáticas son: Remote Sensing, Proceedings of SPIE, y Computers and Electronics in Agriculture.

De otra parte, frente a las palabras claves, las relacionadas con aplicaciones temáticas que sobresalen corresponden a temas asociados a vegeación, cultivos, bosques, en general monitoreo ambiental, lo que es consistente con lo expresado por [5-6]. Esto también se evidencia en los temas de tendencia a lo largo de los años (fig. 1), en donde se puede evidenciar el cambio de denominación de los UAV o UAS, las técnicas de procesamiento como la fotointerpretación, la espectroscopia, los índices de vegetación y las técnicas de aprendizaje automático; pero sobre todo las diferentes aplicaciones temáticas alrededor de la vegetación, la agricultura y la silvicultura.

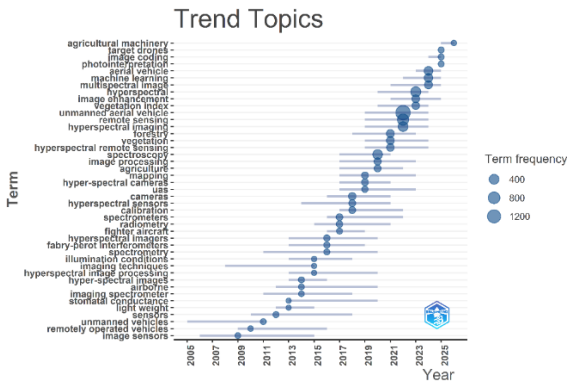


Figura 1. Palabras más citados de la expresión "hyperspectral+uav+images"

La figura 2 organiza los temas de acuerdo a su nivel de madurez, en esta organización se muestran como temas básicos, - ampliamente utilizados y bien conocidos, que dan unidad y sentido a todos los demás temas -, un grupo que engloba los Vehículos aéreos no tripulado, Sensores Remotos, y antenas. En los temas motores, - con avances sistemáticos y transformadores-, se encuentran: hiperespectral, vehículo aéreo y aprendizaje automático. En los temas nicho, que están en auge y

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

están en investigación continua estarían las aplicaciones temáticas, cultivos/cosechas, vegetación y silvicultura. Finalmente, figuran como temas con un menor grado de relevancia, que han sido ampliamente estudiadas como las imágenes multiespectrales, imágenes satelitales y análisis de imágenes, que son remplazadas por hiperespectrales y las técnicas de aprendizaje automático.

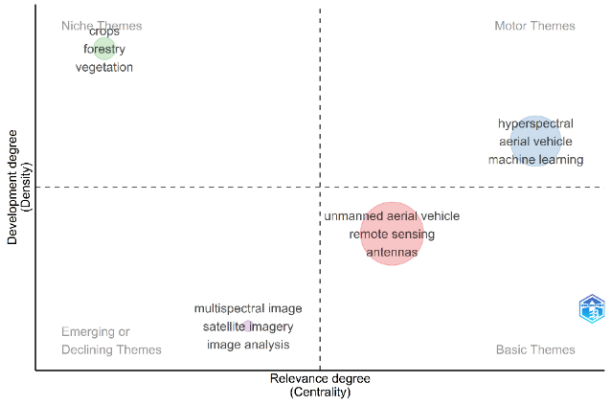


Figura 2. Evolución temporal de los temas en el análisis bibliométrico asociado a la expresión "hyperspectral+uav+images"

Finalmente, el tema de interés en este estudio puede ubicarse en los temas de tendencia especializados para la temática de imágenes hiperespectrales a bordo de UAV.

III. Materiales y métodos

A. *Zona de estudio*

El Parque Ecológico Matarredonda (identificado en color fucsia en la figura 3) es un santuario ecológico que colinda con la zona rural de Bogotá y se extiende al oriente del departamento de Cundinamarca, abarcando áreas entre los municipios de Choachí, Ubaque y Bogotá [8]. Con una superficie aproximada de 1.800 hectáreas, de las cuales casi el 70% corresponde al ecosistema de páramo -considerado fundamental para la regulación hídrica y la biodiversidad-, localizado en altitudes que oscilan entre 3.300m.s.n.m. y 3.500 m.s.n.m. El parque tiene una importancia ambiental significativa, pues en su territorio nacen ríos y cuerpos de agua que abastecen tanto a Bogotá como a varios municipios de Cundinamarca, y marca la línea divisoria entre las cuencas de los ríos Bogotá y Meta.

Figura 3. Localización parque ecológico Matarredonda
Fuente: Google Earth

B. *Materiales*

Las imágenes utilizadas en este trabajo fueron capturadas con el Nano-Hyperspec® que es un espectrómetro de imágenes desarrollado por Headwall Photonics el cual captura en el rango visible e infrarrojo cercano (VNIR) de 400 a 1000 nm en 270 bandas espectrales, con una velocidad de fotogramas máxima de 300 Hz. El vuelo objeto de este estudio se realizó, en el hexacóptero DJI matrice 600 pro, el 26 de noviembre del 2018 con una altura de vuelo de 55 m y un tamaño de pixel en el terreno (GSD) de 3.7 cm, en sistemas de referencia WGS84, alcanzado un tamaño de la imagen de 20,6 Gb. Se cuenta tanto como con las imágenes crudas (5 tiras) como con un ortomosaico generado por la empresa propietaria de los datos a través de procesos fotogramétricos. Estos equipos y las imágenes son propiedad del grupo Interra Gea.

El catálogo ilustrado de plantas y líquenes representativos del parque ecológico "Matarredonda" [9] que consta de la especie ilustrada, familia, nombre científico, nombre común, breve descripción botánica y los usos reportados para la especie en la literatura (ejemplo en la figura 4) se utilizó como referencia para fotoidentificar las especies en las imágenes hiperespectrales. El catálogo ilustra un total de 101 especies de Angiospermas, helechos y Líquenes, agrupadas en 46 familias y 88 géneros, siendo la familia *Asteráceae* la más presente en el páramo con 15 especies, las cuales se encuentran en un excelente estado de conservación.

El software ENVI se usó para el procesamiento de imágenes, mientras que los procesos de clasificación se llevaron a cabo en ArcGIS Pro, ambos softwares utilizaron un procesador 13th Gen Intel® Core™ i9-13900, 2000 MHz, 24 procesadores principales y 32 procesadores lógicos, acompañado de una memoria RAM de 128 GB.

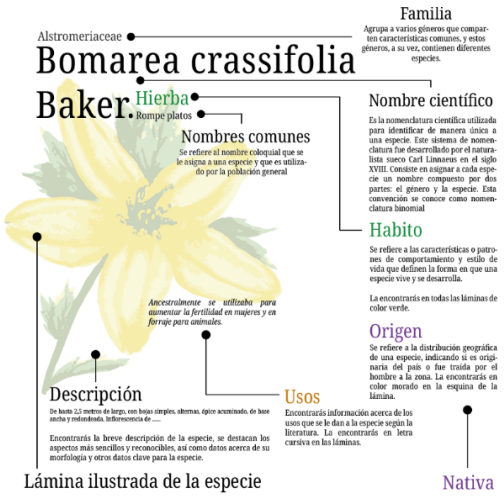


Figura 4. Estructura de las laminas ilustradas del catálogo
Fuente: [9]

C. *Métodos*

1) *Preprocesamiento*

Como parte del preprocesamiento se realiza a corrección radiométrica que convierte los niveles digitales de la imagen en

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

valores de radiancia, se transforman los valores de radiancia a reflectancia y posteriormente se aplica la corrección atmosférica. Datos que el mosaico ya es un producto orto rectificado no se realizan correcciones geométricas.

2) Identificación de patrones de variabilidad espectral

Fotointerpretación la información hiperespectral generada por la imagen permite crear diversas composiciones de color, las cuales son útiles al momento de fotointerpretar. Para ello se utiliza el índice óptimo de Factor (OIF) que es una herramienta estadística utilizada en teledetección para identificar la combinación de tres bandas de una imagen que maximiza la variabilidad de la información espectral mientras minimiza la redundancia entre ellas.

Descomposición espectral permite extraer los perfiles espectrales característicos de los materiales presentes en la muestra estudiada para cuantificar cómo se distribuye la abundancia de estos materiales en la imagen [10], el Pixel Purity Index (PPI) es un algoritmo que identifica los píxeles más espectralmente puros o extremos dentro de una escena denominados endmembers los cuales representan las firmas espectrales puras de los materiales presentes en la imagen.

3) Reducción de dimensionalidad

Este proceso de tiene como objetivo optimizar el conjunto de datos hiperespectrales mediante la eliminación de información redundante o irrelevante, lo que permitirá disminuir el tamaño de la imagen y mejorar la eficiencia en el procesamiento y la clasificación. Dado que las imágenes hiperespectrales contienen una gran cantidad de bandas espectrales, muchas de las cuales son innecesarias o contienen ruido. Para este proyecto se utilizaron:

Análisis de Componentes Principales - PCA se emplea para condensar la mayor parte de la varianza de los datos (aproximadamente un 99,9%) en un conjunto reducido de componentes principales, optimizando así el almacenamiento y la eficiencia computacional [11].

Fracción de Ruido Mínimo – MNF mejora la calidad de los datos al reducir el ruido y resaltar la señal relevante. El proceso de MNF consta de dos fases: primero, se elimina la correlación del ruido; luego se aplica una PCA ordenando las componentes según su relación señal-ruido [12].

Análisis de Componentes Independientes - ICA descompone un conjunto de señales mixtas en componentes independientes no correlacionados. A diferencia del PCA, que maximiza la varianza, ICA maximiza la independencia estadística [13].

4) Clasificación de Imágenes

Se refiere al proceso de agrupar píxeles que comparten características visuales similares en clases o categorías, las cuales representan las características de la superficie o las áreas de interés para el usuario. Este proceso se desarrolla en tres fases principales: entrenamiento, en la que se definen digitalmente las categorías a partir de muestras de referencia; asignación, donde cada píxel de la imagen es distribuido en una de esas categorías basándose en su información espectral; y verificación, en la cual se comprueban y evalúan los resultados obtenidos para asegurar la precisión y consistencia de la clasificación [14]. Este proyecto aplica los métodos más utilizados según [6]:

Máxima Verosimilitud - ML es un método con capacidad para asignar píxeles a una clase basada en la maximización de su función de probabilidad, toma como referencia las áreas de entrenamiento para calcular los promedios y varianzas de las diferentes clases, lo que permite estimar las probabilidades para cada clase. Estas probabilidades se basan en la suposición de que tanto las áreas de entrenamiento como las clases siguen una distribución normal.

Máquinas de Soporte Vectorial - SVM es un clasificador no paramétrico basado en la teoría del aprendizaje estadístico, utiliza una superficie de decisión conocida como hiperplano óptimo, que separa las clases de manera que maximiza el margen entre ellas. Los puntos de datos más cercanos a este hiperplano se denominan vectores de soporte.

Random Forest – RF es un método que utiliza múltiples árboles de decisión para realizar predicciones. Cada árbol en el bosque se entrena con un subconjunto aleatorio de los datos y características, lo que reduce la varianza y mejora la generalización del modelo. La predicción final se obtiene mediante el voto mayoritario de todos los árboles. Este enfoque es robusto contra el sobreajuste y es eficaz para problemas de clasificación y regresión [15].

5) Evaluación de los Resultados de la Clasificación

Se realiza a partir de **matrices de confusión**, las cuales proporcionan una visión detallada de la precisión del clasificador, en especial la precisión global (PG) que indica el porcentaje de píxeles bien clasificados respecto a la interpretación visual. Se calcula el **coeficiente Kappa** (K) que mide el grado de acuerdo entre los píxeles clasificados y aquellos que pertenecen a la clase real. El valor es 1 cuando existe una concordancia perfecta, mientras que un valor es 0 indica que no hay concordancia. También se mide el tiempo utilizado.

D. Metodología

El proyecto se desarrolla en dos fases.

1) Caracterización espectral de las especies

La primera fase se ocupa del preprocesamiento y la identificación de patrones de variabilidad espectral. Una vez preprocesadas las imágenes se realiza el cálculo de OIF, y apoyándose en las composiciones de bandas de variabilidad máxima se realiza una campaña de campo (el 27 de octubre de 2024) para reconocer e identificar especies vegetales representativas, las cuales se documentan. Igualmente se depuran las 270 bandas, excluyendo aquellas con fallas o con solo ruido, para extraer una imagen de 207 bandas. Posteriormente se aplica el algoritmo de PPI, se identifican los *endmembers*, que cruzados con las especies fotoidentificadas en campo, permiten establecer los perfiles espectrales de estas.

2) Clasificación de especies vegetales a partir de imágenes hiperespectrales

La segunda fase busca la creación del mapa de distribución de especies en la zona de estudio. Para esto primero se realiza la reducción de dimensionalidad por tres técnicas diferentes (PCA, MNF, e ICA). Luego, se seleccionan las muestras de entrenamiento. Posteriormente, se aplican tres algoritmos de clasificación (ML, SVM, y RF) a cada una de las imágenes resultantes de la reducción y a la imagen de 207 bandas. En cuanto a la con-

ISBN: 978-989-36481-2-4

figuración de los algoritmos para ML se estableció la fracción de rechazo en un valor de 0.1, lo que establece un umbral para excluir aquellos píxeles cuya probabilidad de clasificación no sea suficientemente alta. En el caso del clasificador SVM, se seleccionó un kernel de base radial (RBF) con una constante gamma de 0.5, la cual regula el radio de influencia de cada punto de datos. En cuanto el algoritmo de RF los parámetros utilizados fueron para número máximo de árboles igual a 500, para la profundidad del árbol un nivel de 30. Posteriormente, se evalúan los resultados de las cuatro imágenes por los tres métodos a través de la precisión global, el coeficiente kappa, (500 muestras distribuidas aleatoriamente), y el tiempo empleado en el proceso. Finalmente se genera el mapa de distribución de especie sobre la imagen mejor clasificada.

IV. Resultados

Los resultados se presentan por fases.

A. Caracterización espectral de las especies

La aplicación del OIF permitió identificar las mejores combinaciones (tab. 1) para crear las composiciones a falso color (tabla 1). La composición a verdadero color corresponde a RGB (25,70,115), mientras que la composición de falso color estándar se logra con RGB (30,120,171).

TABELA I. Mejores composiciones basadas en el OIF

Combinación	Banda			OIF
	1	2	3	
1	19	33	39	570.744
2	56	75	90	539.559
3	166	172	191	522.926
4	79	84	92	474.464
5	111	139	144	362.346

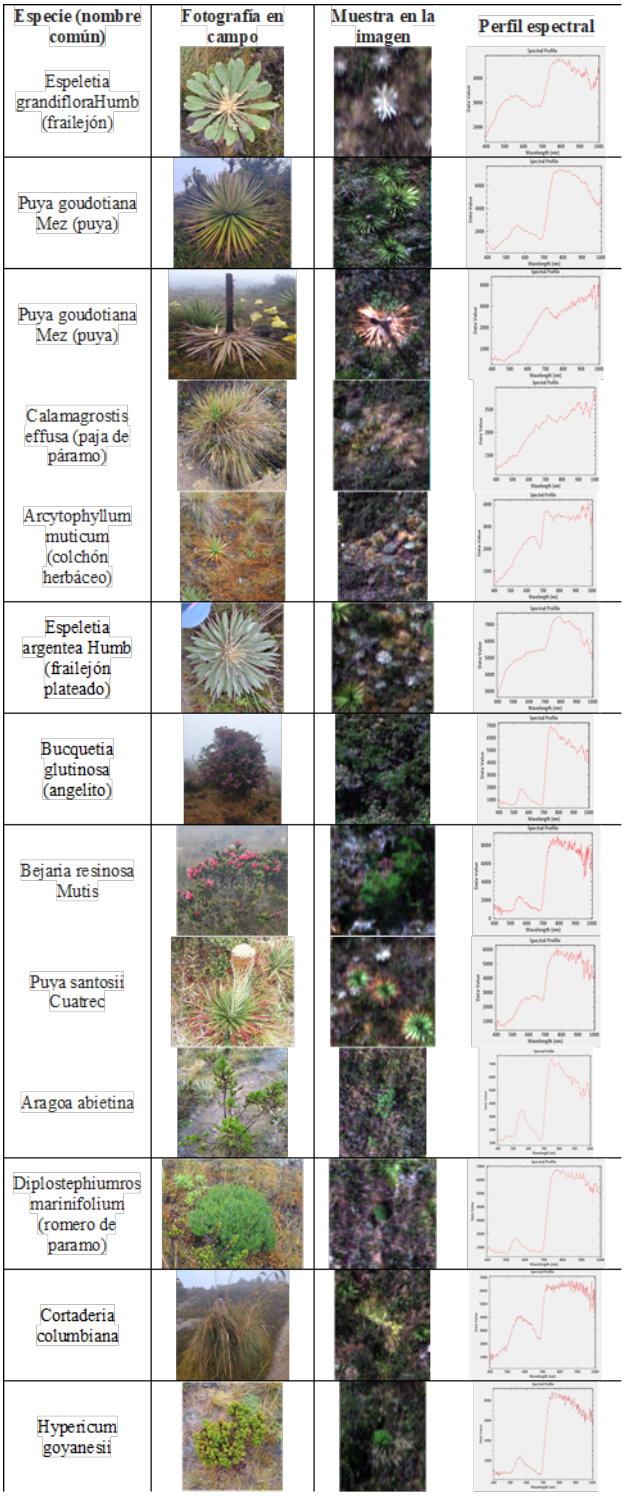
Del trabajo de campo – con ayuda del catálogo de vegetación y la fotoidentificación- y la aplicación de PPI (con 5000 iteraciones como límite), se identificaron 13 especies, que se fotografiaron en campo, y se caracterizaron espectralmente como se muestra en la tabla 2.

B. Clasificación de especies vegetales a partir de imágenes hiperespectrales

En lo que respecta la reducción de dimensionalidad y al analizar los resultados obtenidos, se conservaron las siguientes bandas o componentes por método. Para PCA se retienen las 3 primeras componentes que acumulan el 90.19% de varianza de los datos. En el caso de MNF la relación señal ruido ofrece información hasta la componente 10, ya que a partir de la componente 11 solo se conserva el ruido. En cuanto ICA se conservan los 15 primeros componentes.

La muestra de entrenamiento incluyó 168,457 píxeles, distribuidos estratégicamente en la imagen (de tamaño de 1751x640 píxeles) para las 13 clases. Los resultados de las clasificaciones (ML, SVM, y RF) aplicadas a las 4 imágenes (207 bandas seleccionadas, PCA, MNF e ICA) se muestran en la tabla 3, con las métricas planteadas (PG, K, y t). Analizando la tabla se evidencia que al clasificar la imagen original (207 bandas) mejor resultado lo alcanza el clasificador SVM con un 80,6% de PG y K de 0.7894 con un tiempo de proceso de 46,37 minutos. Estos resultados son comparables con los alcanzados con la reducción dimensional MNF que alcanza los mejores resultados en la clasificación RF y SVM con acuerdos superiores al 0.8, pero con tiempos de procesos muy inferiores el RF.

TABELA II. Caraterización espectral de trece especies de vegetación presentes en el parque ecológico Matarredonda



Fuente: Elaboración propia apoyada [9]

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

TABELA III. Resultados de la clasificación en las imágenes usadas

Vector característico	Clasificador	PG (%)	K	t (min)
207 Bandas	ML	**68**	0,6085	2,13
	SVM	**80,6**	0,7894	46,39
	RF	77,3	0,7543	0,25
PCA	ML	52,3	0,4243	0,54
	SVM	70,4	0,6798	24,74
	RF	73,3	0,7105	0,1
MNF	ML	58,4	0,4945	0,78
	SVM	**81**	0,7938	12,85
	RF	**81,6**	0,8004	0,14
ICA	ML	54,5	0,4516	0,63
	SVM	73,1	0,7083	21,69
	RF	73,3	0,7105	0,12

La figura 5 muestra la distribución espacial de las trece especies identificadas en el ortomosaico de las imágenes hiperespectrales reducido con la técnica MNF y la clasificación con RF.

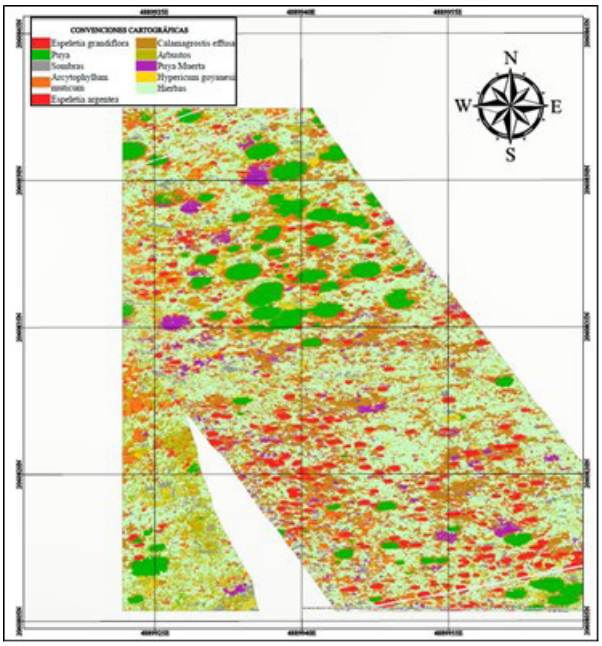


Figura 5. Distribución espacial de las 13 espacies presentes en la imagen MNF con el clasificador RF

V. Conclusiones

Un ortofotomosaico hiperespectral, de 272 capturado con el sensor Nano-Hyperspec embarcado en un hexacóptero DJI matrice 600 pro, de una zona del parque ecológico Matarredonda se utilizó para caracterizar espectralmente 13 especies foto identificadas apoyados en la técnica PPI. Igualmente se probaron tres métodos de reducción dimensional, a saber: PCA (3 componentes), MNF (10 componentes), y ICA (15 componentes). Posteriormente tres clasificadores (ML, SVM, RF) se aplicaron sobre la imagen original depurada (207 bandas) y las reducidas dimensionalmente. Se evaluó la PG, K y t. Los mejores resultados se alcanzaron con el algoritmo RF aplicado en la imagen reducida con la técnica MNF con las 13 especies caracterizadas espectralmente. Los resultados obtenidos son concordantes con los expuesto en [6] y son prometedores para la espacialización de vegetación en ecosistemas sensibles de difícil acceso.

Referencias Bibliográfica

[1] Eisenbeiss, H. (2009). UAV photogrammetry. ETH Zurich, Switzerland, Mitteilungen Nr.105, p. 235: Institute of Geodesy and Photogrammetry, Diss. ETH No. 18515.

[2] Ministerio de Fomento. (2018). Plan estratégico para el desarrollo del sector civil de los drones en España 2018- 2021. Madrid: Gobierno de España. Obtenido de https://www.fomento.gob.es/recursos_mfom/paginabasica/recursos/plan_estrategico_drones_2018-2021_0.pdf

[3] Berra, E. F., & Peppa, M. V. (2020). Advances and challenges of UAV SFM MVS Photogrammetry and Remote Sensing: short review. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-3/W12-2020, 22-26. doi:10.1109/LAGIRS48042.2020.9285975

[4] Zhong Y., Xin Hu, Chang Luo, Xinyu Wang, Ji Zhao, Liangpei Zhang, WHU-Hi: UAV-borne hyperspectral with high spatial resolution (H2) benchmark datasets and classifier for precise crop identification based on deep convolutional neural network with CRF, Remote Sensing of Environment,Volume 250, 2020, 112012, ISSN 0034-4257, https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112012

[5] Zhang C., Peter M. Atkinson, Charles George, Zhaofei Wen, Mauricio Diazgranados, France Gerard, Identifying and mapping individual plants in a highly diverse high-elevation ecosystem using UAV imagery and deep learning, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 169, 2020, Pages 280-291,ISSN 0924-2716, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.09.025.

[6] Yel, S. G. and Tunc Gormus, E., "Exploiting hyperspectral and multispectral images in the detection of tree species: A review", Frontiers in Remote Sensing, vol. 4, Art. no. 1136289, 2023. doi:10.3389/frsen.2023.1136289.

[7] Aria, M., Cucurullo, C. "bibliometrix: An R-tool for comprensive science mapping analysis" Journal of Informatics, vol. 11, no. 4, pages 959-975, 2017.

[8] Car, Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca. (2004). Estrategia corporativa para la caracterización con fines de manejo y conservación de áreas de páramo en el territorio CAR. Bogotá D.C.: CAR. Informe final.

[9] Acosta Rubiano, D. A. (2024). Catálogo ilustrado de plantas y líquenes representativos del parque ecológico "Matarredonda" del páramo El Verjón en Bogotá, Cundinamarca (Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia). Universidad Distrital Francisco José de Caldas. http://hdl.handle.net/11349/41032

[10] Keshava, N. (2003). A survey of spectral unmixing algorithms. Lincoln Laboratory Journal, 14(1), 55-78.

[11] Campos Jara, M. A. (2020). Análisis de imágenes hiperespectrales geológicas mediante herramientas de aprendizaje de máquinas [Tesis de grado, Universidad de Chile]. Repositorio Académico de la Universidad de Chile.

[12] Green, A. A., Berman, M., Switzer, P., & Craig, M. D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 26(1), 65-74. https://doi.org/10.1109/36.12050

[13] Hyvärinen, A., & Oja, E. (2000). Independent component analysis: Algorithms and applications. Neural Networks, 13(4-5), 411-430.

[14] Jensen, J. R. (2015). Introductory digital image processing: A remote sensing perspective (4ta ed.). Pearson.

[15] Breiman, L. (2001). Bosques aleatorios. Aprendizaje automático, 45(1), 5-32.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Defesa de Borda Orientada a SDN: Desafios de Sincronização e Persistência de Regras na Mitigação de Ameaças Mirai-like

SDN-Oriented Edge Defense: Synchronization and Rule Persistence Challenges in Mirai-like Threat Mitigation

Clayton Menezes Silva
Universidade de Brasília - UnB
Brasília - Brazil
clayton.silva@redes.unb.br

Victor Lima dos Santos
Universidade de Brasília - UnB
Brasília - Brazil
victor.santos@redes.unb.br

Georges Daniel Amvame Nze
Universidade de Brasília - UnB
Brasília, Brazil
georges@unb.br

João José Costa Gondim
Universidade de Brasília - UnB
Brasília, Brazil
gondim@unb.br

Francisco Lopes de Caldas Filho
Universidade de Brasília - UnB
Brasília, Brazil
francisco.lopes@uiot.org

Fábio Lúcio Lopes de Mendonça
Universidade de Brasília - UnB
Brasília, Brazil
fabio.mendonca@redes.unb.br

***Resumo* — A insegurança em dispositivos IoT exige defesas dinâmicas como SDN, mas a literatura carece de validações em *hardware* real. Este estudo avalia empiricamente a mitigação de ataques Mirai integrando o controlador ONOS a um *switch* Dell comercial. Os resultados expuseram limitações críticas, como inconsistência de identificadores de fluxo e persistência de regras no plano de dados. Demonstramos que essas falhas são neutralizáveis via *software*: com uma rotina de verificação de estado, a persistência de regras órfãs foi eliminada. Conclui-se que a confiabilidade operacional em *switches* comerciais é viável e ágil, desde que o controlador compense a assincronia do *hardware* e garanta a escalabilidade do sistema.**

Palavras-Chave **- Escalabilidade, Generalização, Hardware-in-the-loop, Machine Learning, Mirai, OpenFlow, SDN, Segurança IoT.**

***Abstract* — IoT device insecurity requires dynamic defenses such as SDN, but the literature lacks real hardware validation. This study empirically evaluates Mirai mitigation by integrating the ONOS controller with a commercial Dell switch. Results exposed critical hardware limitations, such as flow identifier inconsistencies and rule persistence. We demonstrate that these failures are software neutralizable: after implementing a state verification routine, orphaned rule persistence was eliminated. We conclude that operational reliability in commercial switches is feasible and agile, provided the controller compensates for hardware asynchrony and ensures system scalability.**

Keywords - Generalization, Hardware-in-the-loop, IoT Security, Machine Learning,Mirai, OpenFlow, Scalability, SDN.

I. Introdução

A rápida proliferação da Internet das Coisas (IoT) redefiniu o perímetro de segurança das redes modernas. Dispositivos como câmeras IP, sensores industriais e equipamentos embarcados introduzem um ecossistema heterogêneo caracterizado por firmware obsoleto e ausência de mecanismos nativos de proteção (*hardening*). Conforme detalhado na literatura [1], essas vulnerabilidades tornam tais dispositivos vetores primários para *botnets* como a Mirai, que exploram credenciais fracas para estabelecer redes massivas de Negação de Serviço Distribuída (DDoS). O desafio é acentuado pela ineficácia de soluções tradicionais: *firewalls* de borda são cegos ao tráfego lateral interno, enquanto sistemas EDR (*Endpoint Detection and Response*) são inaplicáveis devido à impossibilidade de instalar agentes de software em dispositivos IoT proprietários [11].

Neste contexto, as Redes Definidas por Software (SDN) emergem como uma arquitetura viabilizadora para a segurança programável. Ao desacoplar o plano de controle do plano de dados, o paradigma SDN permite o monitoramento centralizado e a aplicação dinâmica de políticas, transformando a infraestrutura de rede em um sistema de defesa ativo [2]. Trabalhos recentes têm explorado o uso de SDN para orquestração de segurança, frequentemente integrando técnicas avançadas de

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

Aprendizado de Máquina e Aprendizado Federado para a detecção de intrusões em ambientes IoT, como visto em Romani [14] e Mbongo [15]. Essas abordagens buscam aproximar a infraestrutura de rede do conceito de XDR (*Extended Detection and Response*), permitindo uma defesa *sem agente* (*agentless*) capaz de isolar ameaças com granularidade de fluxo [12].

Contudo, existe uma lacuna metodológica na literatura vigente: a predominância de validações realizadas em ambientes emulados, como o Mininet [4],[5]. Embora úteis para prova de conceito algorítmica, simulações de software abstraem as restrições físicas dos *Application-Specific Integrated Circuits* (ASICs) presentes em *switches* comerciais. Fatores críticos como o tamanho limitado da memória TCAM, a latência de instalação de regras e a consistência eventual entre controlador e *switch* são frequentemente ignorados, resultando em propostas que podem falhar sob condições reais de operação [10].

Motivado por essa lacuna metodológica, este trabalho investiga a viabilidade operacional de utilizar SDN e *OpenFlow* para mitigar a propagação de *botnets* em um ambiente contendo *hardware* real. Avaliamos um mecanismo de detecção baseado em heurísticas determinísticas leves operando em uma topologia híbrida (composta por um *switch* físico Dell S3048-ON [13] e instâncias *Open vSwitch*). Embora o estudo englobe a comparação entre uma mitigação nativa (via controlador Ryu) e uma mitigação desacoplada via API REST (controlador ONOS [3]), nosso foco central recai sobre os desafios de sincronização no plano de dados físico. A principal contribuição deste estudo é a caracterização e correção de inconsistências operacionais, especificamente a instabilidade na identificação de fluxos e a retenção indevida de regras de bloqueio (regras *zumbis*), que emergem exclusivamente na interação com o *hardware* comercial. Os resultados evidenciam que a eficácia da defesa SDN depende criticamente da capacidade do controlador em compensar a assincronia inerente a equipamentos físicos de borda.

Diante desse cenário, as contribuições centrais desta pesquisa são: (i) validação empírica da mitigação Mirai em topologia híbrida com hardware comercial, distanciando-se de simulações puras; (ii) caracterização de anomalias críticas sob estresse reativo, como a instabilidade de identificadores e o acúmulo de regras zumbis; e (iii) design de um mecanismo compensatório via software (Verificação em Malha Fechada) que neutraliza as assincronias do plano de dados físico.

II. Trabalhos Relacionados

A literatura sobre segurança em IoT assistida por SDN pode ser categorizada em três domínios principais: (i) caracterização de botnets, (ii) técnicas de detecção baseadas em ML e (iii) avaliações de desempenho de arquiteturas SDN.

No domínio da caracterização, Antonakakis [1] estabeleceram a fundação para a compreensão da botnet Mirai, demonstrando como o uso disseminado de credenciais padrão e a ausência de *hardening* em dispositivos embarcados facilita o comprometimento em larga escala. Complementarmente, Meidan [11] propuseram o N-BaIoT, evidenciando que dispositivos IoT infectados exibem padrões de tráfego volumétrico e comportamental estáveis, o que viabiliza a detecção por anomalia na rede, sem a necessidade de inspeção profunda de pacotes (DPI).

No campo da mitigação via SDN, Scott-Hayward [2] e Shinan [12] consolidaram a visão de que a flexibilidade do plano de dados permite respostas dinâmicas superiores aos *firewalls* estáticos. Estudos pioneiros como os de Braga [8] e Giotis [9] validaram o uso de métricas *OpenFlow* para detecção de DDoS. Mais recentemente, a fronteira da pesquisa moveu-se para a integração de inteligência artificial: Romani [14] exploraram o Aprendizado Federado para mitigar ataques preservando a privacidade dos dados, enquanto Mbongo [15] e Kalimuthu e Velumani [16] desenvolveram *frameworks* de *Deep Learning* (como Conv1D-GRU) para alta precisão na detecção de intrusões em redes de sensores.

Entretanto, uma análise crítica desses trabalhos revela uma limitação metodológica recorrente: a dependência de ambientes emulados. A vasta maioria das propostas, incluindo [4] e [5], valida seus resultados no Mininet. Embora funcional para lógica algorítmica, essa abordagem ignora restrições físicas documentadas por Wijeratne [10], tais como a latência de atualização da TCAM e a assincronia de *buffers* em *switches* comerciais. Nosso trabalho se diferencia dessa vertente ao focar na validação experimental em hardware *commodity* (Dell S3048-ON), investigando as falhas operacionais que algoritmos sofisticados de *Machine Learning* não conseguem prever quando isolados do *chão de fábrica* da rede física.

III. Metodologia

A estratégia experimental foi concebida para avaliar o comportamento de mitigação em um cenário *hardware-in-the-loop* (hardware no circuito), distanciando-se das abordagens puramente simuladas que prevalecem na literatura vigente [4]. O ambiente reproduz uma célula de rede de borda típica e híbrida, integrando elementos virtuais e um *switch* físico comercial. Essa abordagem permite observar os limites estritos de memória e processamento inerentes aos *chipsets* reais, impondo restrições críticas de sincronização ao plano de controle sob diferentes abordagens de mitigação.

A. Arquitetura e Restrições de Hardware

O núcleo do plano de dados é constituído por um *switch* físico Dell S3048-ON. Conforme as especificações do fabricante [13], este equipamento é representativo de switches de acesso empresarial (*Top-of-Rack*), mas apresenta limitações significativas em comparação a roteadores de núcleo baseados em FPGA [10]. O dispositivo foi configurado estritamente em modo *OpenFlow-only* (versão 1.3). Esta decisão arquitetural força o processamento de regras para a tabela de fluxo primária (*Table* 0), criando um cenário de estresse ideal para testar a sincronização entre o controlador e o hardware.

A seleção dos controladores foi precedida por uma fase de validação de compatibilidade. Testes preliminares com controladores SDN, como Faucet e OpenDaylight, bem como tentativas de integração com sistemas operacionais abertos, como Cumulus Linux, revelaram-se inviáveis devido à arquitetura fechada do chipset proprietário do *switch*. A análise da documentação técnica [13] corroborada pelos testes práticos indicou que o suporte ao protocolo *OpenFlow* neste equipamento possui restrições de *firmware* que comprometeram a estabilidade com outras plataformas, restringindo a viabilidade operacional, neste cenário, aos controladores Ryu e ONOS. Essa barreira de interoperabilidade reforça a premissa deste estudo de que a

ISBN: 978-989-36481-2-4

implementação de SDN na borda é frequentemente ditada por limitações de *hardware* proprietário em detrimento da flexibilidade de software.

Para a orquestração do plano de controle, o experimento estrutura-se no contraste de duas ferramentas. A mitigação nativa é conduzida pelo controlador Ryu, que atua como linha de base para o desempenho do protocolo *OpenFlow* puro. Em contrapartida, a mitigação desacoplada é gerida pela plataforma ONOS (versão 2.7 LTS) [3], escolhida por sua arquitetura distribuída e suporte a aplicações externas. Questões de consistência nesse tipo de ecossistema já foram documentadas teoricamente [6], [7], e nosso objetivo prático é verificar como o atraso nessas engrenagens de *software* impacta a segurança em tempo real.

A complexidade dessa segunda abordagem, ancorada na arquitetura modular do ONOS (ilustrada conceitualmente na Fig. 1), é o principal vetor dos desafios investigados neste trabalho. A separação lógica entre as camadas Norte (*Northbound*), Núcleo Distribuído (*Distributed Core*) e Sul (*Southbound*) cria um gargalo crítico de sincronização: enquanto o módulo externo de detecção utiliza a API REST (Norte) para a aplicação reativa de políticas, a interface Sul emprega o protocolo *OpenFlow* para a comunicação direta com o chipset do *switch* Dell. Consequentemente, a eficácia da defesa e a prevenção de regras retidas no *hardware* ficam intrinsecamente atreladas à estabilidade e ao tempo de processamento do Núcleo Distribuído.

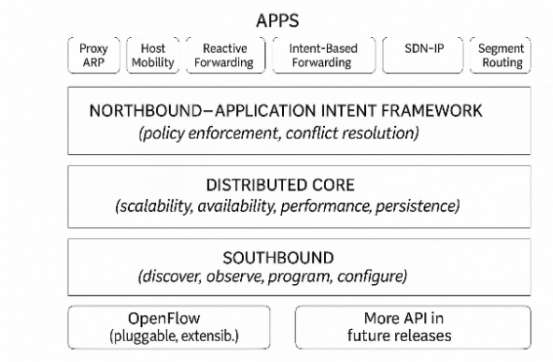


Figura 1. Visão geral conceitual da arquitetura modular do ONOS, destacando as camadas críticas de comunicação: *Southbound* (OpenFlow) e *Northbound* (API para aplicação de políticas).

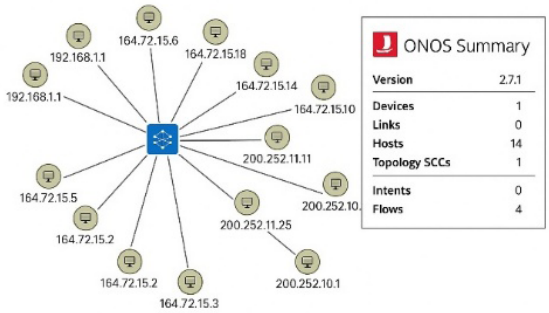


Figura 2. Topologia física e lógica descoberta pelo controlador ONOS que representa igualmente, a topologia do controlador Ryu. A configuração em estrela maximiza a carga de processamento no único switch Dell S3048-ON para validação empírica.

B. *Modelo de Ameaça e Heurísticas de Detecção*

O cenário experimental utiliza uma máquina virtual alvo, conectada à interface física do switch Dell. Para garantir a precisão dos resultados, implementamos um sensor de telemetria customizado em Python que realiza a leitura direta dos contadores do kernel Linux (*rx_bytes* e rx *packets*) com amostragem de 1 segundo. Para emular o comportamento de uma *botnet* IoT do tipo Mirai, desenvolvemos um módulo de detecção externo. A lógica de detecção baseia-se em heurísticas de tráfego leves (NBA - *Network Behavior Analysis*), uma abordagem validada por Braga [8] e Giotis [9]. Embora o experimento foque na Mirai, essa heurística baseada em PPS é agnóstica à assinatura, permitindo a generalização para outras botnets DDoS volumétricas. Adicionalmente, optou-se por heurísticas em vez de modelos de *Machine Learning* [14], [15] para isolar inconsistências do hardware físico, evitando que o *overhead* de inferência de ML mascarasse a latência intrínseca do plano de controle.

Para consolidar a lógica implementada, o Algoritmo 1 sumariza a rotina de detecção autônoma e mitigação baseada em volume de tráfego (PPS). Este mesmo motor heurístico foi projetado para bifurcar sua atuação: na abordagem nativa (Ryu), a mitigação é injetada diretamente via mensagens OpenFlow; na desacoplada (ONOS), o motor atua na camada *Northbound* via API REST. A abordagem também incorpora listas de proteção (*whitelists*) e resfriamento dinâmico para evitar falsos positivos de hosts legítimos respondendo ao ataque.

Algoritmo 1 Lógica Unificada de Detecção e Mitigação

Entrada: T_{pps} (Limiar), A_{prot} (Whitelist), Controlador (Ryu ou ONOS)
laço contínuo
  para cada cada porta p com fluxo PPS_p e origem MAC_{src} **faça**
    se $PPS_p > T_{pps}$ **então**
      se $p \notin AtaquesAtivos$ **and** $MAC_{src} \notin A_{prot}$ **então**
        Adicionar p ao conjunto $AtaquesAtivos$
        se Controlador $=$ Ryu **então**
          Injetar regra OpenFlow (DROP) nativamente
        senão
          Acionar API REST (ONOS) e auditar estado
        fim se
      senão
        Atualizar cronômetro de pico para a porta p
      fim se
    senão se $p \in AtaquesAtivos$ **and** $PPS_p < 10$ **and** $\Delta t > 15s$ **então**
      Remover mitigação e declarar normalização de p
    fim se
  fim para cada
  Aguardar ciclo de telemetria ($2s$)
fim laço contínuo

C. *Mantenha as Especificações Corretas*

O fluxo de mitigação segue um ciclo fechado. Ao detectar a violação, o sistema injeta uma regra de bloqueio (DROP) na infraestrutura correspondente. Para validar a eficácia e identificar as inconsistências reportadas na Seção 4, o ambiente foi instrumentado para medir a Latência de Mitigação e verificar a Consistência de Estado entre o banco de dados lógico dos controladores e a tabela física dos switches. Estas métricas são fundamentais para analisar a disputa (*trade-off*) entre agilidade

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

reativa e integridade operacional do *hardware* comercial.

IV. Resultados e Discussão

A avaliação experimental foi conduzida para verificar duas hipóteses centrais: (i) a eficácia da latência de mitigação em uma arquitetura centralizada e (ii) a consistência operacional do protocolo *OpenFlow* 1.3 sobre hardware comercial (*commodity hardware*) sob estresse.

A. Desempenho da Mitigação Reativa

Inicialmente, a topologia foi submetida a cenários de ataque sintéticos controlados, compreendendo vetores de *Flooding* (exaustão volumétrica de pacotes) e *Scanning* (varredura horizontal de portas). O objetivo dessa etapa foi estabelecer uma linha de base de desempenho rigorosa, forçando o plano de controle a operar sob estresse contínuo. Durante as avaliações, o mecanismo de detecção heurística demonstrou a capacidade de identificar a quebra de padrão, usando o método de monitoramento de telemetria, no qual qualquer tráfego que fosse acima do esperado começa computar a injeção da regra de bloqueio correspondente (*FlowMod* com instrução *Drop*) em uma janela de tempo surpreendentemente curta. A latência de reação do sistema , que engloba a coleta da telemetria, o processamento lógico da anomalia no *script* e o disparo A latência de reação do sistema , que engloba a coleta da telemetria, o processamento lógico da anomalia no *script* e o disparo da instrução de mitigação, foi registrada na ordem de 10 a 11 milissegundos operando sobre o plano de controle do ONOS, conforme detalhado na Tabela I.

TABELA I. Comparativo de Latência de Reação: Nativo vs. API

Etapa da Defesa	**Ryu (Nativo)**	**ONOS (API)**
Janela de Detecção	5.0 s	5.0 s
Processamento da Regra	~ 0.26 ms	10.89 ms
Confirmação do Switch	N/A	< 1 ms
Reação Total ()	~ 0.26 ms	~11 ms

A obtenção dessa métrica, ilustrada pelo log forense na Fig. 3, atesta a alta eficiência operacional da arquitetura proposta. Em um cenário de segurança de redes tradicional, a detecção de anomalias e a respectiva atualização de Listas de Controle de Acesso (ACLs) em *firewalls* legados frequentemente exigem intervenção humana ou rotinas de convergência lentas (como a propagação manual de rotas de *Blackhole*), demandando segundos ou até minutos críticos para isolar uma ameaça. Em contrapartida, o tempo de reação ultrabaixo documentado neste experimento comprova empiricamente que o *overhead* introduzido pela comunicação REST e pelo *parsing* de arquivos JSON na camada Northbound é marginal face ao ganho de agilidade. Essa latência na casa dos milissegundos garante que os vetores de ataque sejam estrangulados em sua fase inicial de rampa, impedindo que os nós infectados estabeleçam conexões persistentes ou saturem os buffers físicos do equipamento. Por conseguinte, este resultado valida de forma contundente a viabilidade do uso de controladores SDN como orquestradores de defesa autônoma. Ao atuar de forma centralizada e independente dos dispositivos finais (*agentless*), a arquitetura supera as limitações reativas humanas e habilita a contenção cirúrgica de ameaças de propagação acelerada, como a Mirai, neutralizando-as estritamente na borda antes que comprometam o núcleo da rede.

```
MIRAI-LIKE REPORT - ONOS FLOW ANALYSIS (Cycle
    20:29:28)
Sources analyzed: 3 | Total Flows: 3 | Total Packets
    : 184,210

TOP SOURCES BY METRICS:
 * BC:24:11:4F:FE:D7   Rate: 44556.00 pkt/s (26.44
    Mbps) [ANOMALY]
 * BC:24:11:57:A3:70   Rate: 15641.00 pkt/s (09.29
    Mbps) [ANOMALY]
 * B8:27:EB:D8:FA:5B   Rate: 1.00 pkt/s     (0.00
    Mbps) [NOMINAL]

DETECTION SUMMARY:
 [SYN FLOOD] BC:24:11:4F:FE:D7, BC:24:11:57:A3:70
 Aggregated Attack Volume: 60198.00 pkt/s | 35.73
    Mbps

MITIGATION ACTIONS:
 Alert detected at:      20:29:28.757
 Logical Rule (API):     ID 2962602258798038
 Hardware Cookie:        0x2000000000000000
 Mitigation Time:        20:29:28.768
 Control Plane Latency: 10.89 ms
```

Figura 3. Log forense do controlador ONOS detalhando a detecção volumétrica e a divergência de identificadores na injeção da regra.

B. Inconsistência de Identificação de Fluxos e Bypass do Intent Framework

Uma divergência arquitetural crítica foi observada na interação via API REST. Ao solicitar a inserção de uma regra de bloqueio, o controlador ONOS retorna um identificador lógico de regra (*Rule ID*). Teoricamente, este *ID* deveria ser suficiente para a remoção programática da regra posteriormente. No entanto, a validação experimental demonstrou que o *ID* retornado na confirmação da criação não corresponde necessariamente ao *Flow Cookie* ou índice físico adotado pelo agente OpenFlow do equipamento comercial.

Essa opacidade da abstração é um sintoma direto da diferença entre operar em topologias virtuais e em infraestruturas físicas de borda. Enquanto simuladores como o Mininet refletem o estado lógico instantaneamente, o *chipset* do *switch* executa o *parsing* do protocolo e aloca a memória gerando seu próprio rastreio interno e assíncrono.

O impacto dessa assincronia foi agravado por uma decisão de *design* na nossa mitigação. Uma análise detalhada do estado do controlador (conforme o Sumário de Topologia) revelou a presença de fluxos ativos (*Flows* = 4), mas a ausência de intenções de alto nível (*Intents* = 0). Isso confirma que o sistema operou diretamente sobre a API de Fluxos (*Flow Rule API*), contornando o Application Intent Framework da camada Northbound. Embora esse bypass seja justificado para evitar o *overhead* de compilação e atingir a latência reativa documentada de ~11 ms, ele abdica dos mecanismos nativos de reconciliação do ONOS.

Ao preterir o *Intent Framework* em favor da velocidade, o sistema transfere a responsabilidade do gerenciamento de estado para a aplicação externa. O resultado prático dessa escolha é uma falha silenciosa: ao tentar remover a mitigação usando apenas o ID lógico retornado pela API, o orquestrador registra sucesso (HTTP 200 OK), mas o *hardware* ignora o comando por não reconhecer o ponteiro. Isso demonstra um *trade-off* fundamental em redes SDN comerciais: a velocidade da injeção direta penaliza a consistência de estado, obrigando o sistema de

ISBN: 978-989-36481-2-4

segurança a implementar sua própria rotina de varredura ativa de *pipeline* (Malha Fechada) para resgatar o ID real e expurgar a regra com sucesso.

C. Persistência de Regras Órfãs (Diagnóstico Inicial)

O achado mais significativo deste estudo refere-se ao grave fenômeno de persistência de regras, ilustrado pela dessincronização entre a base de dados lógica do Plano de Controle e o Plano de Dados físico. Em aproximadamente 15% das iterações de teste de remoção, observou-se que o *switch* mantinha a regra de descarte (*Drop*) ativa em sua tabela TCAM, mesmo após o controlador ONOS confirmar via API que a regra havia sido expurgada (código HTTP 200 OK).

Cumpre destacar que, embora a topologia de validação empregue um equipamento da linha Dell S3048-ON, esse comportamento de retenção anômala não é uma limitação exclusiva deste modelo ou fabricante, mas sim um sintoma crônico inerente a uma ampla gama de *switches bare-metal* comerciais. Tais dispositivos comumente empregam agentes *OpenFlow* de código aberto que apresentam gargalos de tradução ao interagir com as interfaces fechadas (SDKs) de seus *Application-Specific Integrated Circuits* (ASICs) proprietários, originando essas inconsistências de estado.

A consequência direta desse fenômeno de retenção indevida é o risco de exaustão da memória do comutador. Ao contrário de ambientes virtuais que alocam memória ram dinamicamente, switches de borda (*Top-of-Rack*) possuem memórias TCAM (*Ternary Content-Addressable Memory*) de tamanho estrito [10]. O acúmulo silencioso de regras zumbis resultantes de ataques cíclicos pode lotar a tabela de fluxos rapidamente. Quando a TCAM esgota, novos tráfegos legítimos são enviados inteiramente para a CPU do controlador (*Packet-In*), gerando um ataque de negação de serviço indireto à própria arquitetura SDN. Isso evidencia que uma abordagem de orquestração de segurança baseada apenas no princípio de enviar e esquecer' (*fire-and-forget*) é insustentável em hardware comercial.

D. Solução via Software: O Algoritmo de Verificação

Para neutralizar a ameaça das regras zumbis sem alterar o *firmware* proprietário do switch, o detector foi atualizado com um mecanismo de Verificação de Consistência em Malha Fechada. Nesta nova versão de software, após enviar o comando de remoção de um bloqueio, o algoritmo aguarda um tempo de propagação empírico (), necessário para a convergência da memória do equipamento, e consulta ativamente a tabela de fluxos no plano de dados. Caso a regra ainda seja encontrada, confirmando a retenção indevida, um comando reativo de *Force Delete* é injetado utilizando o *Flow Cookie* real recém-descoberto, contornando definitivamente a falha de mapeamento do ID lógico.

Com essa implementação pragmática, os testes demonstraram que a persistência de regras órfãs foi eliminada em 100% dos casos operacionais. Vale ressaltar que esse mecanismo compensatório introduz um *overhead* computacional mínimo ao controlador, visto que a rotina de varredura restringe-se exclusivamente aos ciclos de desativação de mitigação, não interferindo na agilidade reativa contra novos ataques. A eficácia contínua dessa malha fechada operando via API (ONOS), contrastada com a abordagem nativa direta (Ryu), é evidenciada na Fig. 4, que detalha o comportamento do alvo durante um surto intenso de inundação.

A análise das curvas na Fig. 4 consolida o impacto arquitetural de cada abordagem. A linha vermelha representa o controlador nativo (Ryu), que, por se comunicar puramente em OpenFlow, injeta a regra de bloqueio quase imediatamente após exceder o limiar de anomalia (em t=24s), suprimindo o tráfego malicioso em sua rampa inicial. Em contraste, a linha azul (ONOS via API) ilustra o custo prático do *overhead* sistêmico: o alerta gerado passa pela API *Northbound* e é processado pelo Núcleo Distribuído, gerando um atraso de transição. Essa breve janela permite que o ataque atinja um pico de 68.066 PPS antes do bloqueio efetivo no *hardware* em t=27s. Contudo, o gráfico comprova que ambos os paradigmas convergem para o mesmo estado de segurança, restaurando a interface ao fluxo nominal.

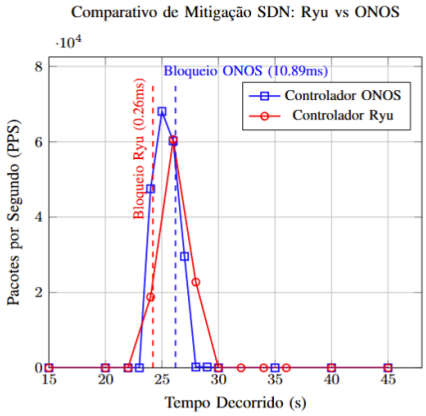


Figura 4. Comparativo do tempo de resposta e supressão de tráfego DDoS entre os controladores nativos (Ryu) e via API (ONOS). A inundação é neutralizada quase instantaneamente.

Como observado na Tabela II , mesmo com a carga massiva de 35,73 Mbps imposta pelo ataque SYN Flood, a interface retornou ao seu estado nominal (1 PPS) logo em seguida. Isso comprova empiricamente que, através da inserção de rotinas de tolerância a falhas na aplicação, a inteligência de software no controlador SDN é inteiramente capaz de sobrepor e compensar as latências e dessincronizações oriundas do hardware.

TABELA II. DESEMPENHO DA MITIGAÇÃO ATIVA SOB ATAQUE SYS FLOOD

Tempo (s)	PPS	Mbps	Estado do Sistema
10-23	1	0,00	Operação Nominal
24	47.510	27,96	Detecção de Anomalia
25	68.066	40,00	Pico de Inundação
26	60.198	35,73	Instalação de Regra (ONOS)
27	29.582	17,45	Queda de Tráfego (Supressão)
28	228	0,10	Mitigação Efetiva
30+	1	0,00	Fluxo Normalizado

E. Sobrecarga da API REST e do Núcleo Distribuído

A disparidade de latência observada entre o controlador na-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

tivo (~0.26 ms) e a abordagem via API *(~11 ms)* não reflete uma ineficiência de processamento bruto da rede, mas sim o custo inerente das abstrações de software do ONOS. Mesmo contornando o *Intent Framework*, a inserção de uma política via API REST na camada *Northbound* exige o processo de desserialização de cargas JSON e a validação de estado pelo Núcleo Distribuído (*Distributed Core*) antes de ser traduzida para *FlowMod* na interface *Southbound*. Em cenários de *botnets* altamente agressivas, esses milissegundos adicionais de processamento transiente permitem que milhares de pacotes forjados atinjam o comutador antes que a mitigação faça efeito, reforçando a necessidade de defesas que tolerem a latência das chamadas REST.

F. Vulnerabilidade Topológica

Além do *overhead* sistêmico, as restrições físicas do ambiente expuseram um risco intrínseco de exaustão de infraestrutura. O sumário de topologia refletiu a operação centralizada de 14 *hosts* (e.g., originados das sub-redes 164.72.15.0/24 e 200.252.10.0/24) dependentes de um único comutador físico. Durante as avaliações de injeção Mirai-like com endereços MAC e IP forjados, o atacante gerou fluxos inéditos que invariavelmente causaram falha na correspondência de tabela (*Table Miss*).

Pelo comportamento reativo padrão do protocolo OpenFlow, cada cabeçalho de fluxo desconhecido acionou o encaminhamento de uma mensagem *Packet-In* para o controlador. Com 14 portas emulando ataques simultâneos em uma configuração *Top-of-Rack*, o evento culminou em uma Tempestade de Packet-In (*Packet-In Storm*). Esse fenômeno satura a CPU do ASIC e o canal de controle seguro antes mesmo da aplicação de mitigação iniciar o disparo de bloqueio (FlowMod com instrução Drop). Isso demonstra que, em *hardware* comercial, a eficácia do SDN como mitigador reativo de negação de serviço exige não apenas agilidade de código, mas políticas pré-instaladas de *Rate Limiting* no plano de dados para proteger o próprio cordão umbilical entre o *switch* e o controlador.

V. Conclusão

Este trabalho apresentou uma avaliação empírica de mecanismos de defesa SDN contra *botnets* IoT, utilizando infraestrutura de hardware comercial em um cenário hardware-in-the-loop. Os resultados confirmam que, embora a arquitetura SDN ofereça agilidade de resposta comparável a sistemas XDR modernos (com reações na ordem de milissegundos), sua aplicação prática na borda da rede enfrenta barreiras de confiabilidade significativas ligadas tanto à assincronia do plano de dados físico quanto ao *overhead* das abstrações de software.

A principal contribuição deste estudo foi demonstrar que o abismo entre simulações teóricas e a operação física vai além das limitações de memória do ASIC, como a persistência de regras *zumbis*. Constatamos que decisões de *design* na orquestração agravam o cenário: a busca por menor latência de reação via *bypass* do *Intent Framework* resulta na perda de reconciliação de estado nativa, enquanto a configuração topológica centralizada expõe o canal de controle a tempestades exaustivas de *Packet-In*.

Contudo, provamos empíricamente que tais limitações são contornáveis via software. A implementação de uma lógica robusta de verificação de estado (Malha Fechada) corrigiu integralmente as falhas de sincronização de identificadores e o acúmulo de regras retidas. Concluímos que a adoção de *switches bare-metal* comerciais na defesa autônoma de borda é plenamente viável e altamente eficaz, condicionada à utilização de controladores que incorporem inteligência para auditar ativamente o hardware e proteger seu próprio plano de controle contra a saturação.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e computacional do Laboratório LATITUDE, da Universidade de Brasília, a Secretaria Nacional de Assistência Social – SNAS/MDS, a Procuradoria Geral da Fazenda Nacional – PGFN, ao Projeto SISTER City – Sistemas Inteligentes Seguros e em Tempo Efetivo Real para Cidades Inteligentes ao projeto "Sistema de Controle e Unificação de Projetos para o Governo Distrito Federal – SISPRO-DF", ao projeto "Pesquisa, Desenvolvimento e Aplicação de Protótipo do Ambiente de Simulação Didático para Veículos Ciberseguros, Autônomos e Conectados (SD-CyberAuto)". Projeto "Pesquisa, Desenvolvimento e Aplicação – Metodologia para Apoio à Obtenção de Requisitos Éticos e de Privacidade" (Auxílio 514/2023) e a Fundação de Apoio do Distrito Federal - FAP/DF.

Referências Bibliográfica

[1] A. Antonakakis et al., "Understanding the Mirai Botnet," in Proc. 26th USENIX Security Symposium, Vancouver, BC, Canada, 2017, pp. 1093--1110.

[2] S. Scott-Hayward, G. O'Callaghan, and S. Sezer, "SDN Security: A Survey," IEEE Communications Surveys \& Tutorials, vol. 18, no. 1, pp. 623--645, Firstquarter 2016.

[3] P. Berde et al., "ONOS: The Open Network Operating System," IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 11, pp. 107--117, 2014.

[4] A. Tootoonchian et al., "On Controller Performance in Software-Defined Networks," in Proc. 2nd USENIX Workshop on Hot Topics in Management of Internet, Cloud, and Enterprise Networks and Services (Hot-ICE), San Jose, CA, USA, 2012.

[5] J. Ben-Othman et al., "Performances of OpenFlow-Based Software-Defined Networks: An overview," Journal of Networks, vol. 10, no. 10, pp. 563--574, 2015.

[6] S. O. A. Mohammed, "Security Analysis of ONOS Software-Defined Network Platform," Ontario Tech University, Technical Report, 2017.

[7] A. S. Muqaddas et al., "Inter-Controller Traffic to Support Consistency in ONOS Clusters," IEEE Transactions on Network and Service Management, vol. 14, no. 4, pp. 1018--1031, 2017.

[8] R. Braga, E. Mota, and A. Passito, "Lightweight DDoS Flooding Attack Detection Using NOX/OpenFlow," in Proc. IEEE Local Computer Networks (LCN), Denver, CO, USA, 2010, pp. 408--415.

[9] K. Giotis et al., "Combining OpenFlow and sFlow for an effective and scalable Anomaly Detection and Mitigation mechanism on SDN Environments," Computer Networks, vol. 62, pp. 122--136, 2014.

[10] S. Wijeratne et al., "Scalable High Performance SDN Switch Architecture on FPGA for Core Networks," arXiv preprint arXiv:1910.13683, 2019.

[12] I. M. Meidan et al., "N-BaIoT: Network-based Detection of IoT Botnet Attacks Using Deep Autoencoders," IEEE Pervasive Computing, vol. 17, no. 3, pp. 12--22, 2018.

[13] K. Shinan et al., "Machine Learning-Based Botnet Detection in Software-Defined Network: A Systematic Review," Computers & Security, vol. 122, p. 102871, 2022.

[14] Dell Networking, "S3048-ON Specification Sheet," Dell Inc., Round Rock, TX, USA, 2016.

[15] M. F. Romani et al., "Mitigação de ataques ddos em redes iot com aprendizado federado," Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação, no. E77, pp. 160--172, 2025.

[16] K. H. R. Mbongo et al., "Conv1d-gru-self attention: An efficient deep learning framework for detecting intrusions in wireless sensor networks," Future Internet, vol. 17, no. 7, pp. 1--20, 2025.

¿Puede la inteligencia artificial corregir como un profesor?

Comparación en la evaluación de respuestas abiertas

Can Artificial Intelligence Grade Like a Professor?

A Comparison in the Evaluation of Open-Ended Responses

José Luis Ximénez de Sandoval, Marius Vlad, Ekaterina Vlad
Les Roches Global Hospitality Education
Marbella, España
joseluis.ximenez@lesroches.es; mvlad@lesroches.es; evlad@lesroches.es

***Resumen* — Este estudio analiza la capacidad de los modelos de inteligencia artificial generativa para evaluar respuestas abiertas en educación universitaria y reproducir los criterios de calificación de un profesor. La investigación se basa en una muestra de 56 respuestas reales de estudiantes de una asignatura de marketing, inicialmente evaluadas por el docente y posteriormente calificadas por tres sistemas de IA (ChatGPT, Gemini y Copilot) bajo dos escenarios: Few-Shot Learning (FSL), con ejemplos de respuestas previamente corregidas por el profesor, y un escenario neutral, sin ejemplos. La concordancia entre las evaluaciones humanas y las generadas por la IA se analizó mediante el coeficiente de correlación de Pearson, el coeficiente de concordancia de Lin (CCC), el error porcentual absoluto medio (MAPE) y ANOVA de un factor. Los resultados muestran que ChatGPT en escenario neutral y Gemini en escenario FSL presentan la mayor proximidad a las calificaciones del profesor, mientras que Copilot presenta mayores desviaciones. Los hallazgos sugieren que la IA puede constituir una herramienta útil de apoyo a la evaluación académica.**

Palabras **Clave – Inteligencia Artificial en Educación Universitaria; ChatGPT; Gemini; Copilot. Evaluación Automatizada; Corrección de Respuestas Abiertas; Inteligencia Artificial Generativa; Evaluación en Educación Superior**

***Abstract* — This study examines the ability of generative artificial intelligence models to evaluate open-ended responses in higher education and reproduce a professor's grading criteria. The research is based on a sample of 56 real student responses from a marketing course, initially graded by the instructor and subsequently evaluated by three AI systems (ChatGPT, Gemini, and Copilot) under two scenarios: Few-Shot Learning (FSL), where the models received examples of responses previously graded by the professor, and a neutral scenario, without examples. Agreement between human and AI evaluations was analyzed using the Pearson correlation coefficient, Lin's concordance correlation coefficient (CCC), the Mean Absolute Percentage Error (MAPE), and one-way ANOVA. The results show that ChatGPT in the neutral scenario and Gemini in the FSL scenario present the closest alignment with the professor's grades, while Copilot shows greater deviations. The findings suggest that AI can serve as a useful support tool for academic assessment.**

Keywords - Artificial Intelligence in Education; Open-Ended Responses Evaluation; Generative AI; Automated Assessment; Higher Education Assessment.

I. Introducción

La integración de la Inteligencia Artificial (IA) en la educación ha dejado de ser una promesa futurista para convertirse en una herramienta operativa esencial. La educación atraviesa una fase de "revolución" impulsada por la digitalización masiva. [1][2] establecen el marco inicial: la IA ya no es una tecnología periférica, sino un motor que optimiza la gestión y la enseñanza.

La transición hacia modelos digitales de evaluación del alumnado se ha acelerado, desplazando los métodos de evaluación tradicionales (limitados por la fatiga humana y la subjetividad) hacia sistemas automatizados que prometen mayor eficiencia y personalización. La IA no solo busca calificar, sino transformar el acto evaluativo en un proceso continuo de mejora del aprendizaje. [1][2].

Esta evolución es necesaria debido a las limitaciones de los métodos tradicionales, los cuales, a menudo fallan al capturar el espectro completo de habilidades del estudiante por centrarse en la memorización y tareas técnicas. [3]

Pero la irrupción de la IA generativa no solo transforma la corrección, sino también el diseño de las tareas de evaluación. En contextos donde el estudiantado puede apoyarse en herramientas de IA para producir texto, cobran importancia (1) las políticas claras sobre usos permitidos, (2) las rúbricas transparentes que apunten a evidencias de razonamiento propio, y (3) las tareas que promuevan análisis, síntesis y creatividad [4].

Aunque la evaluación automática está ampliamente consolidada en exámenes con preguntas tipo test o de cálculos numérica, su aplicación a respuestas abiertas y preguntas tipo ensayo continúa siendo un ámbito todavía por explorar, desarrollar e implantar de forma generalizada.

La corrección automática de textos plantea desafíos específicos asociados al lenguaje natural, la subjetividad evaluativa

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

y la interpretación contextual, lo que convierte a este campo en un tema emergente en la innovación docente universitaria.

La evidencia disponible indica que la IA puede apoyar significativamente la evaluación de respuestas abiertas en la universidad, sobre todo en usos formativos y contextos de alta escala, siempre que se articule con rúbricas explícitas, criterios de validez y supervisión docente.

En este contexto, las herramientas de inteligencia artificial generativa abren nuevas posibilidades, pero requieren un análisis riguroso de su fiabilidad y alineamiento con los criterios del profesorado.

Este trabajo de investigación presenta un análisis exploratorio centrado en la comparación entre las calificaciones otorgadas por un profesor de marketing y las generadas por ChatGPT, Gemini y Copilot en dos escenarios distintos:

(1) Un escenario FSL (Few-shot learning) donde se le muestra a la IA algunos ejemplos de respuestas y las puntuaciones otorgadas por el profesor.

(2) Un escenario Neutral (N) donde se le asigna a la IA el rol de evaluador utilizando sus propios conocimientos en la materia.

II. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es analizar la capacidad de los modelos de inteligencia artificial generativa (ChatGPT, Gemini y Copilot) para reproducir de forma fiable y coherente los criterios de evaluación humana en preguntas abiertas de tipo ensayo en el contexto de la educación universitaria.

De forma específica, el estudio persigue los siguientes objetivos:

1. Evaluar el grado de concordancia entre las calificaciones otorgadas por un profesor y las generadas por la IA bajo distintos escenarios (few-shot learning y escenario neutral) utilizando métricas estadísticas de correlación, concordancia y error.
2. Analizar la sensibilidad de los modelos a la incorporación de ejemplos evaluados por el docente (few-shot learning), determinando hasta qué punto este procedimiento permite a la IA capturar el estilo, los umbrales y la lógica evaluativa del profesor.
3. Identificar sesgos sistemáticos en las calificaciones generadas por la IA, tales como tendencias a la inflación, compresión o penalización de notas, a través del estudio de distribuciones, medidas de dispersión y análisis gráficos.
4. Examinar la consistencia interna de las puntuaciones producidas por la IA en cada escenario, con el fin de valorar su estabilidad como instrumento de evaluación o de apoyo al docente.
5. Contribuir al debate académico sobre el uso responsable de la IA en la evaluación universitaria, aportando evidencia empírica que permita fundamentar modelos híbridos de corrección (docente-IA) basados en criterios de fiabilidad, equidad y transparencia.

III. Metodología

El presente trabajo adopta un diseño cuantitativo, comparativo y exploratorio, orientado a analizar el grado de concordancia entre las calificaciones otorgadas por un docente universitario y las generadas por los sistema de inteligencia artificial generativa más utilizados en la actualidad (ChatGPT, Gemini y Copilot) en la corrección de preguntas abiertas tipo ensayo.

El estudio se enmarca en un diseño de validación de criterio, en el que la evaluación humana actúa como estándar de referencia frente al cual se contrastan las puntuaciones producidas por la IA bajo distintos esquemas de calibración.

A. Muestra y contexto

La muestra está compuesta por 56 respuestas reales de estudiantes universitarios pertenecientes a una asignatura de marketing. Las respuestas corresponden a una misma pregunta abierta de tipo ensayo, diseñada para evaluar comprensión conceptual, capacidad de análisis y aplicación de contenidos.

Cada respuesta fue corregida inicialmente por el profesor responsable de la asignatura, utilizando una escala de puntuación de 0 a 15 puntos, conforme a los criterios habituales de la asignatura.

B. Procedimiento de evaluación con IA

Las mismas respuestas fueron posteriormente evaluadas por ChatGPT, Gemini y Copilot en dos escenarios experimentales distintos, diseñados para analizar el efecto de la calibración y el sesgo del modelo:

Few-shot learning (FSL): el modelo recibió 6 ejemplos de respuestas previamente corregidas por el profesor junto con sus calificaciones. Dos ejemplos con calificaciones máximas (15 puntos), dos con calificaciones medias (10 puntos) y dos con calificaciones bajas (4 puntos), para inducir el estilo y los criterios de evaluación docente.

Escenario Neutral (N): el modelo evaluó las respuestas utilizando criterios académicos generales, sin ejemplos ni ajustes explícitos.

Una vez mostradas estos seis ejemplos de respuestas con sus valoraciones por parte del profesor, a cada uno de los tres modelos de IA se les proporcionó las restantes 50 respuestas del resto de alumnos y se les solicitó que para cada pregunta ofrecieran dos evaluaciones distintas siguiendo los dos escenarios propuestos

De este modo se generó una colección de 350 puntuaciones (50 puntuaciones del profesor + 50 respuestas x 3 modelos de IA x 2 escenarios).

C. Variables y métricas de análisis

La variable principal es la puntuación numérica asignada a cada respuesta por el profesor y por los tres modelos de IA en sus dos escenarios.

Para cuantificar la proximidad entre las calificaciones humanas y las de la IA se utilizaron cuatro métricas complementarias:

Coeficiente de correlación de Pearson (r): para medir la asociación lineal entre ambas series de puntuaciones.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Coeficiente de concordancia de Lin (CCC): para evaluar simultáneamente precisión y exactitud, es decir, hasta qué punto las puntuaciones de la IA coinciden con las humanas tanto en variabilidad como en nivel absoluto.

Mean Absolute Percentage Error (MAPE): para estimar el error relativo medio entre las puntuaciones reales y las generadas por la IA, permitiendo interpretar la magnitud del desajuste en términos porcentuales.

ANOVA de un factor (One-Way ANOVA): para analizar si existen diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las calificaciones otorgadas por los distintos evaluadores (profesor humano y modelos de IA). Este análisis permite determinar si las variaciones observadas entre sistemas de evaluación responden a diferencias sistemáticas en los criterios de puntuación o si pueden atribuirse a fluctuaciones aleatorias.

Además, se analizaron medidas descriptivas (media, mediana, moda, varianza y desviación típica) y se emplearon representaciones gráficas (diagramas de dispersión, diagramas de cajas y distribuciones de frecuencia) para detectar patrones de sesgo, compresión o inflación de notas.

IV. Resultados

La Tabla 1, muestra los resultados de las métricas utilizadas. En todas las medidas y técnicas utilizadas que los dos modelos de IA que más se acercan a la valoración del profesor son el de ChatGPT Neutral, es decir sin recibir los ejemplos del profesor y aplicando sus propios conocimientos en la materia y el de Gemini FSL, es decir utilizando los 6 ejemplos para entrenar al modelo para utilizar unos criterios de evaluación similar a la del profesor.

El coeficiente de correlación es mayor en estos casos (0,75 y 0,72) que en el resto de escenarios. El CCC también mayor que el resto (0.71 y 0,69), y el MAPE (17.16% y 18,05%) significativamente menor que los otros escenarios de evaluación, lo que indica que la IA logra una mayor aproximación a las calificaciones humanas cuando utiliza como referencia ejemplos con respuestas evaluadas por el profesor.

Tabla 1. Indicadores

	Profesor	ChatGPT FSL	**ChatGPT Neutral**	**Gemini FSL**	Gemini Neutral	Copilot FSL	Copilot Neutral
Media	10.73	8.70	**9.75**	**9.91**	7.83	9.30	5.89
Moda	11	6	**12**	**8.5**	6	15	4
Mediana	11	6	**10**	**9.75**	7.5	10	6
Max	15	15	**14**	**15**	14	15	11
Min	3	5	**1**	**1**	0.5	5	1
Rango	12	10	**13**	**14**	13.5	10	10
Varianza	7.73	16.10	**8.41**	**8.48**	8.74	16.14	5.60
Desviación típica	2.78	4.01	**2.90**	**2.91**	2.96	4.02	2.37
Coef. De Correl.		0.44	**0.75**	**0.72**	0.68	0.46	0.60
MAPE		34.71%	**17.16%**	**18.05%**	30.76%	31.95%	45.07%
Coeficiente de Concordancia de Lin (CCC)		0.35	**0.71**	**0.69**	0.45	0.40	0.21

La Tabla 2 proporciona la información sobre la ANOVA de 1 factor. El análisis de la varianza de un factor se utilizó para determinar si existían diferencias estadísticamente significativas entre las medias de las calificaciones otorgadas por el profesor y las generadas por los distintos modelos de inteligencia artificial en cada escenario evaluado. Para ello se comparó el valor del estadístico F obtenido en cada caso con el valor crítico de referencia (F crítico = 3.9273). Cuando el valor de F supera el valor crítico, se rechaza la hipótesis nula (H0), lo que indica que las medias de las calificaciones difieren significativamente entre el profesor y el modelo de IA analizado. Por el contrario, cuando F es inferior al valor crítico, no se rechaza la hipótesis nula, lo que sugiere que no existen diferencias estadísticamente significativas entre ambas evaluaciones.

Los resultados muestran que únicamente dos escenarios presentan medias estadísticamente equivalentes a las del profesor: ChatGPT en escenario Neutral (F = 3.29) y Gemini en escenario Few-Shot Learning (F = 2.29), ya que en ambos casos el estadístico F es inferior al valor crítico. Esto indica que las puntuaciones medias generadas por estos modelos no difieren de forma significativa de las del evaluador humano, lo que refuerza la evidencia obtenida previamente mediante las métricas de correlación, concordancia y error. En términos prácticos, estos resultados sugieren que ambos modelos son capaces de reproducir con mayor fidelidad el nivel medio de exigencia del profesor.

Por el contrario, en los restantes escenarios —ChatGPT FSL, Gemini Neutral, Copilot FSL y Copilot Neutral— el valor del estadístico F supera claramente el umbral crítico, lo que implica diferencias significativas entre las medias de las calificaciones del profesor y las generadas por la IA. En particular, el caso de Copilot Neutral presenta el mayor valor de F (96.64), evidenciando una desviación muy notable respecto al patrón de evaluación humano. Estos resultados confirman que no todos los modelos ni todas las configuraciones de prompt reproducen de forma equivalente los criterios del docente, y subrayan la importancia de evaluar empíricamente la alineación entre sistemas de inteligencia artificial y evaluación humana antes de utilizar estas herramientas como apoyo en procesos de corrección académica.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Tabla 2. ANOVA de 1 factor

Escenario IA	F	Decisión (F Crít: 3.9273)
CHATGPT FSL	9.5622	Rechazamos H0 Las medias son distintas
CHATGPT Neutral	*3.2865*	*Aceptamos H0 Las medias de los grupos son iguales*
GEMINI FSL	*2.2886*	*Aceptamos H0 Las medias de los grupos son iguales*
GEMINI Neutral	28.109	Rechazamos H0 Las medias son distintas
COPILOT FSL	4.7019	Rechazamos H0 Las medias son distintas
COPILOT Neutral	96.644	Rechazamos H0 Las medias son distintas

La Fig.1 presenta la distribución de calificaciones obtenidas bajo los siete escenarios de evaluación: profesor humano, ChatGPT en configuración Few-Shot Learning (FSL) y neutral, Gemini (FSL y neutral) y Copilot (FSL y neutral). Los diagramas de cajas permiten comparar no solo las medias, sino también la mediana, la dispersión y la presencia de valores atípicos.

En primer lugar, se observa que la distribución del profesor presenta una mediana en torno a 11 y una dispersión moderada, concentrándose mayoritariamente entre 9 y 13 puntos. Esto sugiere una evaluación relativamente estructurada, con un rango limitado de notas extremas.

En el caso de ChatGPT FSL, se aprecia una mayor variabilidad. Aunque alcanza valores máximos similares al profesor (15 puntos), su rango intercuartílico es más amplio y la mediana parece ligeramente inferior. Esto indica que, pese a intentar replicar el patrón del profesor mediante ejemplos previos, el modelo introduce una mayor dispersión en las puntuaciones.

Por su parte, ChatGPT Neutral (sin ejemplos) muestra una distribución más centrada y relativamente alineada con el profesor, con menor dispersión que su versión FSL.

Esto es especialmente relevante, ya que sugiere que el modelo, utilizando únicamente su conocimiento general, tiende a aplicar criterios más estables que cuando intenta imitar explícitamente el patrón del evaluador humano.

En el caso de Gemini, tanto en FSL como en versión neutral, se observa una tendencia a la infravaloración relativa respecto al profesor. Las medianas son inferiores y la concentración de notas en la franja media-baja es más evidente, lo que sugiere un criterio más severo o una mayor penalización ante deficiencias estructurales.

Finalmente, Copilot muestra el comportamiento más divergente. En su versión FSL presenta una gran dispersión y una tendencia a otorgar notas altas (con mediana cercana a 10–11 pero con numerosos valores máximos), mientras que en su versión neutral concentra notas claramente más bajas (mediana en torno a 6–7). Esta asimetría indica una sensibilidad elevada al contexto del prompt y una menor estabilidad evaluativa.

A. Distribución de las calificaciones

Al agrupar las calificaciones en tres grupos, bajas (menos de 5 puntos), medias (entre 5 y 10 puntos) y altas (más de 10 puntos) se obtiene la Fig.2, que muestra la distribución porcentual de notas bajas, medias y altas en los distintos escenarios de evaluación (profesor humano y modelos de IA en versiones FSL y neutral).

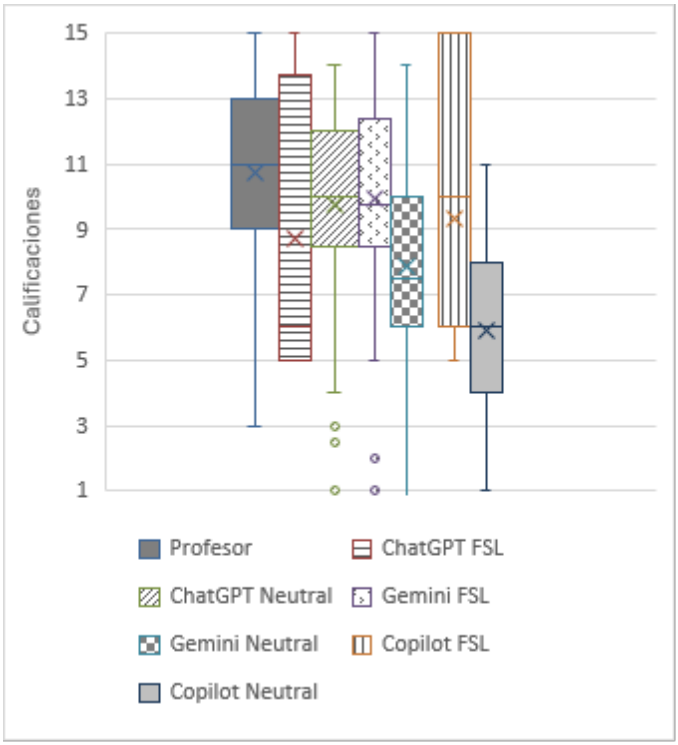


Figura 1. Siete escenacios de Evaluación

Esta representación categórica permite identificar patrones de severidad, indulgencia y concentración evaluativa que no son evidentes únicamente a través de medias o medianas.

1. Patrón del profesor humano

El profesor presenta una distribución fuertemente concentrada en notas altas (aprox. 65–70%), con una proporción reducida de notas bajas (≈3–5%) y un porcentaje intermedio de notas medias (≈25–30%). Este patrón sugiere una tendencia a discriminar principalmente entre media y alta, una baja frecuencia de penalización severa y una posible estructura evaluativa por bloques (con predominio del tramo superior). Esto es coherente con lo observado previamente: el profesor tiende a utilizar un sistema de categorías amplias (5/6/10/15).

2. ChatGPT FSL (imitando al profesor)

En el escenario FSL, ChatGPT reduce significativamente el porcentaje de notas altas y aumenta el peso de las notas medias. Comparado con el profesor, este escenario se caracteriza por tener una menor concentración en notas altas, una mayor distribución en la franja media y prácticamente ausencia de notas bajas.

Esto sugiere que el modelo, aun intentando replicar el estilo del profesor, no reproduce la polarización hacia notas altas, sino que aplica una evaluación más conservadora.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

3. ChatGPT SOLO (sin ejemplos)

En este escenario se observa un patrón interesante. Aumenta la proporción de notas altas respecto a FSL, se aproxima más al equilibrio profesor–medias, y la distribución es más similar al patrón humano que en FSL. Este resultado es coherente con los ICC previamente calculados. Por tanto, ChatGPT Neutral se aproxima más al profesor que ChatGPT FSL.

Esto sugiere que el modelo, cuando no está condicionado por ejemplos específicos, aplica criterios más estables o más alineados con la estructura implícita del sistema humano.

4. Gemini

Gemini presenta un patrón distinto según sea la configuración. En FSL, la distribución es relativamente equilibrada entre medias y altas, mientras que en modo Neutral, se observa un aumento de notas medias y una reducción de las altas.

Gemini parece mostrar una tendencia a la moderación, penalizando menos con notas bajas pero también otorgando menos notas máximas. Esto podría interpretarse como un criterio más homogéneo y menos polarizado.

5. Copilot

Por último, Copilot muestra el contraste más fuerte. En el escenario FSL, mantiene un patrón relativamente equilibrado, pero en modo Neutral, concentra claramente las notas en la categoría media (61%) y reduce drásticamente las altas (5%). Esto sugiere una mayor severidad o una menor propensión a asignar excelencia cuando no dispone de ejemplos guía.

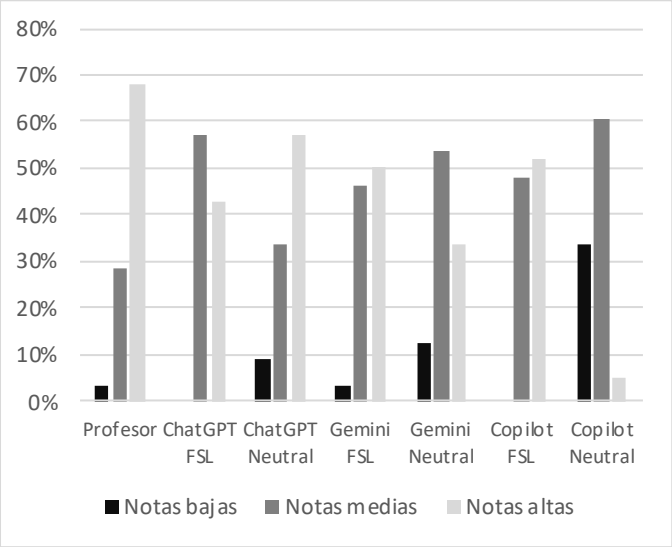
B. Implicaciones para la coherencia y justicia evaluativa

La Fig.2 permite identificar tres conclusiones relevantes:

1. No todos los modelos reproducen la estructura de evaluación humana. El profesor muestra una fuerte concentración en notas altas, mientras que algunos modelos redistribuyen hacia notas medias.
2. La configuración del prompt afecta significativamente la severidad. En algunos modelos (especialmente Copilot), el paso de FSL a neutral modifica significativamente la distribución.
3. Evidencia de posible "inflación" o "bloque alto" en la evaluación humana. La alta concentración de notas altas del profesor, frente a distribuciones más equilibradas en IA, podría interpretarse como indulgencia sistemática.

Conclusiones

En primer lugar, los resultados del estudio muestran que los modelos de inteligencia artificial generativa son capaces de aproximarse de forma razonable a los criterios de evaluación de un profesor en preguntas abiertas de tipo ensayo. Las métricas de correlación, concordancia y error indican que algunos modelos alcanzan niveles de alineamiento moderados o altos con la evaluación humana. En particular, ChatGPT en el escenario neutral y Gemini en el escenario Few-Shot Learning presentan los mejores resultados en términos de correlación y concordancia, así como los menores niveles de error. Estos hallazgos sugieren que los modelos de lenguaje actuales pueden constituir una herramienta útil para apoyar procesos de evaluación académica, especialmente en contextos con un elevado número de estudiantes.



Figira 2. Calificaciones Altas,Medias y Bajas

En segundo lugar, el estudio evidencia que la configuración del modelo y el diseño del prompt influyen de manera significativa en los resultados de la evaluación automática. Mientras que en algunos casos la incorporación de ejemplos evaluados por el profesor permite acercar los criterios de la IA a los del docente, en otros escenarios el modelo neutral muestra un comportamiento más estable y consistente. Esto indica que el proceso de calibración mediante Few-Shot Learning no siempre garantiza una mejora en la concordancia con la evaluación humana, y que la relación entre entrenamiento contextual y desempeño evaluativo depende del modelo concreto y de su arquitectura.

Por último, el análisis de las distribuciones de notas sugiere que existen diferencias estructurales entre los patrones de evaluación humana y los generados por la IA. El profesor tiende a concentrar una mayor proporción de calificaciones en el rango alto, mientras que varios modelos de IA presentan distribuciones más equilibradas entre notas medias y altas. Esta divergencia podría interpretarse como evidencia de posibles sesgos humanos, como cierta indulgencia evaluativa o el uso de categorías amplias de puntuación. En este sentido, la inteligencia artificial no solo puede actuar como herramienta de apoyo en la corrección, sino también como un instrumento de auditoría que permita analizar la coherencia, consistencia y equidad de los procesos de evaluación académica.

Referências Bibliográfica

[1] Annuš, N. (2023). Weigh the pros and cons of using artificial intelligence in education. International Journal of Science, Engineering and Technology, 11(3), 1-5.

[2] Tundrea, E. (2020). Artificial Intelligence in Higher Education: challenges and opportunities. INTED2020 Proceedings, 2041-2049.

[3] Sahu, S., Sarkar, S. K., Barik, S., & Pandit, S. (2025). Introduction to AI in Education Assessment. In Improving Student Assessment With Emerging AI Tools (pp. 1-32). IGI Global Scientific Publishing.

[4] Zaibout, N., & Madrane, M. (2024). Optimizing Academic Assessment: The Impact of AI on Student Integrity, Creativity, and Achievement. International Journal of Engineering Trends and Technology, 72(11), 357-370.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Um Mapeamento Sistemática da Literatura Cinza sobre Transferência de Tecnologia

A Systematic Mapping of Grey Literature on Technology Transfer

José Carlos Felix Barbosa
Universidade de Pernambuco
Recife, Brasil
jcfb@ecomp.poli.br

Ivaldir Honóriode Farias Júnior
Universidade de Pernambuco
Recife, Brasil
ivaldir.farias@upe.br

Emanoel Francisco S.Barreiros
Universidade de Pernambuco
Garanhuns, Brasil
Emanoel.barreiros@upe.br

***Resumo* — O artigo apresenta um mapeamento sistemática daliteratura, com análise de seis bases de dados, totalizando 2.328artigos na etapa inicial de leitura de títulos e resumos. Após oscritérios de seleção, permaneceram 24 trabalhos, com foco naidentificação dos principais autores, conceitos, dificuldades ebenefícios da transferência de tecnologia entre academia, indústriae governo no período de 2020 a 2025. Os resultados indicam queos acordos de cooperação técnica e o licenciamento de patentessão os mecanismos mais recorrentes. Como desafios, destacam-seabaixainteraçãouniversidadeeempresa,afragilidadedaculturadeinovaçãoeasbarreirasburocráticas.Aindaassim,aliteraturaevidenciaqueatransferênciadetecnologiacomoestratégicaparao desenvolvimento econômico, social e científico, especialmenteem países que já tratam esse processo como prioridade.**

***Palavras Chave* - Tecnologia; Transferência; Revisão;Inovação.**

***Abstract* — This article presents a systematic literature review,analyzingsixdatabasesandtotaling2,328articlesintheinitialstageof reading titles and abstracts. After selection criteria, 24 worksremained, focusing on identifying the main authors, concepts,difficulties, and benefits of technology transfer between academia,industry, and government in the period from 2020 to 2025. Theresults indicate that technical cooperation agreements and patentlicensing are the most recurrent mechanisms. Challenges includelow university-industry interaction, a weak innovation culture, andbureaucratic barriers. Nevertheless, the literature shows thattechnology transfer is strategic for economic, social, and scientificdevelopment, especially in countries that already treat this processas a priority.**

Keywords - Technology; Transfer; Review; Innovation.

I. Introdução

Nos últimos anos, a discussão acerca da Transferência de Tecnologia (TT), tem se destacado. O Global Innovation Index de 2021 indica que o Brasil é o único país da América Latina com investimentos em P&D superiores a 1% do PIB. O país também lidera a região em investimentos empresariais globais em P&D, superando México e Argentina (Brasil, 2021) [1]. Isso reflete o potencial do Brasil em inovação, apesar dos desafios regionais. Segundo Camargos e Silva, (2025) [2] afirma que a TT pode ser entendida, no senso comum, como o movimento de transferir inovações de uma organização para outra. Munaretti et al. (2024) [3] também fala que a TT emerge como um elemento-chave, representando o canal pelo qual conhecimentos, habilidades e procedimentos inovadores são compartilhados, ampliando a capacidade inovadora das instituições receptoras.

Em 2015 escritores como Macêdo e Santos, (2015) [4] definiam a TT como um processo de negociação econômica ou comercial que visa atender a requisitos legais, ao mesmo tempo em que promove o progresso da empresa receptora e o desenvolvimento econômico do país. Fica evidente que essa discussão tem se destacado ao longo do tempo.

Países altamente desenvolvidos adotam políticas e programas de incentivo que visam à modernização das indústrias por meio de avanços tecnológicos e à integração de jovens qualificados no mercado de trabalho utilizado modelo como Hélice Tríplice, a exemplo da Alemanha onde Sociedade de Fraunhofer tem mais de 80 centros de pesquisa pelo mundo, pesquisas essas direcionadas para empresas públicas e privadas com amplo benefício para a sociedade, tais como: saúde, segurança, comunicação, energia e meio ambiente.

No Brasil, o incentivo à colaboração entre o setor industrial e as instituições de ensino superior tem se intensificado como uma estratégia para alavancar o desenvolvimento socioeconômico e científico do país. Leis como a Lei de Inovação Tecnológica (Lei n. 10.973/2004) [5] e a Lei do Marco Legal da Ciência, Tecnologia e Inovação (Lei n. 13.243/2016) [6], vêm oferecendo desde a data de suas publicações um arcabouço regulatório fundamental para a promoção da inovação na indústria nacional. Visam estimular a cooperação entre universidades, centros de pesquisa e empresas, facilitando a criação de parcerias estratégicas.

Dessa forma, o presente trabalho realizou um mapeamento sistemática da literatura cinza com o objetivo de identificar os principais autores e conceitos mais utilizados, bem como as dificuldades e benefícios na transferência de tecnologia entre academia, indústria e governo nos últimos 5 anos (2020–2025).

II. FundamentaçãoTeórica

A TT é um processo complexo e importante, podendo acontecer de diferentes formas. Segundo Cunningham e Link, (2015) [7] a TT pode acontecer desde de uma simples venda ou até mesmo um licenciamento de uma patente, como também a

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

formação de uma parceria. Os tipos de transferência mais comuns segundo o autor são: licenciamento de patentes, criação de empresas spin-off, contratação de serviços de consultoria, acordos de cooperação e parcerias estratégicas.

Esse processo de transferência de tecnologia remonta à Primeira Revolução Industrial. Segundo (Cysne,2005) [8] a transferência de tecnologia teve seu primeiro papel de destaque nesse período, quando novas tecnologias desenvolvidas na Inglaterra foram transferidas para indústrias americanas, russas e de outros países europeus.

Pesquisas recentes apontam diversas dificuldades no processo de transferência de tecnologia. (Silva, 2025) [9] destaca que os desafios se concentram em entraves institucionais, culturais e operacionais, tais como burocracia e a falta de integração entre os atores envolvidos, a saber: indústria, universidade e governo. De forma complementar, (Rau, 2024) [10] também identifica dificuldades como a ausência de integração efetiva entre as Instituições Científicas, Tecnológicas e de Inovação - ICTs e as empresas, tensões e dificuldades nas negociações, burocracia e lentidão administrativa nas instituições, carência de capacitação em inovação e, por fim, um dos problemas mais recorrentes, a baixa cultura de inovação e a resistência institucional.

Por outro lado, apesar das inúmeras dificuldades, o processo de transferência de tecnologia apresenta resultados positivos e benefícios significativos quando efetivamente realizado. A literatura aponta diversos impactos decorrentes desse processo. Segundo Rau, (2024) [10], a transferência de tecnologia contribui para a melhoria da infraestrutura local, a promoção de renda e geração de empregos, o desenvolvimento científico e tecnológico, bem como o fortalecimento das relações entre governo, indústria e universidades. A pesquisa ressalta ainda que a transferência de tecnologia gera benefícios econômicos e impulsiona o desenvolvimento regional, fortalecendo startups e o ecossistema de inovação do estado.

III. Metodologia

A pesquisa foi classificada como exploratória, com intuito de entender e obter insights em relação a Transferência de Tecnologia na Universidade de Pernambuco, na qual foi feito um mapeamento sistemático da literatura dividida em duas fases principais, onde buscou extrair informações para levantamento dos resultados como mostra na Figura 1.

Figura 1. Desenho metodológico (Fonte: Autor)

Na primeira fase do mapeamento, aplicou-se a string de busca nas bases previamente selecionadas. Ao todo, foram consideradas seis bases principais: Repositório UFPE, Repositório UFPE (PROFNIT), Repositório da UFMG, Repositório UFRJ, Repositório UFCG e Repositório da UFSC (PROFNIT). A string de busca utilizada foi: "[(*technology transfer*) OR (*knowledge transfer*) OR (*technology diffusion*) OR (*technology commercialization*)] AND [(*university*) OR (*academia*) OR (*research institution*)] AND [(*industry*) OR (*company*) OR (*private sector*)]".

Para garantir o rigor metodológico, foi elaborado um protocolo contendo os critérios de inclusão e exclusão da pesquisa. Ao todo foram definidos oito critérios para a seleção dos trabalhos nesta primeira fase do mapeamento: ano de publicação, tema, tipo de fonte, idioma, acesso, autoria, originalidade e revisão, fazendo a leitura dos seus títulos e resumos.

Na segunda fase, foi realizada a leitura completa dos trabalhos aceitos para extração das informações, com o objetivo de responder as 07 perguntas principais. Cada trabalho deveria responder a uma ou mais perguntas para ser classificado como aceito. Vale destacar que essa segunda fase foi conduzida por mais de um pesquisador, a fim de não tornar a pesquisa inválida por viés pessoal. As perguntas foram organizadas de Q1 a Q7, como mostra na Tabela abaixo.

TABELA I. Perguntasdapesquisa(Fonte:Autor)

Q1 – Quais processos têm sido utilizados na transferência de tecnologia universidade-indústria?
Q2 – Quais são os desafios associados à transferência de tecnologia nas universidades?
Q3 – Quais são os benefícios associados à transferência de tecnologia nas universidades?
Q4 – Quais modelos teóricos ou frameworks são utilizados para analisar a transferência de tecnologia?
Q5 – Quais as lacunas de pesquisa e tendências referente à transferência de tecnologia entre as universidades e as empresas?
Q6 – Quais são os incentivos para a transferência de tecnologia entre as universidades e as empresas/indústria?
Q7 – Quais são os impactos econômicos, sociais e científicos atribuídos à transferência de tecnologia universidade-empresa?

Na próxima seção, serão apresentados os principaisresultados desse mapeamento sistemática da literatura, na qualfoi possível identificar os principais autores, barreiras ebenefícios segundo a literatura sobre transferência detecnologia.

IV. Resultados

Ao todo, após a aplicação da *string* de busca nas 6 bases, obteve-se um resultado de 2.328 trabalhos retornados, nos quais foram realizadas a leitura de seus títulos e resumos para classificação na segunda fase.

Das 6 bases analisadas, os maiores resultados foram identificados no Repositório da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, especialmente no âmbito do programa Mestrado Profissional em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para a Inovação - PROFNIT. Quanto aos anos, observou-se maior aceitação nos anos de 2020 e 2023 e à localidade, destaca-se Florianópolis–SC como o município com maior número de trabalhos, seguido por Recife–PE.

A análise dos trabalhos permite identificar autores de grande relevância, que permanecem como referências no campo da transferência de tecnologia. Destacam-se, entre eles, Henry Etzkowitz, sociólogo americano que, em conjunto com Loet Leydesdorff, popularizaram o modelo da Tríplice Hélice. Mesmo após vários anos de sua proposição, esse modelo continua sendo amplamente citado e utilizado como base teórica em pesquisas atuais, conforme evidenciado no gráfico apresentado. Outro autor clássico é Joseph Schumpeter, economista que se

ISBN: 978-989-36481-2-4

destacou por suas contribuições ao debate sobre inovação desde a década de 1980, especialmente por meio dos conceitos de destruição criativa e das ondas de Schumpeter.

Destaca-se ainda Roberto de Alencar Lotufo, reconhecido por suas contribuições sobre a Lei da Inovação e a implementação dos Núcleos de Inovação Tecnológica (NITs) no Brasil. Por fim, ressalta-se o papel da World Intellectual Property Organization (WIPO), agência das Nações Unidas sediada na Suíça, responsável por promover a proteção da Propriedade Intelectual (PI) em nível global, auxiliando inovadores e criadores na proteção de suas invenções, marcas e obras por meio de serviços internacionais, inclusive no Brasil. Na Figura 2, é possível visualizar a quantidade de menções dos autores mais citados nesta análise.

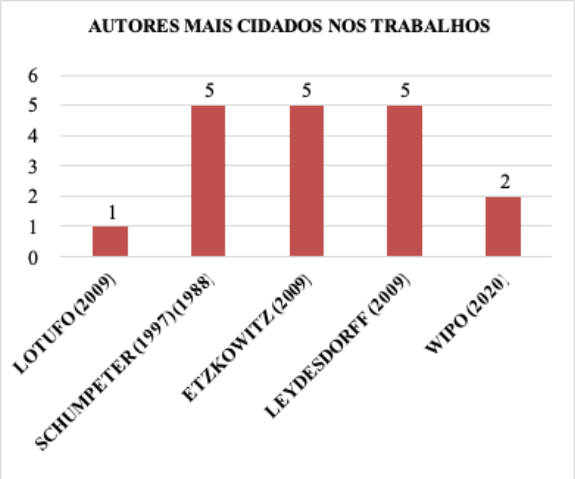


Figura 2. Gráficodeautoresmaiscitados(Fonte:Autor)

V. Resultadosporperguntas

Após a leitura dos títulos, resumos e aplicação do protocolo dos 2.328 trabalhos, foram aceitos para leitura completa 24 estudos, com o objetivo de responder às 7 perguntas de

pesquisa, extraindo os principais autores, processos, benefícios e dificuldades da transferência de tecnologia entre universidade e indústria. Verificou-se que apenas 22 trabalhos responderam a uma ou mais perguntas. Os resultados deste mapeamento foram organizados por perguntas, trazendo reflexões da literatura sobre o tema. Os resultados serão apresentados respectivamente da Questão(Q1) à Q7.

Q1 – Quais processos têm sido utilizados na transferência de tecnologia universidade-indústria?

Entre os processos mais recorrentes, destacam-se os contratos de cooperação técnica e o licenciamento de patentes, sendo que 7 trabalhos apontam esses mecanismos como centrais nos acordos de transferência de tecnologia. Esses resultados evidenciam que tais instrumentos constituam pilares fundamentais nesse processo de TT.

Outros mecanismos mencionados referem-se aos ambientes promotores de inovação. A literatura destaca, de forma recorrente, a importância das incubadoras e dos parques tecnológicos, com 8 menções nos estudos analisados. Esses ambientes são apresentados como espaços estratégicos para aproximar academia e mercado, fomentar o empreendedorismo acadêmico e apoiar a criação de startups e spin-offs.

Além disso, 2 estudos ampliam a compreensão da transferência de tecnologia ao enfatizar ações complementares, como mentorias, oficinas, consultorias, eventos de inovação e projetos interdisciplinares. Esses elementos reforçam que a transferência de tecnologia não se limita a instrumentos legais ou contratuais, mas envolve também a construção de competências, redes de colaboração e capacidades institucionais.

Q2 – Quais são os desafios associados à transferência de tecnologia nas universidades?

Os principais desafios associados à transferência de tecnologia, conforme a frequência de menções identificadas na literatura analisada. Observa-se que o desafio mais recorrente é a baixa interação entre as Instituição de Ensino Superior - IES e as empresas, com 7 menções, evidenciando que a fragilidade nas relações universidade e empresa permanece como o principal entrave ao fluxo de conhecimento e à aplicação prática dos resultados científicos. Esse resultado reforça a necessidade de mecanismos mais eficazes de cooperação, alinhamento de interesses e aproximação institucional entre os atores envolvidos.

Em seguida, destaca-se a falta de cultura de inovação e empreendedora, com 6 menções, indicando que, além das barreiras estruturais, há desafios de natureza cultural e organizacional nas instituições de ensino e pesquisa. A ausência de uma mentalidade voltada à inovação e ao empreendedorismo limita a geração de spin-offs, o registro de patentes e a valorização da transferência de tecnologia como parte da missão universitária.

Outro fator relevante refere-se às burocracias no processo, mencionadas 5 vezes, o que evidencia a existência de entraves e procedimentos que dificultam ou retardam a formalização de parcerias, contratos e acordos de cooperação. De forma complementar, a lentidão dos trâmites administrativos e a burocracia excessiva nos órgãos públicos, ambas com 2 menções, reforçam a percepção de que os processos administrativos ainda são pouco ágeis e incompatíveis com a dinâmica do setor produtivo.

A escassez de recursos financeiros e humanos, com 3 menções, também se apresenta como um desafio relevante, indicando limitações na infraestrutura de apoio à inovação, bem como na disponibilidade de equipes qualificadas para atuar nos Núcleos de Inovação Tecnológica - NIT e demais estruturas de transferência. Já fatores como falta de equipamentos, falta de comunicação nas IES e capacitação técnica das equipes aparecem com menor frequência, mas ainda assim representam obstáculos pontuais que podem comprometer a eficiência do processo de transferência tecnológica.

Q3 - Quais são os benefícios associados à transferência de tecnologia nas universidades?

Os principais benefícios da transferência de tecnologia nas universidades, a partir da frequência de menções identificadas na literatura analisada. Observa-se que o benefício mais re-

ISBN: 978-989-36481-2-4

corrente é o desenvolvimento econômico e regional, com 14 menções, indicando que a transferência de tecnologia é amplamente reconhecida como um instrumento para o fortalecimento das economias locais e regionais, por meio da geração de inovação, aumento da produtividade e dinamização do tecido empresarial.

Em segundo plano, destaca-se o empreendedorismo, start-ups e spin-offs, com 11 menções, o que reforça o papel das universidades como agentes ativos na criação de novos negócios de base tecnológica. Esse resultado está diretamente associado à consolidação do modelo de universidade empreendedora, no qual a produção científica extrapola o ambiente acadêmico e se transforma em soluções aplicáveis ao mercado.

A formação e valorização do capital humano e a disseminação e aplicação do conhecimento aparecem com 10 menções cada, evidenciando que a transferência de tecnologia contribui significativamente para a qualificação de recursos humanos, bem como para a ampliação do impacto social do conhecimento científico produzido nas instituições de ensino superior.

Outros benefícios relevantes incluem o impacto social e ambiental, as receitas provenientes de royalties e licenças e a competitividade e inovação, todas com 9 menções. Esses resultados demonstram que a transferência de tecnologia não se limita só ao financeiro, mas também promove benefícios sociais, ambientais e institucionais, fortalecendo a capacidade inovativa das universidades e das empresas envolvidas.

A geração de empregos e renda e a aproximação universidade e mercado, ambas com 8 menções, reforçam o papel da transferência de tecnologia na redução do distanciamento entre academia e setor produtivo, além de contribuir para a absorção de profissionais qualificados pelo mercado de trabalho. Por fim, a valorização institucional e reputação, com 6 menções, embora menos recorrente, ainda se configura como um benefício relevante.

Q4 – Quais modelos teóricos ou frameworks são utilizados para analisar a transferência de tecnologia?

Os principais modelos teóricos e frameworks utilizados nos estudos sobre transferência de tecnologia, conforme a frequência de menções identificadas na literatura analisada. Observa-se uma predominância do modelo da Hélice Tríplice, proposto por Etzkowitz e Leydesdorff (1990) [11], com 12 menções, evidenciando que esse referencial teórico se consolidou como o principal modelo para compreender os processos de interação entre universidade, indústria e governo no contexto da inovação e da transferência de tecnologia.

A elevada frequência da Hélice Tríplice indica que os estudos reconhecem a importância da articulação sistêmica entre esses três atores como condição essencial para o desenvolvimento de ecossistemas de inovação mais dinâmicos e eficazes. Tal resultado também demonstra a atualidade e a aplicabilidade do modelo, mesmo após décadas de sua formulação, especialmente em análises que envolvem universidades públicas e políticas de inovação.

Em menor proporção, identifica-se a presença do modelo da Hélice Quádrupla, de Carayannis e Campbell, (2009) [12], com 2 menções, o que sinaliza uma ampliação recente do debate ao incorporar a sociedade civil e os usuários como atores relevantes nos processos de inovação. Embora menos recorrente, esse modelo aponta uma tendência de evolução conceitual, alinhada a abordagens mais participativas e orientadas ao impacto social da inovação.

Os demais referenciais — Teoria da Inovação de (Schumpeter, 1911) [13], Framework de CTT (Fernandes, 2016) [14], Manual de Oslo 2018 (Wonspeher, 2024) [15] e modelo CPN (Pol, 2024) [16] — aparecem com 1 menção cada, indicando utilização pontual e complementar. Esses modelos contribuem para fundamentações específicas, seja no entendimento do processo inovativo, atividades de inovação ou na operacionalização da transferência de tecnologia, mas não se configuram como estruturas centrais nos estudos analisados.

De forma geral, os resultados demonstram uma forte concentração teórica no modelo da Hélice Tríplice, ao passo que modelos alternativos ou complementares ainda apresentam baixa difusão na literatura. Esse achado evidencia uma lacuna de pesquisa, relacionada à necessidade de diversificação teórica e à exploração de modelos mais recentes ou híbridos, capazes de captar a complexidade crescente dos processos de transferência de tecnologia, especialmente em contextos regionais e institucionais específicos. Quando analisado em conjunto com os desafios e benefícios anteriormente apresentados, o predomínio da Hélice Tríplice reforça a centralidade da interação universidade, empresa e governo como eixo estruturante para a superação de barreiras e potencialização dos impactos da transferência de tecnologia

Q5 – Quais as lacunas de pesquisa e tendências referente à transferência de tecnologia entre as universidades e as empresas?

Observa-se que a lacuna mais recorrente se refere à falta de gestão da propriedade intelectual (PI), com 10 menções, indicando que a ausência de políticas claras, procedimentos estruturados e capacitação específica em PI constitui um dos principais entraves para a efetividade da transferência de tecnologia nas universidades.

Em seguida, destaca-se a baixa institucionalização da transferência de tecnologia e da cultura de inovação, com 9 menções, o que demonstra que, em muitas instituições, a TT ainda não está plenamente incorporada às estratégias organizacionais. Esse resultado sugere a necessidade de fortalecer estruturas como os Núcleos de Inovação Tecnológica - NITs, bem como de promover uma cultura institucional orientada à inovação e ao empreendedorismo.

A falta de estudos empíricos e de métricas de avaliação, mencionada 8 vezes, evidencia uma lacuna metodológica relevante na literatura, apontando para a escassez de indicadores e instrumentos de mensuração capazes de avaliar de forma consistente os resultados e impactos da transferência de tecnologia. Essa limitação dificulta a comparação entre estudos e a formulação de políticas baseadas em evidências.

Outro aspecto significativo refere-se à falta de integração universidade–empresa, com 7 menções, o que reforça a persistência de barreiras relacionais e institucionais entre academia e setor produtivo, já identificadas anteriormente como um dos principais desafios da transferência de tecnologia. Esse achado indica uma convergência entre desafios práticos e lacunas teóricas presentes na literatura.

ISBN: 978-989-36481-2-4

A capacitação e formação especializada, especialmente de equipes dos NITs, gestores e profissionais da área jurídica, aparece com 6 menções, demonstrando a necessidade de qualificação técnica para lidar com a complexidade dos processos de proteção e comercialização do conhecimento. Em menor frequência, o baixo uso estratégico de políticas públicas e do Estado, com 5 menções.

Por fim, a falta de internacionalização e competitividade, com 4 menções, embora menos recorrente, aponta para uma tendência emergente de pesquisas que buscam compreender a inserção das universidades e empresas em redes globais de inovação, ampliando o alcance e o impacto da transferência de tecnologia.

De modo geral, os resultados indicam que as lacunas de pesquisa em transferência de tecnologia estão fortemente associadas a aspectos institucionais, gerenciais e metodológicos. Esses achados reforçam a necessidade de avanços teóricos que contribuam para o aprimoramento das práticas de transferência de tecnologia, especialmente em contextos de universidades públicas e regiões em desenvolvimento, alinhando-se às abordagens da Hélice Tríplice e aos objetivos de políticas públicas de inovação.

Q6 – Quais são os incentivos para a transferência de tecnologia entre as universidades e as empresas/indústria?

Observa-se que a [Lei da Inovação, 2004] se destaca como o incentivo mais recorrente, com 8 menções, evidenciando seu papel central como marco normativo para a promoção da inovação e para o fortalecimento das interações entre universidades, institutos de pesquisa, empresas e governo no contexto brasileiro.

Em seguida, o Marco Legal de Ciência, Tecnologia e Inovação aparece com 4 menções, reforçando a relevância dos instrumentos legais na redução de barreiras institucionais e na flexibilização de procedimentos administrativos relacionados à pesquisa, ao desenvolvimento e à transferência de tecnologia. Esses dispositivos legais contribuem para maior segurança jurídica e estímulo à cooperação entre os atores do sistema nacional de inovação.

O capital privado e os recursos financeiros, com 3 menções, configuram-se como incentivos relevantes, ao viabilizar investimentos em pesquisa aplicada, desenvolvimento tecnológico e comercialização de inovações. Esse resultado evidencia a importância da participação do setor produtivo e de mecanismos de financiamento para o êxito das iniciativas de transferência de tecnologia.

Outros incentivos, como os Núcleos de Inovação Tecnológica- NITs, a Lei do Bem, a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco -FACEPE, aparecem com 1 menção cada, indicando reconhecimento pontual na literatura. Embora menos frequentes, esses instrumentos desempenham papel estratégico no suporte institucional, na capacitação de recursos humanos e no fomento à pesquisa e à inovação, especialmente em contextos universitários.

De modo geral, os resultados demonstram que os incentivos à transferência de tecnologia estão fortemente concentrados em instrumentos legais e normativos, enquanto mecanismos operacionais e institucionais, como os NITs e as agências de fomento, ainda apresentam menor visibilidade na literatura. Esse achado sugere a necessidade de ampliar estudos que avaliem a efetividade desses incentivos na prática, bem como de fortalecer sua articulação com políticas institucionais e estratégias de inovação nas universidades.

Q7 – Quais são os impactos econômicos, sociais e científicos atribuídos à transferência de tecnologia universidade-empresa?

Na dimensão econômica, os estudos apontam que a transferência de tecnologia contribui significativamente para o desenvolvimento econômico regional, ao possibilitar a conversão do conhecimento acadêmico em produtos, processos e serviços inovadores com 7 menções. Destaca-se a geração de spin-offs, o fortalecimento de startups, a criação de novas fontes de receita para as universidades como royalties e licenciamento.

No que se refere à dimensão social, a literatura destaca que a transferência de tecnologia promove a aproximação entre universidade, governo, setor produtivo e sociedade, alinhando-se aos pressupostos do modelo da Hélice Tríplice e, em abordagens mais recentes, da Hélice Quádrupla. Os estudos indicam benefícios coletivos, como melhoria na oferta de bens e serviços públicos, redução das desigualdades regionais, fortalecimento do empreendedorismo local e impactos positivos em áreas como saúde, indústria e qualidade de vida. Além disso, a geração de empregos e a inclusão social aparecem como efeitos recorrentes, evidenciando o papel social da universidade como agente ativo no desenvolvimento territorial.

Na dimensão científica, os autores apontam que a transferência de tecnologia contribui para a valorização da pesquisa aplicada, o fortalecimento da produção científica orientada à inovação e o estímulo ao patenteamento e licenciamento de tecnologias. Esses processos ampliam a visibilidade acadêmica das universidades, reforçam sua reputação institucional e consolidam seu papel como geradoras e disseminadoras de conhecimento aplicado. Destaca-se ainda o fortalecimento da cooperação entre os diferentes atores do ecossistema de inovação, favorecendo a integração entre ciência, tecnologia e sociedade.

VI. Conclusões

Os resultados demonstram que a transferência de tecnologia entre universidades e empresas é sustentada principalmente por contratos de cooperação técnica, licenciamento de patentes e atuação de ambientes promotores de inovação, com forte apoio do arcabouço legal brasileiro.

Os principais desafios concentram-se na baixa interação entre universidade e empresa, na fragilidade da cultura de inovação e nas barreiras burocráticas. Em contrapartida, os benefícios mais recorrentes envolvem o desenvolvimento econômico regional, o estímulo ao empreendedorismo, a geração de empregos e a valorização da pesquisa aplicada.

Observou-se a predominância do modelo da Hélice Tríplice como principal referencial teórico, indicando a centralidade da articulação entre universidade, indústria e governo. Contudo, identificam-se lacunas relacionadas à gestão da propriedade intelectual, à institucionalização da transferência de tecnologia e

ISBN: 978-989-36481-2-4

à necessidade de métricas de avaliação mais consistentes.

De modo geral, os achados reforçam que a transferência de tecnologia é estratégica para o desenvolvimento econômico, social e científico, demandando fortalecimento institucional, integração entre os atores e aprimoramento contínuo das práticas e políticas de inovação.

Este trabalho foi desenvolvido a partir da perspectiva de uma dissertação de mestrado. Como limitações, destacam-se o tempo disponível, uma vez que o objetivo principal não era realizar apenas uma mapeamento sistemática, mas também obter achados que servissem como base para o início da pesquisa.

Como sugestão de trabalhos futuros, propõe-se a realização de uma pesquisa dedicada exclusivamente a um mapeamento sistemática mais aprofundada, com ampliação do número de bases consultadas e maior abrangência de resultados, contemplando tanto a literatura cinza quanto a literatura convencional, reconhecida como literatura branca, como também a possibilidade de criar políticas de transferência de tecnologia dentro da própria Universidade.

Referências Bibliográfica

[1] Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, "Brasil avança 5 posições no Global Innovation Index 2021," Gov.br, Sep. 20, 2021. [Online]. Available: https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-omcti/noticias/2021/09/brasil-avanca-5-posicoes-no-global-innovation index-2021. [Accessed: Mar. 3, 2026].

[2] R. M. Camargos and L. C. S. Silva, "Proposta de modelo de transferência de tecnologia para a internacionalização da Universidade Federal da Grande Dourados: Um estudo de caso," P2P & Inovação, vol. 11, no. 2, pp. 1–21, Jan./Jun. 2025.

[3] Marchetti et al., "Interação universidade e empresa: barreiras e desafios na transferência de tecnologia," Revista Estudo & Debate, vol. 31, no. 1, 2024.[Online].Available:https://www.univates.br/revistas/index.php/estudoedebate/article/view/3503. Accessed: Mar. 12, 2025.

[4] L. S. Macedo Santos, "Da pesquisa ao mercado: A primeira transferência de tecnologia da Universidade Federal de Uberlândia," Cadernos de Prospecção, vol. 8, no. 4, pp. 648–655, 2015. [Online]. Available:https://www.researchgate.net/publication/314551369_DA_PE SQUISA_AO_MERCADO_A_PRIMEIRA_TRANSFERENCIA_DE_T ECNOLOGIA_DA_UNIVERSIDADE_FEDERAL_DE_UBERLANDI A.Accessed: Jan. 27, 2025.

[5] Brasil, "Lei nº 10.973, de 2 de dezembro de 2004. Dispõe sobre incentivos à inovação e à pesquisa científica e tecnológica no ambiente produtivo e dá outras providências." [Online]. Available: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/lei/l10.973.htm. Accessed: Mar. 12, 2025.

[6] Brasil, "Lei nº 13.243, de 11 de janeiro de 2016. Dispõe sobre estímulos ao desenvolvimento científico, à pesquisa, à capacitação científica e tecnológica e à inovação e altera diversas leis." [Online]. Available: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2016/lei/l13243.htm. Accessed: Mar. 12, 2025.

[7] J. A. Cunningham and A. N. Link, "Fostering university-industry R&D collaborations in European Union countries," International Entrepreneurship and Management Journal, vol. 11, no. 4, pp. 849–860, 2015.

[8] F. P. Cysne, "Transferência de tecnologia entre a universidade e a indústria," Rede de Revistas Científicas da América Latina, Caribe, Espanha e Portugal, 2005. [Online]. Available: https://www.redalyc.org/pdf/147/14702005.pdf. Accessed: Mar. 2, 2026.

[9] M. F. L. Silva, "Governança colaborativa pela ótica da Hélice Quádrupla: uma análise do desempenho em redes de cooperação interorganizacional entre a MouraTech e o IFPE Campus Belo Jardim," M.S. thesis, Programa de Pós-Graduação em Gestão, Inovação e Consumo, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil, 2025. [Online]. Available: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/62216. Accessed: Feb. 23, 2026.

[10] R. M. O. B. Rau, "A propriedade intelectual nos ambientes de inovação: estudo de caso da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação de Pernambuco – SECTI-PE," M.S. thesis, Programa de Pós-Graduação em Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brazil, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/57133. Accessed: Feb. 23, 2026.

[11] H. Etzkowitz and L. Leydesdorff, "The dynamics of innovation: from national systems and 'mode 2' to a triple helix of university-industry-government relations," Research Policy, vol. 29, pp. 109–123, 2000.

[12] E. G. Carayannis and D. F. J. Campbell, "'Mode 3' and 'Quadruple Helix': Toward a 21st century fractal innovation ecosystem," Int. J. Technology Management, vol. 46, no. 3/4, pp. 201–234, 2009

[13] J. A. Schumpeter, The Theory of Economic Development: An Inquiry into Profits, Capital, Credit, Interest, and the Business Cycle. Cambridge, MA, USA: Harvard University Press, 1934.

[14] C. R. Fernandes, A dinâmica do desenvolvimento da capacidade de transferência tecnológica em instituições públicas brasileiras de ensino superior, Ph.D. dissertation, Programa de Pós-Graduação em Administração, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brazil, 2016.

[15] A. C. V. F. Wonspeher, O advogado corporativo e a inovação sob a ótica da ISO56005: um manual de boas práticas para o advogado corporativo na gestão da propriedade intelectual. Dissertação (mestrado profissional), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024.

[16] V. D. Pol, Modelo conceitual de avaliação de propriedade intelectual com base nos fundamentos do capital intelectual, M.Sc. dissertation, Propriedade Intelectual e Transferência de Tecnologia para Inovação, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil, 2024. [Online]. Available: https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/261012. [Accessed: Feb. 23, 2026].

ISBN: 978-989-36481-2-4

OcuLex: Taxonomia Oculomotora Orientada a Comportamento para Suporte Clínico na Avaliação da Afasia Baseado em Machine Learning

OcuLex: Behavior-Oriented Oculomotor Taxonomy for Clinical Support in Machine Learning-Based Aphasia Assessment

Jonas Cesconetto, Alejandro Rafael Garcia Ramirez
Departamento de Computação Aplicada
UNIVALI – Universidade do Vale do Itajaí, SC,
Itajaí, Brasil
jonascesconetto@edu.univali.br, ramirez@univali.br

***Resumo* — A avaliação clínica da afasia baseia-se predominantemente em medidas de acerto/erro e julgamento especializado, o que pode ocultar diferenças relevantes de processamento. Indivíduos com desempenho semelhante podem adotar estratégias visuais e cognitivas distintas durante tarefas linguísticas. O rastreamento ocular (eye tracking) permite registrar a dinâmica de alocação atencional entre alvo e distratores, latência de convergência e padrões de revisitação. O TROG-2 e sua adaptação brasileira (TROG2-Br) oferecem base psicométrica consolidada para mensuração da compreensão morfossintática em níveis crescentes de complexidade. Apesar do avanço de abordagens de aprendizado de máquina (machine learning, ML) aplicadas a sinais oculomotores, a literatura permanece fragmentada, carecendo de estruturas reutilizáveis que articulem métricas, interpretação comportamental e hipóteses linguístico-clínicas em tarefas análogas ao TROG-2. Este artigo propõe a OcuLex, uma taxonomia oculomotora orientada a comportamento, concebida como camada intermediária entre sinais brutos de eye tracking e pipelines de ML voltados ao apoio à decisão clínica. A proposta é sustentada por mapeamento sistemático que evidenciou a ausência de estudos integrando simultaneamente afasia, eye tracking, TROG-2, ML e taxonomia formal. A solução organiza o domínio em três dimensões — nível de processamento, perfil comportamental e correlato linguístico-clínico — acrescidas de camada transversal de anotação e núcleo ontológico mínimo. Apresenta-se ainda validação preliminar baseada em estatísticas agregadas de dataset brasileiro do TROG-2 digital com eye tracking, indicando predominância dos perfis Busca-Exploratória e Busca-Tardia no grupo afásico. A taxonomia demonstrou utilidade ao converter diferenças estatísticas em perfis comportamentais passíveis de interpretação clínica.**

***Palavras Chave* – Afasia; rastreamento ocular; TROG-2; aprendizado de máquina; taxonomia oculomotora; sistemas de apoio à decisão clínica.**

***Abstract* — Clinical assessment of aphasia relies predominantly on accuracy/error measures and expert judgment, which may obscure relevant processing differences. Individuals with similar performance can adopt distinct visual and cognitive strategies during linguistic tasks. Eye tracking enables the recording of attentional allocation dynamics between target and distractors, latency to target convergence, and revisit patterns. The Test for Reception of Grammar (TROG-2) and its Brazilian adaptation (TROG2-Br) provide a consolidated psychometric framework for measuring morphosyntactic comprehension across increasing levels of complexity. Despite advances in machine learning (ML) approaches applied to oculomotor signals, the literature remains fragmented, lacking reusable structures that articulate metrics, behavioral interpretation, and linguistic-clinical hypotheses in tasks analogous to the TROG-2. This paper proposes OcuLex, a behavior-oriented oculomotor taxonomy conceived as an intermediate layer between raw eye-tracking signals and ML pipelines aimed at clinical decision support. The proposal is supported by a systematic mapping that revealed the absence of studies simultaneously integrating aphasia, eye tracking, TROG-2, ML, and formal taxonomy frameworks. The solution organizes the domain into three dimensions—processing level, behavioral profile, and linguistic-clinical correlate—augmented by a cross-cutting annotation layer and a minimal ontological core. A preliminary validation based on aggregated statistics from a Brazilian digital TROG-2 dataset with eye tracking indicates a predominance of the Exploratory-Search and Late-Search profiles in the aphasic group. The taxonomy demonstrated utility in translating statistical differences into behaviorally interpretable and clinically meaningful profiles.**

Keywords – Aphasia; eye-tracking; TROG-2; machine learning; oculomotor taxonomy; clinical decision support.

I. Introdução

A afasia é um distúrbio adquirido da linguagem que compromete a compreensão e/ou produção verbal após lesões cerebrais vasculares, traumáticas ou degenerativas. Em cenários clínicos reais, o desafio do diagnóstico não consiste apenas em verificar se o indivíduo acerta ou erra uma resposta, mas em compreender como ele distribui a atenção visual, quanto tempo leva para convergir ao estímulo-alvo, quantas vezes retorna a

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

distratores e como tais padrões variam quando a carga morfossintática aumenta [1], [2].

O uso de eye tracking em tarefas linguísticas oferece acesso a processamento on-line, em escala de milissegundos. Em paralelo, o TROG-2 e sua adaptação brasileira, o TROG2-Br, fornecem uma base psicométrica relevante para mensurar a compreensão gramatical sob diferentes níveis de complexidade [2]. Em um terceiro eixo, modelos de machine learning vêm mostrando potencial para classificação de variantes de afasia, embora predominantemente apoiados em fala, EEG ou neuroimagem, e ainda com limitações de interpretabilidade e tamanho amostral [5], [16].

A revisão sistemática que fundamenta este estudo evidenciou que a string principal de busca, que foi estruturada para recuperar simultaneamente trabalhos que integrassem afasia, rastreamento ocular, TROG-2, aprendizado de máquina e uma formalização taxonômica explícita, não retornou estudos que contemplassem esses cinco eixos de maneira concomitante. Quando a busca foi decomposta em eixos temáticos, surgiram evidências importantes sobre métricas, ontologias clínicas e paradigmas experimentais, mas ainda sem uma ponte explícita entre o sinal oculomotor, interpretação clínica e engenharia de atributos para ML [7]-[12].

Este trabalho propõe a solução que denominamos OcuLex.a qual, diferentemente de inventários genéricos de métricas oculomotoras, foi desenhada para o contexto da afasia em tarefas de compreensão linguística. A taxonomia articula três dimensões centrais: (i) o nível de processamento observado, (ii) o perfil comportamental inferido a partir das métricas, e (iii) o correlato linguístico-clínico associado. Como principais contribuições, este artigo apresenta: (i) um mapeamento sistemático atualizado da lacuna conceitual que envolve a integração entre afasia, rastreamento ocular e aprendizado de máquina; (ii) uma taxonomia estruturada com potencial de formalização ontológica; e (iii) uma validação preliminar em dados reais do contexto brasileiro, indicando utilidade descritiva e potencial de aplicação translacional da proposta.

II. Estado da arte

Esta seção apresenta o estado da arte que fundamenta a OcuLex, a partir de um mapeamento sistemático conduzido com finalidade exploratória e comparativa. Em vez de buscar síntese de efeito clínico, o objetivo foi identificar como a literatura organiza métricas oculomotoras, como estruturas taxonômicas e ontológicas vêm sendo empregadas em contextos correlatos e quais lacunas permanecem abertas para o cenário específico da afasia.

A. *Protocolo metodológico*

A condução seguiu a lógica de estudos de mapeamento sistemático, adequada quando o campo de busca é disperso, interdisciplinar e metodologicamente heterogêneo [17], com reporte transparente inspirado nas recomendações do PRISMA 2020 [18].

Foram definidas quatro questões de pesquisa:

- QP1- Quais taxonomias ou categorizações formais já organizam métricas e representações de eye tracking?
- QP2- Quais features oculomotoras e padrões visuais têm sido associados à afasia, ao processamento linguístico e a cenários neurológicos correlatos?
- QP3- De que modo ontologias e vocabulários controlados vêm apoiando workflows de ML clínico?
- QP4- Quais processos dificultam a conversão de sinais oculomotores em artefatos semanticamente estruturados e clinicamente interpretáveis em tarefas de compreensão sintática análogas ao TROG-2?

Para responder a essas questões, foram consultadas as bases PubMed/MEDLINE, IEEE Xplore, ACM Digital Library, ScienceDirect, SpringerLink, MDPI, SciELO e Google Scholar.

A estratégia combinou uma string principal trimodal - afasia, eye tracking, TROG-2, machine learning e taxonomia/ontologia, com uma segunda etapa formada por eixos temáticos (A-F), justamente para preservar sensibilidade quando a busca integrada retornasse poucos estudos, Tabela 1. A string principal não produziu trabalhos relevantes, ao passo que a decomposição por eixos resultou em aproximadamente 610 registros brutos, 98 triados por título e resumo, e 17 estudos sem duplicatas sendo incluídos. Mais do que um resultado operacional, o vazio da string principal constitui evidência empírica da inexistência de um artefato que una, no mesmo modelo, o comportamento ocular, a hipótese linguística e a estrutura semântica para ML clínico.

B. *Taxonomias de eye tracking*

No eixo de taxonomias de eye tracking, o estudo mais próximo é a Gaze-data Clustering Taxonomy (DCT), que organiza dados oculomotores de forma hierárquica por tarefa, comportamento e estratégia analítica [9]. Seu mérito está em reconhecer que fixações, sacadas e *scan paths* não devem ser tratados como lista plana de variáveis, mas como entidades agrupáveis segundo a função analítica. Entretanto, a GCT foi formulada em contexto predominantemente de interação humano-computador

Tabela 1. Síntese dos resultados do mapeamento sistemático orientado por eixos

Eixo	Descrição	Bases predominantes	Triados	Incluídos
String principal	Integração trimodal + taxonomia	Todas	0-3	0
A	Taxonomia + Eye Tracking	IEEE, ACM, MDPI, Google Scholar	~18	4
B	Taxonomia + Linguagem/Cognição	PubMed, ScienceDirect	~12	2
C	Ontologia + ML Clínico	Springer, PubMed, Nature	~15	3
D	Eye Tracking + Afasia + ML	PubMed, IEEE, Frontiers	~22	3
E	TROG-2 + Features Oculomotoras	PubMed, SciELO, Google Scholar	~8	2
F	Padrões Visuais + Distúrbios Neurológicos	PubMed, MDPI, Frontiers	~20	3

ISBN: 978-989-36481-2-4

e clustering, sem ancoragem em hipóteses linguístico-clínicas. Por isso, oferece uma estrutura formal útil, mas ainda insuficiente para a avaliação da afasia.

Em paralelo, os estudos de Blascheck et al. [10] e Laborde et al. [11], [12] desempenham papéis complementares no campo do rastreamento ocular. Blascheck et al. sistematizam formas de representação visual dos dados, como mapas de calor, áreas de interesse (AOI), diagramas de transição e scanpaths. Enquanto Laborde et al. consolidam definições operacionais de métricas temporais, espaciais, cinemáticas e sequenciais. Em conjunto, esses trabalhos fornecem base terminológica e metodológica para a OcuLex. Contudo, nenhum deles propõe um mecanismo explícito para converter métricas em perfis comportamentais clinicamente interpretáveis, nem para associar tais perfis a tarefas específicas de compreensão sintática.

C. Ontologias e representação semântica para ML clínico

No eixo ontológico, os estudos revisados sugerem que ontologias são especialmente valiosas quando o objetivo não é apenas classificar, mas tornar reusáveis e interpretáveis os atributos empregados em machine learning clínico. Robinson e Haendel [7] mostram que ontologias e conhecimento estruturado têm sido usados para phenotyping, integração semântica e apoio a pipelines translacionais, enquanto Sahoo et al. [8] demonstram, em registros heterogêneos de epilepsia, como *feature engineering* guiado por ontologia melhora a consistência semântica entre variáveis clínicas e modelos preditivos.

A principal lição desses trabalhos para o cenário da afasia é arquitetural: uma camada semântica intermediária pode ligar dados heterogêneos a inferências mais explicáveis. Contudo, o foco dominante da literatura ontológica ainda recai sobre fenótipos, diagnósticos, entidades anatômicas e registros clínicos, e não sobre comportamento oculomotor dinâmico durante tarefas linguísticas. Em outras palavras, há maturidade de método no uso de ontologias em saúde, mas não há ainda uma ontologia operacional voltada à codificação de padrões de busca visual em compreensão gramatical

D. Estado da arte em afasia, TROG-2 e aprendizagem de máquina com eye tracking

Os estudos diretamente conectados a afasia e linguagem confirmam o valor do eye tracking como janela processual para além do acerto final. Sharma et al. [1] mostram, em revisão de escopo, que duração de fixação, número de sacadas, regressões e tempo de visualização por AOI são recorrentes na análise de déficits de compreensão. Van Boxtel et al. [3] reforçam a viabilidade clínica do rastreamento on-line em tarefas de picture-sentence matching, enquanto Karpouzian-Rogers et al. [13] e Smith et al. [14] mostram que a distribuição do olhar entre alvo e distratores, bem como padrões de regressão na leitura, variam conforme o tipo e a gravidade do comprometimento linguístico.

No caso brasileiro, o TROG2-Br [2] e o dataset apresentado em Alves et al. [4], [6] são particularmente estratégicos porque aproximam a taxonomia de um cenário experimental concreto, com blocos sintáticos graduados e medidas passíveis de reinterpretação por perfil comportamental. Por outro lado, trabalhos de aprendizagem de máquina em populações neurológicas correlatas, como Castner et al. [15], e abordagens multimodais em PPA apoiadas por EEG [16], mostram que classificação automática é factível, mas ainda fortemente dependente de features ad hoc, específicas de cada estudo. Falta, portanto, uma ponte estável entre a métrica observada, o comportamento inferido e a hipótese clínica associada.

E. Síntese crítica da lacuna de pesquisa

A leitura cruzada dos eixos A–F permite caracterizar a "falta de dados" como "falta de integração estrutural". O Eixo A (Taxonomia + Eye Tracking) mostra que existem propostas de organização de métricas, representações e esforços de categorização, porém majoritariamente orientados a dados e visualizações, sem um mecanismo explícito de tradução para perfis comportamentais clinicamente interpretáveis. O Eixo B (Taxonomia + Linguagem/Cognição) demonstra que, embora tarefas linguísticas gerem evidências oculomotoras substanciais, a sua organização em estruturas formais reutilizáveis e semanticamente explícitas permanece pouco desenvolvida. O Eixo C (Ontologia + ML Clínico) indica maturidade metodológica para interoperabilidade e feature engineering guiado por ontologias, mas com foco predominante em fenótipos, diagnósticos e registros clínicos, não em comportamento oculomotor dinâmico durante tarefas de linguagem. O Eixo D (Eye Tracking + Afasia + ML) mostra viabilidade de classificação e discriminação entre grupos, mas com dependência de features ad hoc e baixa transportabilidade entre estudos. O Eixo E (TROG-2 + métricas oculomotoras) aponta para um cenário experimental consolidado, notadamente no TROG-2-Br e em datasets brasileiros, adequado à testagem de perfis. Entretanto, carece de uma estrutura intermediária que conecte explicitamente métricas oculomotoras, padrões comportamentais e hipóteses clínicas. Por fim, o Eixo F (Padrões Visuais + Distúrbios Neurológicos) sugere que padrões oculomotores são informativos em neurologia de forma ampla, mas a transferência para afasia exige controle rigoroso de tarefa, aquisição e confiabilidade.

Essa convergência sustenta três eixos centrais. O primeiro é taxonômico: há inventários e classificações parciais, mas não uma taxonomia orientada a comportamento para compreensão linguística em afasia. O segundo é semântico: ontologias mostram valor em ML, porém ainda não modelam de forma operacional eventos oculomotores ligados a tarefas linguísticas. O terceiro é translacional: estudos empíricos apontam diferenças entre grupos clínicos e controles, mas raramente organizam essas diferenças em perfis reutilizáveis para feature engineering, interpretação clínica e interoperabilidade. É precisamente nessa interseção que a OcuLex se posiciona, articulando aquisição do sinal ocular, representação do comportamento, hipótese linguístico-clínica e reutilização computacional em ML.

III. Taxonomia proposta

A OcuLex foi desenhada como um artefato de representação intermediária. Seu objetivo não é substituir a análise estatística nem o julgamento clínico, mas oferecer uma gramática comum para descrever como o comportamento visual observado durante tarefas linguísticas pode ser convertido em hipótese processual e, posteriormente, em atributo reutilizável por pipelines de machine learning. Quatro princípios orientaram sua construção: interpretabilidade clínica, a composicionalidade, transportabilidade entre paradigmas experimentais e compatibilidade com a representação ontológica.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Embora a proposta mantenha três dimensões centrais, o mapeamento mostrou que uma taxonomia útil para a prática clínica precisaria de uma camada transversal de anotação. Assim, a solução é composta por um núcleo hierárquico triaxial e por uma camada meta-analítica que registra contexto de tarefa, complexidade sintática, condição de aquisição e nível de confiança instrumental.

A Figura 1 sintetiza a OcuLex como uma camada intermediária entre (i) o sinal bruto de eye tracking e suas features e (ii) a interpretação comportamental e linguístico-clínica necessária para apoiar decisão clínica, e a feature engineering interpretável em pipelines de machine learning. A estrutura é organizada em três dimensões centrais e uma camada transversal.

A. Dimensão 1 - Nível de Processamento

Esta dimensão agrupa as features oculomotoras em estratos complementares para evitar listas "planas" e pouco comparáveis entre estudos: macro-temporal (ex.: tempo total de resposta, latência até a primeira fixação no alvo), macro-espacial (ex.: dispersão do olhar e relação alvo vs. distratores), micro-dinâmico (ex.: duração média de fixação, velocidade/amplitude de sacadas), sequencial (ex.: scan path, transições entre AOI, retornos/revisitas) e um estrato fisiológico-complementar quando disponível (ex.: vergência, gaze stability, pupilometria, erro de antisacada). Essa organização é coerente com revisões e consolidações recentes sobre métricas/representações oculomotoras e caracterização de scanpaths, além de taxonomias que defendem estruturação hierárquica por tarefa e comportamento. [9], [10].

B. Dimensão 2 - Perfil Comportamental

A partir de combinações estáveis de características da Dimensão 1, a OcuLex define perfis sintéticos de comportamento visual: Busca-Eficiente, Busca-Exploratória, Busca-Regressiva, Busca-Errante e Busca-Tardia, , Tabela 2. Esses perfis não possuem caráter diagnóstico, mas configuram descrições observacionais de padrões de busca e alocação atencional. Por exemplo, a Busca-Exploratória tende a envolver cobertura visual e custo de exploração (número de sacadas), enquanto a Busca-Tardia se caracteriza pela latência até a fixação do alvo, com organização global relativamente preservada. Evidências em afasia e populações correlatas indicam que métricas como duração das fixações, número de sacadas, regressões e distribuição entre alvo e distratores são informativas para diferenciar estratégias e dificuldades de compreensão, especialmente em tarefas do tipo picture–sentence matching e leitura [1], [3], [13], [14].

C. Dimensão 3 - Correlato linguístico-clínico

Cada perfil comportamental é ligado a hipóteses linguístico-clínicas em nível probabilístico, orientadas pela literatura e pelo contexto da tarefa. Por exemplo: (i) Busca-Exploratória com boa acurácia pode refletir compensação estratégica; (ii) Busca-Exploratória com baixa acurácia é mais compatível com déficit morfossintático genuíno sob maior complexidade; (iii) Busca-Regressionária (retornos a AOI/distratores) pode sinalizar pressão sobre memória de trabalho (incluindo componentes fonológicos) em perfis compatíveis com variantes como a logopênica; (iv) Busca-Tardia sugere lentificação do processamento linguístico com organização parcial mantida; e (v) Busca-Errante é compatível com comprometimento mais severo e/ou desorganização visuocognitiva adicional, devendo sempre ser interpretada à luz da qualidade do sinal e do desenho experimental. [1], [3], [13], [14].

D. Camada transversal de anotação e interoperabilidade.

A Figura 2 explicita que a interpretação dos perfis depende de metadados mínimos: contexto da tarefa (ex.: TROG-2/TROG2-Br, picture-sentence matching, leitura), complexidade sintática (simples vs. complexa), condição de aquisição (laboratório vs. webcam/sem calibração) e um indicador de confiabilidade (alta/média/baixa). Esse registro reduz comparações indevidas entre protocolos e é especialmente relevante quando se considera rastreamento via webcam e cenários clínicos mais acessíveis, nos quais a variabilidade instrumental pode aumentar [3]

E. Núcleo ontológico mínimo.

A Figura 2 inclui um núcleo de classes/relacionamentos suficientes para interoperabilidade: Participant exhibitsProfile BehavioralProfile; BehavioralProfile hasFeature EyeTrackingFeature; EyeTrackingFeature isFeatureOf ProcessingLevel; e BehavioralProfile suggestsDeficit LinguisticHypothesis, com AcquisitionCondition modulando confiança e comparabilidade. Essa formalização mínima segue recomendações de uso de ontologias em saúde para aumentar consistência semântica, reuso e interpretabilidade em ML clínico. [7], [8]

F. Representação formal mínima em estilo ontológico

Para permitir reuso em sistemas computacionais, a OcuLex pode ser descrita por um conjunto reduzido de classes e relações. A classe Participant exibe um ou mais objetos da classe BehavioralProfile. Cada BehavioralProfile possui relações hasFeature com instâncias de EyeTrackingFeature, que por sua vez são ligadas à classe ProcessingLevel por meio de isFeatureOf. Perfis ainda se conectam a hipóteses da classe LinguisticHypothesis pela relação suggestsDeficit. A camada transversal introduz AcquisitionCondition, TaskContext e SyntacticComplexity, que modulam a confiança e a comparabilidade entre observações.

Esse desenho é intencionalmente mínimo. Ele já é suficiente para integrar dados de experimentos diferentes, registrar procedência das features e sustentar etapas posteriores de feature engineering guiado por ontologia, aproximando a avaliação clínica de modelos explicáveis de machine learning [7], [8].

IV. Validação preliminar sobre o dataset de Alves et al. (2024)

A validação preliminar foi construída a partir dos resultados agregados reportados para o dataset brasileiro de Alves et al., [4] composto por 15 participantes com afasia de Broca e 6 controles saudáveis, todos avaliados em uma versão digitalizada do TROG-2 com registro ocular sincronizado [4]. O desenho experimental contemplou blocos simples e complexos, sendo observado o deterioro da acurácia à medida que a complexidade sintática aumentava, especialmente no grupo afásico, Tabela 3.

Os dados oferecem estatísticas agregadas por grupo e não a matriz individual completa de features já convertidas em perfis OcuLex. Por isso, validação aqui apresentada deve ser entendida como exploratória e grupal: ela verifica se as assinaturas médias do conjunto afásico e do conjunto de controle são coerentes com os perfis propostos. A etapa originalmente deseja-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

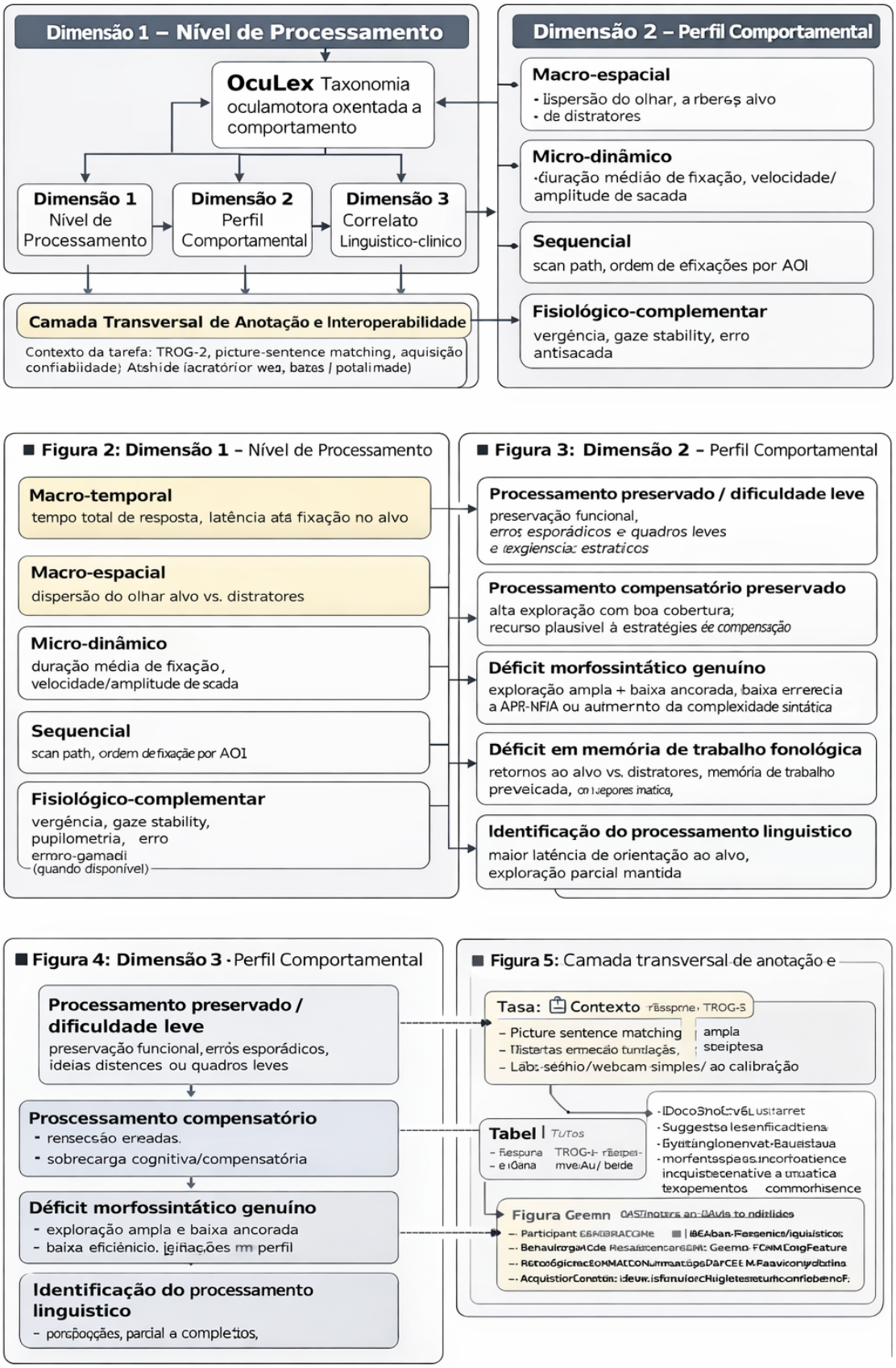


Figura 1. Estrutura conceitual da OcuLex: visão geral e leitura guiada.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

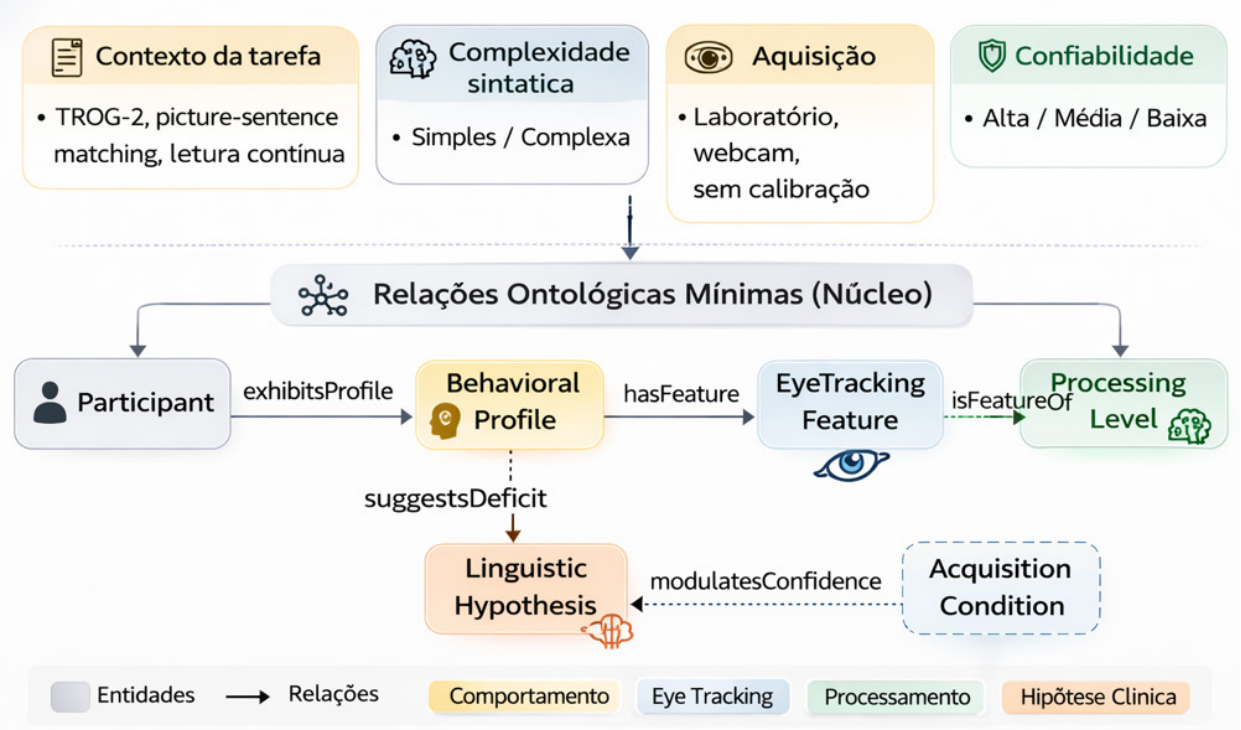


Figura 2. Camada transversal + interoperabilidade: metadados mínimos e relações ontológicas (fluxo)

Tabela 2. Perfis OcuLex, sinais oculomotores e hipótese clínica predominante

Perfil	Sinais dominantes	Leitura clínica predominante	Risco de confusão
Busca-Eficiente	baixa latência; poucas sacadas; alvo rapidamente estabilizado	processamento preservado ou dificuldade leve	erros pontuais podem mascarar déficit localizado
Busca-Exploratória	muitas sacadas; ampla cobertura; scan path mais longo	compensação estratégica ou sobrecarga cognitiva	precisa ser lida junto com a acurácia
Busca-Regressionária	retornos a AOI; revisitas a distratores; regressões	pressão sobre memória de trabalho / incerteza lexical	pode refletir tarefa mal calibrada
Busca-Errante	trajetória pouco estruturada; baixa economia visual; correções frequentes	comprometimento severo ou desorganização adicional	pode ser inflado por baixa qualidade de sinal
Busca-Tardia	latência alta até o alvo; exploração posterior parcialmente organizada	aumento da latência no processamento linguístico	exige controle para idade e familiaridade tecnológica

Tabela 3. Releitura taxonômica das métricas agregadas do dataset brasileiro em [4]

Indicador	Controle	Afásico	p-valor	Leitura OcuLex	Interpretação
Tempo médio de resposta (s)	10,23 ± 1,57	12,39 ± 2,30	0,0508	Busca-Tardia no grupo afásico	maior latência até a decisão
Total de sacadas	745,31 ± 205,91	1.099,00 ± 447,39	0,0508	Busca-Exploratória no grupo afásico	maior custo de exploração visual
Total de fixações (>=100 ms)	494,54 ± 112,62	583,10 ± 102,56	0,0940	Exploratória em tendência	inspeção mais extensa, sem separação robusta
Duração média de fixação (s)	0,5265 ± 0,0747	0,5258 ± 0,1499	0,9753	não discrimina perfil	tempo unitário de fixação semelhante
Dispersão média (área)	0,8419 ± 0,2536	0,7862 ± 0,2976	0,4757	não sustenta Errante	sem evidência de desorganização global

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

da de classificar participante por participante e comparar distribuições por teste exato de Fisher permanece como próximo passo natural, dependente do acesso aos arquivos individuais de saída do pipeline.

A leitura conjunta da Tabela 3 indica que o grupo afásico se afasta do controle principalmente por duas rotas: aumento do tempo de resposta e aumento do número de sacadas, sugerindo maior custo exploratório no grupo afásico. Essa combinação é mais consistente com um perfil híbrido Busca-Exploratória e Busca-Tardia do que com Busca-Errante ou Busca-Regressionária.

Embora os valores de p tenham se situado no limiar da significância (p = 0,0508), os tamanhos de efeito foram elevados (Cohen's d = 1,01 para tempo de resposta e d = 0,89 para total de sacadas), indicando diferenças substanciais entre os grupos e sugerindo limitação de poder estatístico decorrente do tamanho amostral reduzido no grupo controle. Tal enquadramento é coerente com a literatura. Estudos de viabilidade em afasia e em tarefas lexicalmente próximas ao TROG-2 relatam maior custo de exploração e aumento de latência para convergir ao alvo em condições clinicamente afetadas [3], [13]. Da mesma forma, o próprio material brasileiro mostra que blocos sintaticamente complexos reduzem acurácia e ampliam a carga de processamento [2], [4], [6] o que reforça o valor da camada transversal de complexidade sintática na OcuLex.

As demais métricas não apresentaram diferenças estatisticamente significativas, o que indica ausência de alteração global na dispersão espacial ou na duração média das fixações sugerindo preservação relativa da estabilidade local do olhar.

V. Padrão de fixações oculares

A Figura 3 apresenta o padrão de fixações oculares do grupo de controle, caracterizado por maior concentração espacial e trajetória visual mais econômica, sugerindo foco visual eficiente e relativa estabilidade atencional.

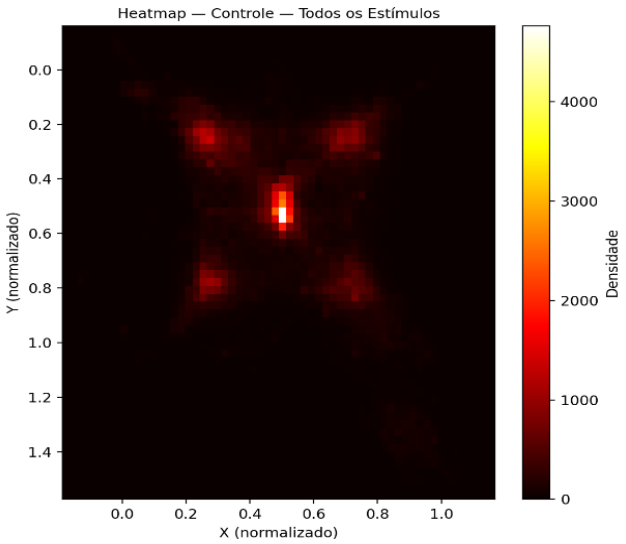


Figura 3. Padrão de Fixações Oculares do Controle

A Figura 4 ilustra o padrão do grupo afásico, caracterizado por maior dispersão espacial e varredura mais extensa do campo visual, compatíveis com maior esforço compensatório na compreensão gramatical.

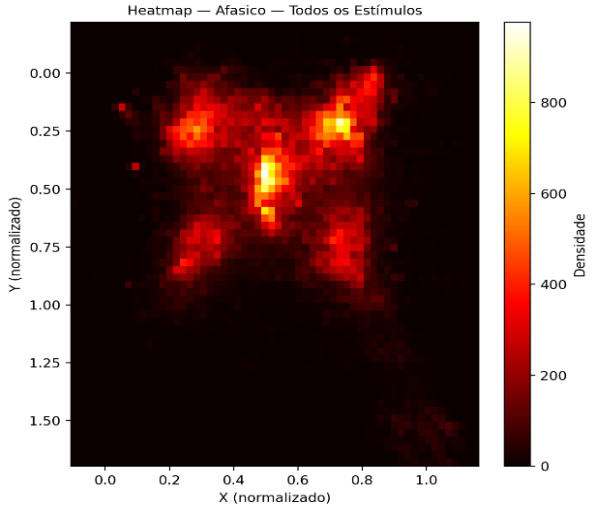


Figura 4. Padrão de Fixações Oculares Afásicos

VI. Discussão e limitações

O principal mérito da OcuLex é propor uma ponte entre três agendas que até agora caminharam de forma parcialmente dissociada: a agenda experimental do eye tracking em linguagem, a agenda psicométrica do TROG-2 e a agenda computacional do machine learning clínico. Em vez de tratar métricas como uma lista de variáveis sem relação aparente, a taxonomia as organiza em níveis de processamento e perfis que podem ser lidos tanto por pesquisadores quanto por clínicos.

A estrutura também favorece interpretabilidade. Em aplicações clínicas, a pergunta relevante raramente é apenas qual classe um modelo prevê; importa saber por que uma observação foi associada a maior risco de déficit morfossintático, lentificação de processamento ou pressão de memória de trabalho. Ao introduzir relações como hasFeature e suggestsDeficit, a OcuLex oferece um vocabulário semântico estável para relatórios explicáveis e dashboards de apoio à decisão [7], [8].

O estudo, contudo, apresenta limitações claras. A principal delas é o tamanho amostral do conjunto de dados brasileiro (n = 21), insuficiente para sustentar generalizações populacionais robustas. Além disso, a validação aqui reportada baseia-se em estatísticas agregadas por grupo, o que impede o cálculo efetivo da distribuição de perfis em nível individual e inviabiliza comparações formais por meio de teste do qui-quadrado ou teste exato de Fisher. Outra limitação decorre da heterogeneidade do campo: parte das features que motivaram a expansão do estrato fisiológico-complementar foi extraída de populações neurológicas análogas, e não exclusivamente de indivíduos com afasia.

Há ainda limitações práticas na aquisição dos dados. Estudos recentes indicam que o rastreamento por webcam e soluções sem calibração ampliam a acessibilidade, mas introduzem variabilidade instrumental que precisa ser explicitada, e não igno-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

rada [3]. Por isso, a camada transversal de anotação constitui um elemento metodológico, e não meramente descritivo: ela permite registrar a confiabilidade do sinal e evita comparações não controladas entre protocolos distintos.

Do ponto de vista ético, qualquer evolução da OcuLex para cenários assistivos reais deve observar rigorosamente princípios de anonimização, governança de dados, consentimento informado e conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD). O uso do eye tracking em contexto clínico pode envolver registros audiovisuais, padrões comportamentais potencialmente sensíveis e metadados relacionados à saúde; assim, a utilidade científica da taxonomia está condicionada a um desenho responsável de compartilhamento, armazenamento e acesso aos dados.

VII. Conclusão

Este artigo apresentou a OcuLex como uma taxonomia oculomotora orientada a comportamento para apoio à avaliação clínica da afasia. O mapeamento sistemático confirmou a lacuna de estudos que integrem, de forma simultânea, afasia, eye tracking, TROG-2, machine learning e taxonomia formal. Dessa forma a solução foi proposta como artefato estruturante: um vocabulário comum para organizar features, perfis comportamentais e hipóteses linguístico-clínicas.

A validação preliminar, ainda que limitada por dados agregados e por amostra pequena, mostrou que a taxonomia é capaz de reinterpretar diferenças estatísticas de modo clinicamente inteligível. No dataset brasileiro analisado, o grupo afásico exibiu assinatura compatível com predominância dos perfis Busca-Exploratória e Busca-Tardia, sugerindo aumento do custo de exploração visual e maior latência no processamento linguístico.

Em síntese, a contribuição da OcuLex é dupla. No plano científico, ela organiza um campo ainda disperso e torna comparáveis estudos metodologicamente heterogêneos. No plano computacional, oferece uma base para engenharia de atributos explicável, integração semântica e futura implementação de modelos clínicos baseados em machine learning com maior transparência. Como próximos passos, destacam-se: validação com especialistas em fonoaudiologia, aplicação à matriz em nível individual do conjunto de dados de Alves et al., [4] expansão para bases multicêntricas e refinamento dos perfis por meio de análise longitudinal e multimodal.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) através da Chamada Pública Universal 21/2024, bem como ao Ministério de Ciência e Tecnologia da Inovação (MCTI) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, através da Emenda Federal Individual 966745/2024.

Referências Bibliográficas

[1] Sharma, S.; et al. Eye Tracking Measures for Studying Language Comprehension Deficits in Aphasia: A Systematic Search and Scoping Review. Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 64(3), 1008-1022, 2021.

[2] Carthery-Goulart, M. T.; et al. Sentence Comprehension in Primary Progressive Aphasia: A Study of the Application of the Brazilian Version of the Test for the Reception of Grammar (TROG2-Br). Frontiers in Neurology, 13, 815227, 2022. DOI: 10.3389/fneur.2022.815227.

[3] Van Boxtel, W. S.; et al. Online Eye Tracking for Aphasia: A Feasibility Study Comparing Web and Lab Tracking and Implications for Clinical Use. Brain and Behavior, 14(11), e70112, 2024. DOI: 10.1002/brb3.70112.

[4] Alves, Michael Douglas Cabral, Paulo Souza, Maria Isabel Freitas, et al. A public dataset of aphasic and healthy people during an eye-tracking-based auditory comprehension test. Authorea. October 07, 2024..

[5] Freitas, M. I. D.; et al. Uso de Aprendizado de Máquina para Identificar o Tipo de Afasia Progressiva Primária a partir do Desempenho no Trog-2Br. In: Computer on the Beach, 14., 2023, Florianópolis. Anais, pp. 512-514, 2023.

[6] Souza, P. H.; Freitas, M. I.; Ramirez, A. R. G. Assessment of Aphasics Fluent in Portuguese Language Using Eye-Tracking. In: Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 18., 2023, Aveiro. Proceedings, pp. 1-4, 2023. DOI: 10.23919/CISTI58278.2023.10211448.

[7] Robinson, P. N.; Haendel, M. A. Ontologies, Knowledge Representation, and Machine Learning for Translational Research: Recent Contributions. Yearbook of Medical Informatics, 29(1), 159-162, 2020. DOI: 10.1055/s-0040-1701991.

[8] Sahoo, S. S.; et al. Ontology-Based Feature Engineering in Machine Learning Workflows for Heterogeneous Epilepsy Patient Records. Scientific Reports, 12, 18965, 2022. DOI: 10.1038/s41598-022-23101-3.

[9] Siradj, Y.; Adhinugraha, K. M.; Pardede, E. Towards Structured Gaze Data Classification: The Gaze Data Clustering Taxonomy (GCT). Multimodal Technologies and Interaction, 9(5), 42, 2025. DOI: 10.3390/mti9050042.

[10] Blascheck, T.; et al. Visualization of Eye Tracking Data: A Taxonomy and Survey. Computer Graphics Forum, 36(8), 260-284, 2017.

[11] Laborde, Q.; Roques, A.; Armougum, A.; Vayatis, N.; Bargiotas, I.; Oudre, L. Vision Toolkit Part 2: Features and Metrics for Assessing Oculomotor Signal: A Review. Frontiers in Physiology, 16, 1661026, 2025. DOI: 10.3389/fphys.2025.1661026.

[12] Laborde, Q.; Roques, A.; Armougum, A.; Vayatis, N.; Bargiotas, I.; Oudre, L. Vision Toolkit Part 3: Scanpaths and Derived Representations for Gaze Behavior Characterization: A Review. Frontiers in Physiology, 16, 1721768, 2026. DOI: 10.3389/fphys.2025.1721768.

[13] Karpouzian-Rogers, T.; et al. Eye Movements as a Measure of Word Comprehension Deficits in Primary Progressive Aphasia. Brain and Language, 232, 105165, 2022. DOI: 10.1016/j.bandl.2022.105165.

[14] Smith, K. G.; McWilliams, S. C.; Schmidt, J. Eye Movements of Persons with Aphasia During Connected-Text Reading. Aphasiology, 39(9), 1-14, 2025. DOI: 10.1080/02687038.2024.2413620.

[15] Castner, A.; et al. Machine Learning Algorithms on Eye Tracking Trajectories to Classify Patients with Spatial Neglect. Computers in Medical Imaging and Graphics, 96, 102048, 2022.

[16] Dial, H. R.; et al. Application of Machine Learning and Temporal Response Function Modeling of EEG Data for Differential Diagnosis in Primary Progressive Aphasia. Scientific Reports, 15(1), 29539, 2025.

[17] Petersen, K.; Feldt, R.; Mujtaba, S.; Mattsson, M. Systematic Mapping Studies in Software Engineering. In: International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering (EASE), 12., Bari, Italy. Proceedings, pp. 1-10, 2008.

[18] Page, M. J.; McKenzie, J. E.; Bossuyt, P. M.; Boutron, I.; Hoffmann, T. C.; Mulrow, C. D.; et al. The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. BMJ, 372, n71, 2021. DOI: 10.1136/bmj.n71.

Competencias docentes digitales: Análisis comparativo entre dos universidades latinoamericanas

Digital teaching competencies: A comparative analysis between two Latin American universities

Marisela Giraldo de López[1], Xiomara Bastardo Contreras[1], Nayade Domenech Polo[1], Rolando Villavicencio Santillán[1]
[1]Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil,
Facultad de Estudios de Posgrado
Guayaquil, Ecuador
mgiraldo@uteg.edu.ec; xbastardo@uteg.edu.ec; ndomenech@uteg.edu.ec; rvillavicencio@uteg.edu.ec

Resumen — **Este estudio compara las competencias digitales de los docentes universitarios en dos instituciones de educación superior de contextos nacionales distintos, enfocándose en cuatro dimensiones: alfabetización tecnológica, integración pedagógica de las TIC, formación continua y actitud hacia el uso de tecnologías. Se empleó un cuestionario validado con enfoque cuantitativo, transversal y descriptivo para medir el dominio y aplicación de estas competencias en ambos grupos docentes. En una institución, los docentes muestran un manejo homogéneo y sólido de herramientas digitales, especialmente en comunicación, gestión de información y creación de recursos educativos, pero enfrentan dificultades en la integración metodológica y actualización constante. En la otra, aunque los docentes conocen herramientas básicas, presentan mayor variabilidad en competencias digitales, debido a limitaciones en el acceso a tecnología y la preferencia por la autoformación sobre la capacitación formal. La relación entre las dimensiones de competencia digital es más fuerte en el contexto con políticas institucionales claras y mejor acceso a tecnología, mientras que en el otro contexto las correlaciones son débiles, reflejando desigualdades estructurales. Es necesario fortalecer las políticas institucionales y garantizar acceso equitativo a recursos tecnológicos para mejorar las competencias digitales docentes y promover la transformación digital en la educación superior**

Palabras Clave – **Competencias digitales; docentes universitarios; TIC; formación continua; integración pedagógica; alfabetización tecnológica.**

Abstract — **This study compares the digital competencies of university faculty members at two higher education institutions in different national contexts, focusing on four dimensions: technological literacy, pedagogical integration of ICTs, continuing education, and attitudes toward the use of technologies. A validated questionnaire with a quantitative, cross-sectional, and descriptive approach was used to measure the mastery and application of these competencies in both faculty groups. At one institution, faculty members demonstrate a consistent and solid command of digital tools, especially in communication, information management, and the creation of educational resources, but face difficulties in methodological integration and ongoing updating. At the other institution, although faculty members are familiar with basic tools, they exhibit greater variability in digital competencies due to limited access to technology and a preference for self-training over formal training. The relationship between the dimensions of digital competency is stronger in the context with clear institutional policies and better access to technology, while in the other context, the correlations are weak, reflecting structural inequalities. It is necessary to strengthen institutional policies and ensure equitable access to technological resources to improve teachers' digital skills and promote digital transformation in higher education.**

Keywords – Digital skills; university teachers; ICT; continuing education; pedagogical integration; technological literacy.

I. Introducción

La rápida digitalización de la educación superior ha generado una creciente necesidad de que los docentes universitarios desarrollen competencias digitales sólidas, integrando el uso crítico, creativo y pedagógico de las tecnologías en su labor diaria. En este contexto, la capacidad de los docentes para adaptarse a los cambios tecnológicos y responder a los desafíos de la sociedad del conocimiento se ha convertido en un elemento central para la calidad educativa y la innovación institucional [1].

Diversos estudios recientes subrayan que las competencias digitales docentes van más allá del simple manejo instrumental de herramientas, abarcando la integración metodológica, la colaboración en entornos virtuales y la actitud reflexiva frente al uso de las TIC [2]; [3]. Sin embargo, la literatura comparativa evidencia que el desarrollo de estas competencias varía significativamente entre instituciones y países, en función de factores como la disponibilidad de recursos tecnológicos, la existencia de políticas de formación continua y la cultura organizacional [4].

En América Latina, las diferencias en infraestructura, conectividad y acceso a capacitación docente han dado lugar a escenarios heterogéneos, donde la autoformación y la motivación individual cobran un papel relevante, pero no siempre garantizan la integración pedagógica efectiva de las TIC [4]. Por ello, analizar comparativamente las competencias digitales de los docentes en universidades de distintos contextos nacionales resulta fundamental para identificar fortalezas, debilidades y oportunidades de mejora.

A partir de este enfoque, el presente análisis compara los niveles y relaciones entre las dimensiones de las competencias digitales docentes en una institución de educación superior de

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

Ecuador y una universidad venezolana, tomando como referencia marcos internacionales y estudios recientes. El propósito es aportar evidencia sobre las diferencias y similitudes en el dominio de estas competencias, así como sobre los factores institucionales y contextuales que inciden en su desarrollo, contribuyendo a la formulación de estrategias de formación y políticas educativas orientadas a la transformación digital universitaria.

II. Metodología

A. Enfoque y diseño de la investigación

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo transversal, descriptivo y correlacional, adecuado para comparar el nivel de competencias digitales docentes en dos universidades latinoamericanas de contextos nacionales diferentes [5]. Este diseño permite analizar simultáneamente los perfiles y relaciones entre variables sociodemográficas y las dimensiones de competencia digital, proporcionando una visión integral de la situación actual en cada institución.

B. Muestra y participantes

La muestra se conformó mediante un muestreo no probabilístico incidental, seleccionando a los docentes universitarios disponibles y dispuestos a participar en el periodo de aplicación del instrumento, garantizando la diversidad de áreas disciplinares y modalidades de enseñanza [6]. En la Universidad localizada en Ecuador, la muestra estuvo compuesta por 140 docentes, con una distribución de 46,43% mujeres y 53,57% hombres. La mayoría de los participantes tenía entre 36 y 50 años (57,86%), seguidos por el grupo de 26 a 35 años (27,14%) y de 51 años o más (15%). Predominaban los docentes con título de maestría (83,57%), y la experiencia docente se concentraba entre 1 y 10 años. La modalidad de enseñanza más frecuente era online o híbrida, y la muestra incluía docentes de grado y posgrado de diversas áreas académicas.

En la universidad venezolana, la muestra estuvo conformada por 120 docentes, con una proporción estimada de 55% mujeres y 45% hombres. La mayoría se encontraba en el rango de 41 a 55 años (48%), seguido por el grupo de 31 a 40 años (32%) y mayores de 55 años (20%). En cuanto a la formación académica, el 60% tenía título de maestría, el 30% especialización y el 10% doctorado. La experiencia docente se distribuía en 40% con 6 a 15 años, 35% con 1 a 5 años y 25% con más de 15 años. Predominaba la docencia en modalidad híbrida o virtual (70%), mientras que el 30% restante se desempeñaba en modalidad presencial. Se incluyeron docentes de ciencias sociales, humanidades, ciencias básicas, ingeniería y educación, en proporción a la oferta académica local.

C. Instrumentos y recolección nde datos

Para la recolección de datos se utilizó un cuestionario validado, basado en el instrumento propuesto por [7], estructurado en una escala tipo Likert de 39 ítems distribuidos en cuatro dimensiones: alfabetización tecnológica, integración pedagógica de las TIC, formación continua en tecnologías y actitud hacia el uso de TIC. Cada ítem fue valorado en una escala de 1 a 4, donde 1 corresponde a un nivel muy bajo o total desacuerdo y 4 a un nivel muy alto o total acuerdo, según la naturaleza de la dimensión evaluada. El instrumento mostró alta fiabilidad, con un coeficiente alfa de Cronbach superior a 0,90, lo que respalda su consistencia interna para la medición de competencias digitales docentes.

El cuestionario fue aplicado de manera digital, utilizando plataformas como Google Forms y el envío por correo electrónico institucional, garantizando la confidencialidad y voluntariedad de la participación. Los participantes fueron informados previamente sobre los objetivos del estudio, el carácter anónimo de las respuestas y el uso exclusivo de los datos con fines académicos, cumpliendo los principios éticos de la investigación educativa.

El procesamiento de los datos incluyó el cálculo de estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, mediana, moda, valores mínimo y máximo) para cada dimensión y para el puntaje total de competencias digitales. Se realizaron análisis factoriales para validar la estructura interna del instrumento y pruebas de asociación (t de Student, ANOVA y chi-cuadrado) para explorar diferencias y relaciones entre variables categorizadas. Para analizar la relación entre las dimensiones y la competencia digital global, se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, complementado con gráficos de dispersión. El nivel de significación estadística se estableció en 5% ($p \leq 0{,}05$), considerando también resultados marginalmente significativos al 10% ($0{,}05 < p \leq 0{,}10$), siguiendo las recomendaciones metodológicas para estudios educativos [5].

El análisis estadístico se realizó utilizando los programas JASP, EPI INFO, Minitab y SPSS, lo que permitió una triangulación robusta de los resultados y la validación de los hallazgos obtenidos.

D. Instrumento de recolección de datos

Para la recolección de datos se utilizó un cuestionario validado, basado en el instrumento propuesto por [7], estructurado en una escala tipo Likert de 39 ítems distribuidos en cuatro dimensiones: alfabetización tecnológica, integración pedagógica de las TIC, formación continua en tecnologías y actitud hacia el uso de TIC. Cada ítem fue valorado en una escala de 1 a 4, donde 1 corresponde a un nivel muy bajo o total desacuerdo y 4 a un nivel muy alto o total acuerdo, según la naturaleza de la dimensión evaluada. El instrumento mostró alta fiabilidad, con un coeficiente alfa de Cronbach superior a 0,90, lo que respalda su consistencia interna para la medición de competencias digitales docentes.

E. Procedimiento de aplicación y análisis de datos.

El cuestionario fue aplicado de manera digital, utilizando plataformas como Google Forms y el envío por correo electrónico institucional, garantizando la confidencialidad y voluntariedad de la participación. Los participantes fueron informados previamente sobre los objetivos del estudio, el carácter anónimo de las respuestas y el uso exclusivo de los datos con fines académicos, cumpliendo los principios éticos de la investigación educativa.

El procesamiento de los datos incluyó el cálculo de estadísticas descriptivas (media, desviación estándar, mediana, moda, valores mínimo y máximo) para cada dimensión y para el puntaje total de competencias digitales. Se realizaron análisis factoriales para validar la estructura interna del instrumento y pruebas de asociación (t de Student, ANOVA y chi-cuadrado) para explorar diferencias y relaciones entre variables categorizadas. Para analizar la relación entre las dimensiones y la competencia digital global, se utilizó el coeficiente de correlación de

ISBN: 978-989-36481-2-4

Pearson, complementado con gráficos de dispersión. El nivel de significación estadística se estableció en 5% ($p \leq 0,05$), considerando también resultados marginalmente significativos al 10% ($0,05 < p \leq 0,10$), siguiendo las recomendaciones metodológicas para estudios educativos (Hernández-Sampieri, et al. 2014).

El análisis estadístico se realizó utilizando los programas JASP, EPI INFO, Minitab y SPSS, lo que permitió una triangulación robusta de los resultados y la validación de los hallazgos obtenidos.

III. Resultados y discusión

A. Características sociodemográficas

En la Tab. I se presentan comparativamente las características sociodemográficas de los docentes de las instituciones de educación superior (IES) de Ecuador y Venezuela. Las características se destacan de la siguiente manera:

Género: se compara la proporción de hombres y mujeres en ambas universidades.

Edad: se muestra la distribución por rangos etarios; aunque los grupos no coinciden exactamente, se ajustaron para facilitar una comparación clara.

Formación académica: se detallan los niveles alcanzados, incluyendo títulos de maestría, doctorado y especialización.

Experiencia docente: se agrupan los años de experiencia en tres rangos comparables entre ambas muestras.

Modalidad de enseñanza: se distingue entre modalidades presencial y virtual/híbrida.

Esta comparación permite una visión integral y clara de los perfiles docentes en ambos contextos nacionales.

TABLE I. Características sociodemográficas

	Ecuador		**Venezuela**
Variable	**Categorías**	**%**	**%**
Género	Mujer	46,43	55
	Hombre	53,57	45
Edad (años)	26 a 35	27,14	0
	36 a 50	57,86	80
	51 o más	15,00	20
Nivel académico	Maestría	83,57	60
	Especialización	0	30
	Doctorado	16,43	10
Tiempo en la docencia (años)	1-5 años	35,71	35
	5 a 10 años	21,43	40
	10 a 15 años	14,29	
	15 a 20 años	17,14	25
	Más de 20 años	11,43	
Nivel que imparte	Grado	76,43	80,65
	Posgrado	23,57	19,35
Modalidad que imparte	On-line	57,86	14,4
	Presencial	11,43	30,00
	Hibrida	30,71	55,60

El análisis comparativo de las características sociodemográficas de los docentes universitarios de Ecuador y Venezuela muestra tendencias que se alinean con hallazgos recientes en la literatura académica. Por ejemplo, la mayor proporción de mujeres en la docencia venezolana (55%) frente a la ecuatoriana (46,43%) refleja la feminización progresiva del profesorado universitario en América Latina, fenómeno que ha sido reportado en estudios recientes como el de [8], quienes destacan la creciente participación femenina en la educación superior, aunque con variaciones según el país.

En cuanto a la edad, la concentración de docentes en el rango de 36 a 50 años en ambas muestras (Ecuador: 57,86%; Venezuela: 80%) coincide con lo señalado por [9], quienes identifican que la mayoría del profesorado universitario en la región se encuentra en etapas medias de su carrera, lo que puede favorecer la estabilidad institucional pero también plantea retos para el relevo generacional, especialmente en contextos donde la presencia de docentes jóvenes es baja, como ocurre en Venezuela.

Respecto a la formación académica, el predominio de la maestría en Ecuador (83,57%) y la significativa presencia de especialización en Venezuela (30%) se corresponden con lo observado por [10], quienes subrayan la diversidad de trayectorias formativas y la importancia de los programas de posgrado en la profesionalización docente.

Finalmente, la preferencia por la modalidad online en Ecuador (57,86%) y la modalidad híbrida en Venezuela (55,6%) está en línea con las tendencias de digitalización postpandemia reportadas por [11], quienes documentan la consolidación de modelos flexibles de enseñanza como respuesta a las nuevas demandas educativas. Estos resultados evidencian que las diferencias y similitudes en los perfiles docentes no solo responden a factores individuales, sino que reflejan las particularidades y desafíos de los sistemas universitarios de cada país, en concordancia con la literatura reciente.

Estas diferencias reflejan no solo las particularidades institucionales y nacionales, sino también posibles variaciones en las políticas de formación, acceso a tecnologías y adaptación a nuevas demandas educativas, aspectos que pueden incidir directamente en el desarrollo de competencias digitales docentes y en la capacidad de respuesta de cada sistema universitario ante los retos actuales.

B. Media y desviación estándar de las dimensiones por universidades

En la Tab. II se presentan la media y la desviación estándar correspondientes a cada dimensión evaluada en las universidades analizadas**.**

TABLE II. Media y desviación estándar de las dimensiones evaluadas por universidad

Dimensión	**Universidad**			
	Ecuador		**Venezuela**	
	Media	**Desviación estándar**	**Media**	**Desviación estándar**
Uso y alfabetización tecnológica	3,15	0,52	2,6	0,7

ISBN: 978-989-36481-2-4

Dimensión	Universidad			
	Ecuador		Venezuela	
	Media	Desviación estándar	Media	Desviación estándar
Metodología educativa a través de las TIC	2,89	0,57	2,4	0,8
Formación del profesorado universitario en TIC	2,78	0,61	2,2	0,6
Actitud ante las TIC en la educación superior	3,22	0,49	3	0,5

Al comparar las medias y desviaciones estándar de las dimensiones relacionadas con el uso y percepción de las TIC en la educación superior entre la universidad ecuatoriana y la venezolana, se evidencian diferencias que reflejan distintos niveles de integración y aceptación tecnológica en ambos contextos.

En la dimensión de Uso y alfabetización tecnológica, la universidad ecuatoriana muestra una media de 3,15 y una desviación estándar de 0,52, mientras que la universidad venezolana presenta una media menor de 2,6 y una desviación estándar más alta de 0,70. Esto indica que, en promedio, los usuarios ecuatorianos tienen un mayor dominio y uso de las TIC, además de una percepción más homogénea. Este resultado es coherente con lo planteado por [12], quienes señalan que la adopción efectiva de competencias digitales en docentes y estudiantes depende en gran medida de la formación continua y la infraestructura tecnológica, factores que podrían estar más desarrollados en el contexto ecuatoriano.

En la dimensión de Metodología educativa a través de las TIC, la universidad ecuatoriana alcanza una media de 2,89 con desviación estándar de 0,57, superando a la universidad venezolana que presenta una media de 2,4 y desviación estándar de 0,80. La mayor variabilidad en Venezuela puede reflejar diferencias internas en la implementación y aceptación de metodologías digitales, lo que coincide con [13], quien destaca que la integración didáctica de las TIC en la educación superior es clave para ofrecer una enseñanza personalizada e inclusiva, pero enfrenta retos ligados a la heterogeneidad en la preparación y recursos disponibles.

Respecto a la Formación del profesorado universitario en TIC, la universidad ecuatoriana presenta una media de 2,78 y desviación estándar de 0,61, mientras que la venezolana muestra una media inferior de 2,2 con desviación estándar similar (0,60). Esto sugiere que la capacitación docente en TIC es percibida como más sólida en Ecuador, aspecto fundamental para la innovación pedagógica y el éxito en la adopción tecnológica, tal como enfatizan [14], quienes resaltan la necesidad de formación especializada para maximizar los beneficios de las TIC en la enseñanza universitaria.

Finalmente, en la dimensión de Actitud ante las TIC en la educación superior, ambas universidades muestran medias relativamente cercanas (3,22 en Ecuador y 3,0 en Venezuela) con desviaciones estándar similares, lo que indica una disposición favorable hacia las tecnologías digitales en ambos contextos. Esto es consistente con los hallazgos de un estudio cuasiexperimental que identificó actitudes positivas tanto en docentes como en estudiantes, subrayando la importancia de fortalecer competencias para mantener esta tendencia [15].

C. Competencias digitales de los docentes universitarios

En la Tabl.III, se presentan un comparativo de los resultados por cada dimensión evaluada entre los docentes de la universidad del Ecuador y la universidad de Venezuela.

TABLE III. Comparación de resultados por dimensiones TIC entre docentes de Ecuador) y universidad venezolana

Dimensión	Universidad	
	Ecuador	Venezuela
Alfabetización tecnológica	Los docentes muestran una base sólida en el manejo de herramientas digitales para comunicación, gestión de información y creación de recursos.	Existe conocimiento básico y familiaridad con herramientas digitales, pero el dominio es más heterogéneo y depende del acceso a recursos.
Integración pedagógica de las TIC	Se detectan áreas de mejora en la integración metodológica de las TIC y en la innovación didáctica, aunque el uso es frecuente en la práctica.	La integración metodológica es menos sistemática y predomina la autoformación, lo que limita la innovación y la aplicación pedagógica de TIC.
Formación continua en tecnologías	La actualización es reconocida como importante, pero la participación en formación formal es irregular; existen estrategias institucionales de apoyo.	La formación continua depende en gran medida de la iniciativa individual, con menor acceso a programas institucionales de capacitación.
Actitud hacia las TIC	Predomina una actitud positiva hacia la tecnología, aunque se percibe la necesidad de mayor apoyo institucional y recursos para su integración.	La actitud es favorable, pero la integración efectiva se ve limitada por barreras contextuales y falta de acompañamiento institucional.

Los resultados muestran que los docentes de Ecuador poseen una alfabetización tecnológica más sólida y homogénea en comparación con la universidad venezolana, donde las habilidades digitales básicas predominan, pero con limitaciones debido a la infraestructura y conectividad. Esto coincide con lo planteado por Vargas-Murillo (2019), quienes argumentan que el acceso y la calidad de los recursos tecnológicos son determinantes clave para el desarrollo de competencias digitales avanzadas. Además, la autoformación como estrategia principal en contextos con recursos limitados es un fenómeno común, tal como señala [17], destacando la importancia de la motivación intrínseca para superar barreras tecnológicas.

En cuanto a la integración pedagógica, la universidad de Ecuador evidencia un uso más frecuente de recursos digitales, aunque con oportunidades para innovar metodológicamente, mientras que la universidad venezolana presenta un uso más limitado y tradicional de las TIC, principalmente como apoyo y no como eje central de la enseñanza. Esto está en línea con lo expuesto por [18], quien enfatiza que la integración efectiva de las TIC requiere no solo acceso a tecnología, sino también un cambio en las prácticas pedagógicas hacia metodologías activas y colaborativas. Las limitaciones de infraestructura en contextos vulnerables dificultan esta transformación, tal como lo reporta [19].

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Respecto a la formación continua, ambos contextos dependen en gran medida de la autoformación, aunque la universidad de Ecuador presenta una mayor conciencia institucional sobre la necesidad de capacitación formal. La literatura reciente subraya que la formación docente sistemática y continua es esencial para mantener competencias digitales actualizadas [20]. La ausencia de programas estructurados en la universidad venezolana genera brechas en habilidades digitales avanzadas, lo que coincide con lo señalado por [21], sobre la necesidad de fortalecer políticas institucionales para la formación docente en TIC.

Finalmente, la actitud hacia las TIC es positiva en ambas universidades, aunque condicionada por factores contextuales. En la universidad de Ecuador, persisten algunas resistencias asociadas a la falta de tiempo para capacitarse, mientras que en la universidad venezolana la incertidumbre tecnológica y la falta de apoyo institucional generan ciertas resistencias. Según [22], la actitud positiva hacia las TIC está estrechamente vinculada con el nivel de competencia digital y el apoyo organizacional, factores que influyen directamente en la adopción efectiva de tecnologías en educación.

D. Coeficiente de correlación de pearson

En la Tab. IV y Fig. 1, se ilustra el coeficiente de correlación de pearson de cada dimensión y por universidad evaluada:

TABLA IV. COEFICIENTE DE CORRELACIÓN DE PEARSON DE CADA DIMENSIÓN Y POR UNIVERSIDAD

Dimensión	**IES Ecuador**	**IES Venezuela**
	r (Pearson)	
Alfabetización tecnológica	0,85	0,70
Integración pedagógica de TIC	0,83	0,68
Formación continua en TIC	0,80	0,65
Actitud hacia las TIC	0,74	0,60

En la IES de Ecuador, todas las dimensiones presentan correlaciones fuertes ($r \geq 0,74$) con la competencia digital global, lo que refleja un desarrollo más homogéneo e integral de las competencias digitales docentes.

En la universidad venezolana, aunque las correlaciones también son positivas y significativas, son más bajas (r entre 0,60 y 0,70), lo que indica una relación menos consistente y mayor dispersión en el desarrollo de las competencias digitales.

Estas diferencias sugieren que en la IES de Ecuador el avance en una dimensión favorece el desarrollo global, mientras que en la universidad venezolana el progreso en una dimensión no necesariamente implica un avance equivalente en las otras, probablemente por las diferencias en acceso a recursos, formación formal y apoyo institucional.

Los resultados obtenidos muestran coeficientes de correlación de Pearson elevados en ambas instituciones, aunque consistentemente superiores en la IES de Ecuador respecto a la IES venezolana en todas las dimensiones evaluadas: alfabetización tecnológica (0,85 vs. 0,70), integración pedagógica de TIC (0,83 vs. 0,68), formación continua en TIC (0,80 vs. 0,65) y actitud hacia las TIC (0,74 vs. 0,60).

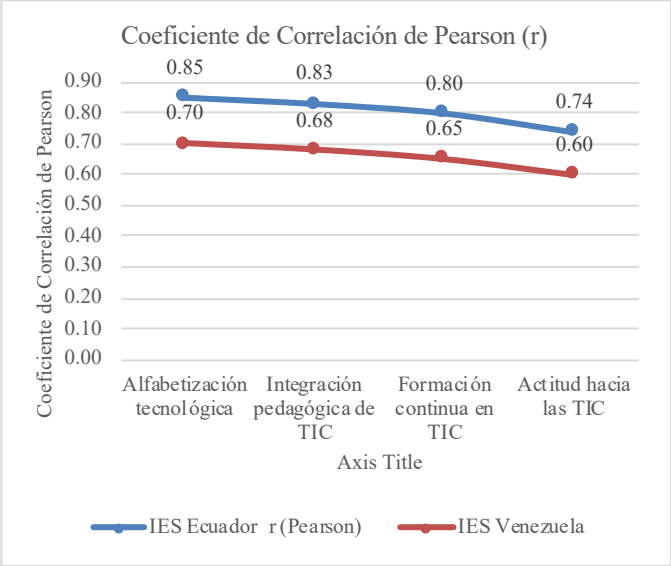


Figure 1. Coeficiente de correrlación de Pearson por Universidad

Estos resultados son consistentes con lo reportado por [23], quienes señalan que el desarrollo de competencias digitales en el profesorado suele estar fuertemente correlacionado con la integración pedagógica de las TIC y la disposición a la formación continua, especialmente en contextos donde existe un mayor apoyo institucional y acceso a recursos tecnológicos. Asimismo, [24] destaca que la actitud hacia las TIC y la autoeficacia docente son factores determinantes que potencian la integración efectiva de la tecnología en la enseñanza, lo que puede explicar las correlaciones elevadas observadas en la IES de Ecuador.

En la IES venezolana, aunque las correlaciones también son positivas, los valores más bajos pueden atribuirse a limitaciones de infraestructura y a una menor sistematicidad en la formación docente, situación que coincide con lo expuesto por [25], quienes argumentan que las brechas tecnológicas y la falta de políticas institucionales claras tienden a debilitar la relación entre alfabetización digital, integración pedagógica y actitud hacia las TIC.

Por su parte, [26] han documentado que la formación continua y el acceso a experiencias de aprendizaje profesional influyen directamente en la fortaleza de las competencias digitales y su correlación con otras dimensiones educativas.

IV. CONCLUSIONES

El análisis comparativo revela que los docentes de la universidad ecuatoriana presentan un mayor dominio y homogeneidad en las competencias digitales, especialmente en el uso de herramientas tecnológicas para la comunicación, gestión de información y creación de recursos educativos, en comparación con sus pares de la universidad venezolana.

En la universidad venezolana, aunque existe familiaridad con herramientas digitales básicas, se observa una mayor dispersión en el dominio de competencias digitales, atribuida a limitaciones en el acceso a recursos tecnológicos y a la prevalencia de la autoformación sobre la capacitación formal.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Las relaciones entre las dimensiones de competencia digital (alfabetización tecnológica, integración pedagógica, formación continua y actitud) son más fuertes y consistentes en el contexto ecuatoriano, favorecidas por políticas institucionales y acceso homogéneo a tecnología, mientras que en el contexto venezolano son más débiles y heterogéneas.

En ambos contextos, la actitud hacia las TIC es positiva; sin embargo, en la universidad venezolana, esta actitud no siempre se traduce en una integración efectiva de las tecnologías en la práctica docente, debido a barreras contextuales y falta de apoyo institucional.

El perfil sociodemográfico, especialmente el nivel de formación académica y la experiencia docente, influye significativamente en el dominio de competencias digitales en ambas universidades, aunque el impacto es más evidente en la institución con mayor acceso a formación y recursos.

Se identifican áreas de mejora en la integración metodológica de las TIC y en la actualización continua de competencias en ambas universidades, pero la brecha es más pronunciada en la universidad venezolana, donde la formación formal es menos accesible.

Los hallazgos subrayan la importancia de fortalecer las estrategias institucionales de formación y actualización docente, así como de garantizar el acceso equitativo a recursos tecnológicos, para consolidar la transformación digital en la educación superior de ambos países.

Finalmente, el estudio demuestra que el desarrollo de competencias digitales docentes es un proceso multidimensional y dependiente del contexto institucional; por ello, las políticas educativas deben adaptarse a las realidades específicas de cada universidad para cerrar brechas y promover la calidad educativa en entornos digitales.

Referências Bibliográfica

[1] C. Redecker and Y. Punie, European Framework for the Digital Competence of Educators: DigCompEdu. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017.

[2] L. Martín-Párraga, C. Llorente-Cejudo, and J. Cabero-Almenara, "Análisis de las competencias digitales docentes desde los marcos e instrumentos de evaluación," International Journal of Educational Research and Innovation (IJERI), no. 18, pp. 62–79, 2022. https://doi.org/10.46661/ijeri.7444

[3] F. Caena and C. Redecker, "Aligning teacher competence frameworks to 21st century challenges: The case for the European Digital Competence Framework for Educators (DigCompEdu)," European Journal of Education, vol. 54, pp. 356–369, 2019. https://doi.org/10.1111/ejed.12345

[4] R. García-Ruiz, M. Buenestado-Fernández, and M. S. Ramírez-Montoya, "Evaluación de la competencia digital docente: instrumentos, resultados y propuestas. Revisión sistemática de la literatura," Educación XX1, vol. 26, no. 1, pp. 273–301, 2023. https://doi.org/10.5944/educxx1.33520

[5] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and P. Baptista Lucio, Metodología de la investigación, 6th ed. México: McGraw-Hill, 2014.

[6] T. Otzen and C. Manterola, "Técnicas de muestreo sobre una población a estudio," International Journal of Morphology, vol. 35, no. 1, pp. 227–232, 2017. https://doi.org/10.4067/S0717-95022017000100037

[7] M. Giraldo de López, X. Bastardo Contreras, and I. Vega Velásquez, "Validez de constructo y confiabilidad del instrumento para medición decompetencias digitales de los docentes," in Memorias de la Décima Cuarta Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética (CICIC 2024), pp. 43–50, 2024. https://doi.org/10.54808/CICIC2024.01.43

[8] D. Seijo, M. J. Vázquez, M. Novo, and F. Fariña, "Estudio de los efectos del sentido de pertenencia a comunidades virtuales en el bienestar psicológico y el ajuste al contexto académico," Educación XX1, vol. 26, no. 1, pp. 229–247, 2023. https://doi.org/10.5944/educxx1.31818

[9] G. Rueda-Barrios, J. González-Bueno, M. Luzardo, and P. Barradas, "Relación entre las características sociodemográficas, el perfil docente y el perfil investigador del profesor universitario," Revista ESPACIOS, vol. 41, no. 4, 2020.

[10] B. Colin and G. Barajas, "Reconstrucción de trayectorias formativo-profesionales al egresar de posgrado," Revista Electrónica de Investigación Educativa, vol. 26, e23, 2024. https://doi.org/10.24320/redie.2024.26.e23.5782

[11] G. Cárdenas-Contreras, "Docencia universitaria y competencias para la era pospandemia: un proceso hacia la alfabetización digital," Revista Docentes 2.0, vol. 14, no. 2, pp. 5–14, 2022. https://doi.org/10.37843/rted.v14i2.299

[12] J. L. Cosquillo, C. S. Arteaga, O. Venegas, and C. B. Muñoz, "Competencias digitales TIC en docentes universitarios: retos y oportunidades en el proceso de enseñanza en la era de la educación 4.0," Reincisol, vol. 4, no. 7, pp. 1548–1567, 2025. https://doi.org/10.59282/reincisol.V4(7)1548-1567

[13] J. L. Serrano Aguilar, "Procedimientos didácticos para el uso de las TIC en la educación superior," Sinergia Académica, vol. 8, no. Especial 1, pp. 414–425, 2025. https://doi.org/10.51736/0e1vpq38

[14] R. Gutiérrez Cuesta and C. González Jiménez, "Impacto de las tecnologías de la información y comunicación en el aprendizaje de las matemáticas en la educación superior," Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, vol. 9, no. 2, pp. 1094–1114, 2025. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v9i2.16934

[15] F. M. Cedeño Mendoza and Á. E. Torres-Zapata, "Impacto de las TIC en la enseñanza-aprendizaje: caso de estudio en la carrera de Tecnología de la Información de la Universidad Técnica de Manabí," RIDE Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo, vol. 15, no. 29, 2024. https://doi.org/10.23913/ride.v15i29.2099

[16] G. Vargas-Murillo, "Competencias digitales y su integración con herramientas tecnológicas en educación superior," Cuadernos Hospital de Clínicas, vol. 60, no. 1, pp. 88–94, 2019.

[17] I. N. Chonata-Guilla, "Estrategias didácticas digitales como herramienta de autoaprendizaje en docentes de educación básica superior," Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, vol. 7, no. 3, pp. 7036–7056, 2023. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i3.6690

[18] A. Fonseca Cascante, "El uso de las TIC como recursos pedagógicos-metodológicos en el proceso de formación del estudiantado universitario del siglo XXI," Revista Ensayos Pedagógicos, pp. 13–33, 2021. https://doi.org/10.15359/rep.esp-21.1

[19] M. S. Ojeda Carrillo, "Análisis multidimensional de la brecha digital: obstáculos del desarrollo humano en Venezuela," Prohominum, vol. 6, no. 3, pp. 49–59, 2024. https://doi.org/10.47606/ACVEN/PH0260

[20] M. H. Napitupulu, A. Muddin, B. Bagiya, S. Diana, and N. S. Rosyidah, "Teacher professional development in the digital age: Strategies for integrating technology and pedagogy," Global International Journal of Innovative Research, vol. 2, no. 10, 2024.

[21] UNESCO, "Transforming education with digital learning," 2023. https://www.unesco.org/sdg4education2030/en/articles/transforming-education-digital-learning

[22] R. Peng, R. Abdul Razak, and S. Hajar Halili, "Factors influencing in-service teachers' technology integration model: Innovative strategies for educational technology," PLoS ONE, vol. 18, no. 8, e0286112, 2023. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0286112

[23] D. Yılmaz Ergül and F. Taşarb Mehmet, "Development and validation of the teachers' digital competence scale (TDiCoS)," Journal of Learning and Teaching in Digital Age, vol. 8, no. 1, pp. 148–160, 2023.

[24] R. Rojas Cabello, "Actitud de los docentes al usar TICs," Revista Educación Las Américas, vol. 14, no. 1, 2025. https://doi.org/10.35811/rea.v1i1.354

[25] F. S. Veliz-Huanca, "Desafíos y oportunidades en la alfabetización digital de los docentes: una revisión sistemática," Revista Tribunal, vol. 4, no. 9, pp. 403–423, 2024. https://doi.org/10.59659/revistatribunal.v4i9.86

[26] B. Jaime-Manzanarez, "La formación continua en la educación: evolución, modelos y competencias digitales," Revista Científica de Estudios Sociales, vol. 3, no. 5, pp. 87–106, 2024. https://doi.org/10.62407/rces.v3i5.137

XAI aplicada ao processamento de linguagem natural: uma perspectiva do usuário

XAI in Natural Language Processing: A User Perspective

Jaqueline B. M. Teixeira
Departamento de Matemática e Computação (DMC)
Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Presidente Prudente, Brasil
jbm.teixeira@unesp.br

Danilo Medeiros Eler
Departamento de Matemática e Computação (DMC)
Universidade Estadual Paulista (UNESP)
Presidente Prudente, Brasil
danilo.eler@unesp.br

***Resumo* — O crescente uso da inteligência artificial por não especialistas da área gera questionamentos quanto à confiabilidade, à responsabilização e à compreensão das decisões tomadas por meio desses sistemas. Para lidar essas questões, foram desenvolvidos métodos para explicar a engenharia por trás dos modelos, conhecidos como Inteligência Artificial Explicável (XAI). Embora esses métodos pareçam oferecer uma solução promissora, ainda é necessário compreender se eles funcionam de forma eficaz em aplicações reais. Assim, realizamos um estudo com usuários que demonstrou que, apesar de as explicações serem compreensíveis, ainda permanecem dúvidas que podem ser reduzidas por meio de instruções associadas às visualizações explicativas.**

***Palavras Chave* – visualização; inteligência artificial explicável; processamento de linguagem natural.**

***Abstract* — The increasing use of artificial intelligence by non-experts raises questions regarding the reliability, accountability, and understanding of the decisions made by these systems. To address these issues, methods have been developed to explain the underlying engineering of the models, known as Explainable Artificial Intelligence (XAI). Although these methods appear to offer a promising solution, it is still necessary to understand whether they are effective in real-world applications. Thus, we conducted a user study that showed that, although the explanations are understandable, some questions still remain and can be reduced through instructions associated with the explanatory visualizations.**

Keywords – visualization; explainable artificial intelligence; natural language processing.

I. Introdução

Diante do auge da Inteligência Artificial (IA), da Aprendizagem de Máquina e do uso mais recente de *Large Language Models* (LLMs), é possível notar a crescente importância que algoritmos de alta complexidade assumem no dia a dia da sociedade. Esses sistemas estão cada vez mais presentes em diferentes aplicações, apoiando processos de tomada de decisão e automatizando tarefas em diversos setores. Porém, a necessidade de compreender os motivos dos resultados apresentados por esses algoritmos torna-se cada vez mais evidente, especialmente devido ao seu uso em ambientes de alta responsabilidade, como hospitais, bancos e sistemas de segurança. Nesses contextos, a falta de transparência pode gerar desconfiança, dificultar a validação das decisões automatizadas e levantar questionamentos sobre responsabilidade e confiabilidade.

Além disso, observa-se uma tendência global de reconhecimento da necessidade e do direito do usuário em compreender como decisões automatizadas baseadas em IA são produzidas. Na Europa, essa preocupação é refletida no Regulamento Geral de Proteção de Dados (GDPR) [1], que estabelece princípios relacionados à transparência e à explicabilidade no processamento de dados pessoais. Também no Brasil, é necessário estar em conformidade com a Lei Geral de Proteção de Dados (LGPD) [2], segundo a qual o controlador de dados deve fornecer informações sobre os critérios e procedimentos utilizados no processamento de dados. Essas regulamentações evidenciam a crescente demanda por mecanismos que permitam tornar sistemas baseados em IA mais transparentes e compreensíveis para os usuários. Nesse contexto, torna-se fundamental o desenvolvimento de abordagens que possibilitem explicar como modelos computacionais chegam a determinados resultados.

Embora existam artigos que distingam termos como interpretabilidade, explicabilidade, compreensibilidade e inteligibilidade [3] [4], neste artigo tratamos como termos intercambiáveis. *Explainable Artificial Intelligence* (XAI), ou Inteligência Artificial Explicável surgiu com a intenção de sanar essa necessidade, sendo um conjunto de métodos que permitem que o usuário final consiga entender o motivo do resultado obtido pela IA. De acordo com [3], há quatro razões para uso da XAI: justificativa, controle, melhoria e descoberta; isto é, a XAI pode ser usada para fundamentar uma decisão, para prevenir erros, melhorar modelos e encontrar novos elementos.

Realizamos um levantamento na plataforma IEEE considerando os metadados disponíveis e os termos *Explainable Artificial Intelligence*, *Explainable AI* e XAI. Os resultados indicam a existência de trabalhos que abordam o tema desde 2004. Nesse contexto, [5] propõem uma metodologia de projeto que permite a visualização do funcionamento do sistema durante a criação de um conjunto de regras adaptativas, possibilitando a auditoria do processo.

A Figura 1 ilustra uma trajetória de crescimento da temática de explicabilidade, considerando os três termos citados anteri-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

ormente nos títulos das publicações. Nos anos de 2018, 2019 e 2020 não houve ao menos 40 publicações por ano. Já em 2021, a quantidade de publicações é de aproximadamente 100, dobrando para cerca de 200 em 2022. O número de publicações salta para aproximadamente 350 em 2023, atinge cerca de 800 em 2024 e em 2025 superam a marca de 1200 registros. Essa trajetória ascendente evidencia o interesse e a expansão do assunto Inteligência Artificial Explicável, sendo de suma importância dentro da comunidade técnica e científica.

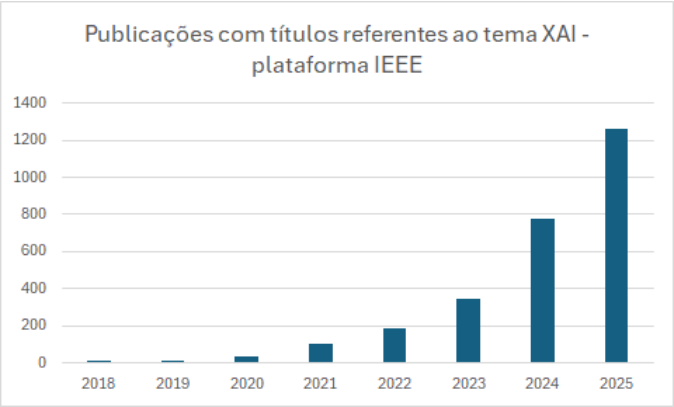


Figura 1. Publicações relacionadas com Inteligência Artificial Explicável (XAI) na plataforma IEEE de 2018 a 2025

Em [4], os autores abordam o tema por meio de uma revisão das principais aplicações de XAI em aprendizagem supervisionada. Em seu estudo, destacam a necessidade de que as explicações das decisões dos modelos permitam a formulação de hipóteses e o desenvolvimento de raciocínio por parte dos usuários, integrando assim processos de aprendizado e interpretação. Além das ambiguidades presentes nas nomenclaturas da área, os autores também apontam a escassez de métricas de interpretabilidade baseadas na perspectiva do usuário, o que reforça a relevância de estudos conduzidos diretamente com o usuário final, como o apresentado neste trabalho.

No trabalho apresentado por [6], os autores apontam quatro métodos de explicação aplicados no campo Processamento de Linguagem Natural (PLN), similar ao que usamos neste artigo. Cada método de explicação, que no artigo foi gerada por meio de uma RNN, tem uma função específica. Os métodos baseados em regras auxiliam no entendimento das decisões da IA, baseados em visualização permite a visualização do processo de decisão da IA, baseado em transparência torna o modelo de IA transparente para o usuário e uma explicação interativa que envolve o usuário no processo de explicação. Assim, contribui ao nosso ideal de trabalhar com usuário.

Este trabalho visa estudar os efeitos reais para o usuário da *Explanaible Artificial Intelligence* (XAI) aplicada em algoritmos de Análise de Sentimentos com diferentes tipos de abordagens, possibilitando a investigação dos métodos XAI adotados, usando avaliações qualitativas e quantitativas fornecidas pelos usuários. Para isso, conduzimos um estudo com usuários a fim de avaliar a interpretação de visualizações explicativas associadas a modelos de aprendizado de máquina. Os resultados indicam que, embora as explicações sejam geralmente compreensíveis, ainda persistem dúvidas sobre o funcionamento e as decisões do modelo. Dessa forma, este trabalho contribui com evidências empíricas sobre o uso de XAI e aponta para a importância de combinar visualizações explicativas com suporte instrucional para melhorar a compreensão das explicações.

II. Análise de sentimento

Atualmente, temos visto um grande interesse quanto a subárea de Processamento de Linguagem Natural (PNL) conhecida como Geração da Linguagem Natural. Entretanto, antes é necessário entender a linguagem natural, passando pelas suas etapas morfológicas, léxicas, sintáticas, semânticas e outras. Por meio dessas etapas é possível identificar em textos sentimentos que podem ser classificados como positivos, negativos e em alguns casos neutros, e esse ramo chamamos de Análise de Sentimento.

Embora existam diversas classificações quanto aos algoritmos de análise de sentimento, [7] listam em sua pesquisa diferentes abordagens de para análise de sentimento: léxica, *machine learning* (utilizando aprendizado supervisionado como a classificação ou não supervisionado como o agrupamento para obter a intenção no texto), híbrida (combina técnicas léxica e de *machine learning*), rede neural, aprendizagem por transferência, análise multimodal e baseada em aspectos

Em sua pesquisa, [8] desenvolveram um modelo de análise de sentimento por meio de uma combinação de métodos qualitativos e quantitativos, cujo foco é o bom funcionamento para textos de mídias sociais, sem a exigência de treinamento prévio. Além das características lexicais, os autores associaram o estudo gramático e sintático para aplicar intensidade ao sentimento, retornando um score de polaridade das palavras que formam a frase.

Um destaque na aprendizagem por transferência é o modelo *Bidirectional Encoder Representations from Transformer* (BERT) [9] que passa por duas etapas: pré-treino e ajuste fino. A partir de parâmetros pré-treinados, o modelo é treinado com tarefas posteriores ajustando todos os parâmetros. O diferencial se deve as representações bidirecionais empregadas no pré-treino que culminaram no aumento de performance mesmo em nível de frase ou *token*.

A. *Paralinguística*

Segundo [10], a linguagem de internet norteia os esforços da análise de sentimento para entender o texto com auxílio da classificação gramatical das palavras (por exemplo, advérbios e adjetivos) e palavras paralinguísticas (gírias, *emojis*, *hashtags*). Tais elementos ajudam a fornecer contexto como realce e tom utilizado.

[11] mostram que apesar dos emojis serem amplamente utilizados em qualquer plataforma da internet, os mesmos trazem desafios para análise de sentimento: cada plataforma utiliza tipos de emoji diferentes, constantemente são criados novos emojis, a intenção original pode mudar (devido a cultura, contexto social e preferência do usuário), a percepção em relação ao sentimento pode ser intensificada ou até mesmo invertida e por fim, há certa dificuldade em identificar sarcasmo/ironia por emojis.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

III. Explicabilidade em IA

Em sua pesquisa, [3] atribui o termo XAI à [12], usado inicialmente em jogos para explicar o comportamento de entidades controladas por IA. Atualmente, a IA explicável serve de apoio à transparência e responsabilização das decisões tomadas por meio dos algoritmos não inteligíveis.

Neste contexto, devemos considerar a abrangência da explicação e como ela é gerada. A abrangência pode ser local (explicação para uma predição individual) ou global (explicação para o comportamento do modelo por completo, como ele "pensa"). Por sua vez, o modo de explicação, pode ser intrínseca, isto é, com base no modelo de IA utilizado ou *post-hoc* que independem do modelo utilizado.

Temos duas principais técnicas de explicabilidade de IA amplamente difundidas: LIME e SHAP.

A. LIME

Local Interpretable Model-agnostic Explanations (LIME), desenvolvido por [13] é a técnica que aprende modelo interpretável localmente em torno da previsão. A explicação produzida por LIME segue a Equação 1, sendo g o modelo e G a classe de modelos potencialmente interpretáveis, f sendo a probabilidade (ou um indicador binário) de x pertencer a uma determinada classe, π é uma medida de proximidade para definir a localidade em torno de x e $\Omega(g)$ como uma medida de complexidade da explicação. O objetivo é minimizar $\mathcal{L}(f, g, \pi_x)$, que mede quão infiel é o modelo em relação ao local.

$$\xi(x) = \underset{g \in G}{argmin}\ \mathcal{L}\left(f, g, ¿x\right) + \mathcal{©}(g) \tag{1}$$

B. SHAP

[14] propuseram um *framework* para interpretar as predições, o *SHapley Additive exPlanations*, ou simplesmente SHAP. A ideia consiste em calcular o valor de importância para cada característica de uma previsão específica. A abordagem apresentou além de uma solução única exclusiva, três propriedades antes desconhecidas nos métodos do mesmo tipo (atribuição de características aditivas): precisão local, e consistência. Assim, matematicamente, SHAP segue a Equação 2 que procede de resultados combinados da teoria dos jogos cooperativos, ou seja, valores de Shapley (Φ_i).

$$\Phi_i\left(f, x\right) = \sum_{z' \subseteq x'} \frac{|z'|!\left(M - |z' - |1\right)!}{M!}\left[f_x(z) - f_x(z'/i)\right] \tag{2}$$

em que $|z'|$ é o número de entradas não nulas em z', e $z' \subseteq x'$ representa todos vetores z' em que as entradas não nulas são subconjuntos das entradas não nulas em x.

Outro ponto a ser considerado é a forma de saída fornecida ao usuário. Muitas vezes a explicabilidade vem por meio de gráficos, "marcações" textuais ou em imagens, ou até mesmo gráficos interativos. Porém, notamos a utilização de LLM na geração de texto explicativos [15], criando assim uma explicação mais próxima do entendimento humano.

IV. Metodologia

Apesar da pesquisa de [16] mostrar que os conceitos intercambiáveis e por vezes ambíguos de explicabilidade ainda devam ser explorados. Os autores também apontam que a explicabilidade não é boa por si mesma, devendo analisar os diferentes cenários e perfis (usuários) a qual está destinada. Reforçando que a área XAI ainda necessita de estudos que delimitem seu sentido e necessidade, visto que a mesma não produz o mesmo "efeito" quando aplicada em diferentes contextos, podendo gerar enganos ao usuário. Essa pesquisa impulsiona o que propomos neste artigo, visto que almejamos analisar as ideias de diferentes perfis e como eles se comportam e entendem a XAI em cenários igualmente expostos a todos.

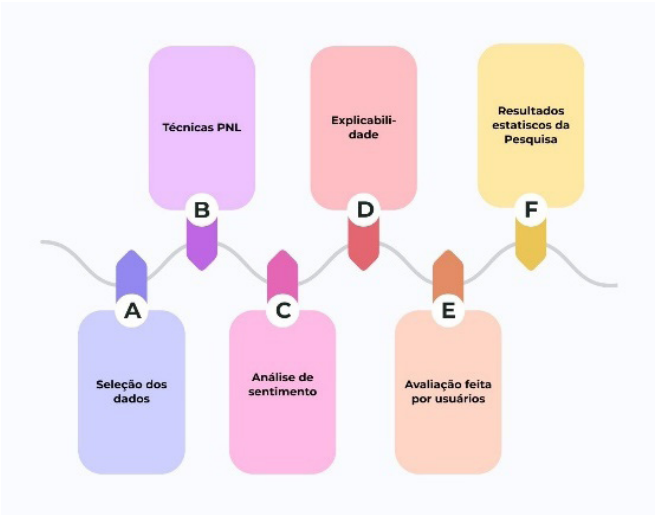


Figura 2. Fluxo de desenvolvimento da pesquisa

Conforme mostra a Figura 2, nossa pesquisa focou em seis etapas: (A) Seleção de Dados, (B) Aplicação técnicas de PLN, (C) Uso de algoritmos de Análise de Sentimento, (D) Aplicação de método XAI (E) Coleta da opinião do Usuário (F) Estudo dos dados estatísticos e pesquisa.

A. Selecão de Dados

Nesta etapa selecionamos dados com Linguagem Natural. Foram adquiridos comentários de diversos aplicativos presentes na plataforma *Google Play*, e dentre eles foram selecionados os aplicativos: *Amazon*, *eBay*, *Meeting*, *Mercado Libre*, *Sephora*, *Talk*, *Teams*, *Zoom* e *Wish*. Estes comentários estão na língua inglesa e possuem características de linguagem de Internet, como *emojis*.

B. Aplicação de Técnicas PLN

Lidamos com o tratamento dos textos, assim, o conjunto de dados passou por uma etapa de limpeza de dados, transformação de *emojis* em palavras ou sentenças, remoção de *stop words*.

C. Uso de algoritmos de Análise de Sentimento

Trabalhamos com algoritmos de análise de sentimento, por meio de técnicas de *machine learning* supervisionadas e não supervisionadas, aprendizagem por transferência e como:

- BERT [9]: método de aprendizagem por transferência, que não necessita de grande quantidade de dados, além de ser amplamente utilizado.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

- VADER [8]: Técnica com base léxica que parte de um conjunto de palavras pré-pontuadas para calcular o valor (positivo, negativo) de um texto;
- K-means [17]: Técnica de *machine learning* que realiza agrupamento de itens (comentários) baseado na distância das palavras existentes.

Embora análise de sentimentos por aspecto seja frequentemente utilizada em contexto de avaliações de produtos (semelhante ao contexto deste artigo), a mesma apresenta muitos desafios e alta complexidade, não sendo o foco deste trabalho.

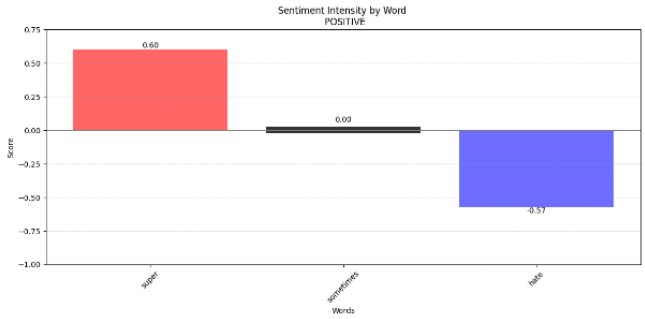


Figura 3. Exemplo de explicação relacionada ao VADER [8]

D. *Aplicação dos métodos XAI*

Utilizamos dois métodos para extrair a explicação dos algoritmos de análise de sentimento:

- VADER [8]: Alguns algoritmos possuem explicabilidade inerentes a eles. Ao gerar a análise de sentimento, também fornecem pontuações que o explicam. Em nossa pesquisa, conforme Figura 3, tais pontuações foram exibidas em gráficos de barras, devido sua ampla disseminação.
- SHAP [14]: possui comportamento *post-hoc* e multifuncional, podendo ser utilizado para vários modelos de maneira local ou global. Vemos um exemplo de sua aplicação no projeto na Figura 4.

E. *Coleta da opinião do Usuário*

Por meio de exposição do usuário aos resultados visuais gerados pelos métodos XAI, foi realizado um questionário que contou com questões que abordam tanto conhecimentos prévios de língua, e contexto, quanto entendimento do que foi apresentado e diferenciações observadas pelo usuário.

F. *Análise estatística*

Com base nos resultados da pesquisa realizada na etapa anterior, foram realizados alguns levantamentos estatísticos que dão embasamento para as nossas conclusões.

V. RESULTADOS

Apresentamos 4 exemplos de frases (em inglês) no questionário realizado com o usuário:

- Exemplo 1: "*awesome app. does exactly what the full website does.*"
- Exemplo 2: "*super but sometimes i hate this*"
- Exemplo3: "*love this app!! (and makeup!!😉)*"
- Exemplo 4: "*really disappointed with the last update - searching and filtering is now much more cumbersome. every time you select a filter it takes you back to the results whereas you used to be able to select multiple filters at once then apply them all. also now you can only select one filter option for some categories - for example instead of searching for shoes with two ranges of heel heights you can only select one at a time. this is going backwards - not an improvement.*"

De acordo com a Figura 5, a fase de avaliação ocorreu com usuários que possuem diferentes níveis de entendimento sobre XAI, para averiguar se há diferença na avaliação entre eles. Desse modo, o grupo com entendimento intermediário representa a maioria absoluta, com 57,1%, básico compreende 21,4% avançado com 14,3% e proficiente em menor parcela, com 7,1%. Os usuários em questão possuem um conhecimento prévio considerável sobre o tema, já que mais de 78% dos entrevistados se situam entre os níveis intermediário ou mais, e nenhum participante declarou desconhecimento total sobre o assunto.

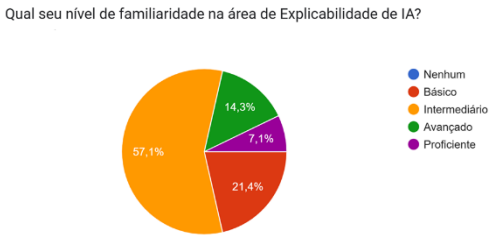


Figura 5. Nível de conhecimento do usuário sobre XAI

Outro fator importante a ser analisado é o fato da língua analisada não ser a língua materna dos usuários, ou seja, os trechos analisados estão em língua inglesa e não em língua portu-

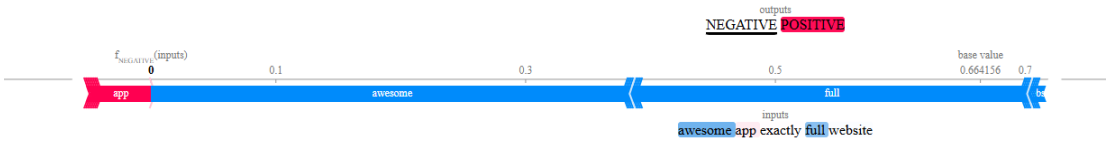


Figura 4. Exemplo de explicação SHAP [14]

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

guesa. Todos os participantes possuem algum nível de conhecimento no idioma. A Figura 6 mostra a seguinte distribuição: Proficiente (35,7%), de modo que a maior parte do grupo possui domínio pleno do idioma. Básico e intermediário (28,6% cada). Avançado (7,1%). No geral, mais de 71% dos usuários possuem compreensão intermediária ou mais da língua inglesa.

A Figura 7 mostra que a orientação textual apresentada antes da XAI impactou. "Ajudou totalmente" é a percepção majoritária, correspondendo a 57,1 %. "Ajudou um pouco" representa 35,7%. "Nem atrapalhou e nem ajudou" constitui 7,1%. Já as categorias negativas: "Atrapalhou um pouco" e "Atrapalhou totalmente" não possuem representação. A ideia de que a orientação auxiliou o processo atingem 92,8%.

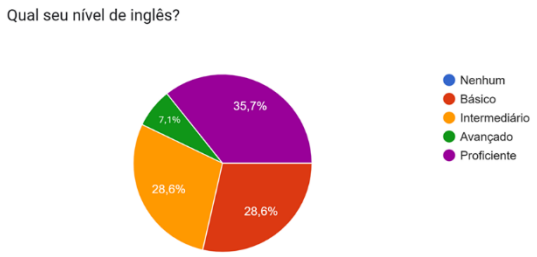


Figura 6. Proficiência dos usuários em Língua Inglesa

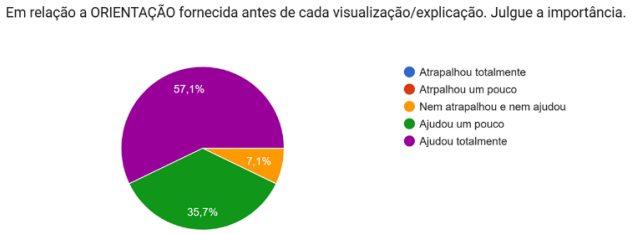


Figura 7. Importância da orientação prévia às visualizações

Os usuários também compararam os métodos de explicação, utilizando pontuação de 1 a 5 estrelas para 4 exemplos apresentados, conforme apresentado na Tabela I. Ainda que ambos possuam pontuação aproximadas, levantamos como hipótese a melhor avaliação do método VADER devido a ser exibido de um modo mais usual. Outro fator é a complexidade apresentada no texto, visto que os exemplos 1, 2 e 3 são frases curtas, enquanto no exemplo 4 temos um parágrafo.

Tabela I. Avaliação dos métodos XAI

Item	**Métodos XAI**	
	SHAP	**VADER**
Exemplo 1	3.57	4.43
Exemplo 2	4.07	4.50
Exemplo 3	3.93	4.64
Exemplo 4	4.36	4.00
Média	**3.98**	4.39

VI. Conclusões

Diante da crescente adoção de sistemas de Inteligência Artificial em diferentes contextos da sociedade, especialmente em aplicações que envolvem processos de tomada de decisão, torna-se cada vez mais importante compreender como os resultados produzidos por esses sistemas são interpretados pelos usuários. Essa necessidade é reforçada tanto pela complexidade dos modelos atuais, como aqueles baseados em Aprendizagem de Máquina e *Large Language Models*, quanto pelas demandas por transparência e explicabilidade estabelecidas por regulamentações como o GDPR e a LGPD. Nesse contexto, abordagens de Inteligência Artificial Explicável (XAI) têm sido propostas como forma de tornar o funcionamento desses modelos mais compreensível. Assim, neste trabalho investigamos, por meio de um estudo com usuários, como explicações baseadas em visualizações são interpretadas e quais fatores podem influenciar a compreensão dessas explicações por usuários não especialistas.

Os resultados indicam que, embora os usuários consigam compreender a justificativa fornecida pelo método de XAI, eles demonstram maior segurança em sua interpretação quando o modo de leitura da explicação é previamente apresentado. Esse resultado sugere duas possíveis interpretações: (1) os usuários podem carecer de conhecimento prévio sobre como interpretar determinadas visualizações explicativas, indicando a necessidade de maior difusão e ensino desses métodos; ou (2) sistemas de XAI podem se beneficiar da oferta de múltiplas formas de explicação para apoiar diferentes perfis de usuários. Dessa forma, para reduzir essa lacuna de compreensão, sistemas explicáveis poderiam combinar diferentes estratégias de comunicação, como visualizações gráficas, explicações interativas e descrições textuais, permitindo que os usuários interpretem as decisões do modelo com maior confiança.

Agradecimentos

O presente trabalho foi parcialmente financiado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES)

Referências Bibliográfica

[1] Sovrano, F., Vitali, F., Palmirani, M., et al. (2019). The difference between explainable and explaining: requirements and challenges under the gdpr. In CEUR workshop proceedings, volume 2681, pages 1–11. CEURWS. org.

[2] Brasil (2018). Lei nº 13.709, de 14 de agosto de 2018. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, ano 155, n. 157, p. 59, 15 ago. 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Access em: 01/20/2026.

[3] Adadi, A. and Berrada, M. (2018). Peeking inside the black- box: A survey on explainable artificial intelligence (xai). IEEE Access, 6:52138–52160.

[4] Došilović, F. K., Brčić, M., & Hlupić, N. (2018). Explainable artificial intelligence: A survey. In 2018 41st In- ternational Convention on Information and Communi- cation Technology, Electronics and Microelectronics (MIPRO), pages 0210–.

[5] Keeley, T. (2004). Keel technology applied to highly dis- tributed loosely coupled systems. In Eighth IEEE In- ternational Symposium on High Assurance Systems Engineering, 2004. Proceedings., pages 300–301.

[6] Xu, Q., Feng, Z., Gong, C., Wu, X., Zhao, H., Ye, Z., Li, Z., and Wei,

C. (2024). Applications of explainable ai in natural language processing. Global Academic Frontiers, 2(3):51–64.

[7] Wankhade, M., Rao, A.C.S. & Kulkarni, C. A survey on sentiment analysis methods, applications, and challenges. *Artif Intell Rev* **55**, 5731–5780 (2022).

[8] Hutto, C. and Gilbert, E. (2014). Vader: A parsimonious rule-based model for sentiment analysis of social media text. In Proceedings of the international AAAI conference on web and social media, volume 8, pages 216–225.

[9] Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019, June). Bert: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In Proceedings of the 2019 conference of the North American chapter of the association for computational linguistics: human language technologies, volume 1 (long and short papers) (pp. 4171-4186).

[10] Pozzi, F. A., Fersini, E., Messina, E., & Liu, B. (2016). *Sentiment analysis in social networks*. Morgan Kaufmann.

[11] Grover, V. Exploiting Emojis in Sentiment Analysis: A Survey. *J. Inst. Eng. India Ser. B* 103, 259–272 (2022). https://doi.org/10.1007/s40031-021-00620-7

[12] van Lent, M., Fisher, W., and Mancuso, M. (2004). An ex- plainable artificial intelligence system for small-unit tactical behavior. In Proceedings of the 16th Con- ference on Innovative Applications of Artifical Intel- ligence, IAAI'04, page 900–907. AAAI Press.

[13] Ribeiro, M. T., Singh, S., and Guestrin, C. (2016). "Why should i trust you?" explaining the predictions of any classifier. In Proceedings of the 22nd ACM SIGKDD international conference on knowledge discovery and data mining, pages 1135–1144.

[14] Lundberg, S. M. and Lee, S.-I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. Curran Associates, Inc.

[15] Paraschou, E., Arapakis, I., Yfantidou, S., Macaluso, S., and Vakali, A. (2025). Mind the xai gap: a humancentered llm framework for democratizing explainable ai. In World Conference on Explainable Artificial Intelligence, pages 113–137. Springer.

[16] Alpsancar, S., Buhl, H. M., Matzner, T., and Scharlau, I. (2025). Explanation needs and ethical demands: unpacking the instrumental value of xai. AI and Ethics, 5(3):3015–3033.

[17] Lloyd, S.P. (1957) Least Square Quantization in PCM. IEEE Transactions on Information Theory, 28, 129-137.

Uma Arquitetura para Gerenciamento Automatizado de Eventos de TI em Governos Municipais: Integrando ITIL 4, Zabbix, um Mecanismo de Inferência Fuzzy e GLPI

An Architecture for Automated IT Event Management in Municipal Government: Integrating ITIL4, Zabbix, a Fuzzy Inference Engine, and GLPI

Luiz Carlos Garanhani Junior, Felipe Dias Abrahão,
Vanessa Tavares de Oliveira Barros, Rodolfo Miranda de Barros
Departamento de Ciência da Computação
Universidade Estadual de Londrina (UEL)
Londrina, Brasil
jr.sobral@hotmail.com, yousoro.felipe.asteroid@uel.br, vanessa@uel.br, rodolfo@uel.br

***Resumo* — A transformação digital nos municípios brasileiros tem ampliado a oferta de serviços públicos digitais em ambientes distribuídos e frequentemente pouco integrados, nos quais limitações de monitoramento comprometem a visibilidade ponta a ponta, a continuidade e a confiabilidade dos serviços. Nesse contexto, a ausência de mecanismos automatizados de Monitoração e Gerenciamento de Eventos de TI (MGE) dificulta a classificação consistente da criticidade e aumenta a dependência de triagem manual. Este artigo apresenta um mecanismo de inferência fuzzy configurável, implementado em Python e integrado ao Zabbix e ao GLPI, para apoiar a classificação contextual da criticidade de eventos com base em impacto e urgência. O artefato fundamenta-se na gestão de eventos do ITIL 4, na teoria dos conjuntos fuzzy e no arcabouço metodológico da Design Science Research (DSR), seguindo a metodologia de seis etapas descrita em [1]. O estudo compreende identificação do problema, definição de objetivos, modelagem do fluxo, implementação do protótipo e demonstração em ambiente municipal, com apoio de métricas históricas de MTTD e MTTR do período pré-implantação como referência exploratória. Os resultados da avaliação piloto, de caráter qualitativo, indicam viabilidade técnica do mecanismo, capacidade de classificação automatizada da criticidade e integração funcional com o ciclo de tratamento de tickets, com fortalecimento da rastreabilidade e redução de intervenções manuais nas etapas iniciais do processo. O trabalho contribui com um artefato configurável e modular para classificação e tratamento automatizado de eventos de TI em contextos institucionais complexos da administração pública..**

***Palavras Chave* - ITIL4; IT gerenciamento de eventos; inferência fuzzy; public sector IT.**

***Abstract* — Digital transformation in Brazilian municipalities has expanded the offering of digital public services in distributed and often poorly integrated environments, where monitoring limitations compromise end-to-end visibility, continuity, and service reliability. In this context, the absence of automated IT Event Monitoring and Management (EMM) mechanisms hinders the consistent classification of criticality and increases dependence on manual triage. This article presents a configurable fuzzy inference mechanism, implemented in Python and integrated with Zabbix and GLPI, to support the contextual classification of event criticality based on impact and urgency. The artifact is based on ITIL 4 event management, fuzzy set theory, and the Design Science Research (DSR) methodological framework, following the six-step methodology described in [1]. The study includes problem identification, objective definition, flow modeling, prototype implementation, and demonstration in a municipal environment, supported by historical MTTD and MTTR metrics from the pre-implementation period as an exploratory reference. The results of the qualitative pilot evaluation indicate the mechanism's technical feasibility, capacity for automated criticality classification, and functional integration with the ticket processing cycle, strengthening traceability and reducing manual interventions in the initial stages of the process. This work contributes a configurable and modular artifact for the automated classification and processing of IT events in complex institutional contexts of public administration.**

Keywords – ITIL4; IT event management; fuzzy inference; public sector IT.

I. Introdução

O gerenciamento de eventos em Tecnologia da Informação (TI) tornou-se um desafio estratégico em ambientes digitais cada vez mais complexos e dependentes de alta disponibilidade. A intensificação da transformação digital e a crescente interdependência entre sistemas críticos ampliam a necessidade de soluções de monitoração automatizada capazes de detectar, classificar e responder proativamente a eventos, com o objetivo de reduzir impactos operacionais e custos associados à indisponibilidade [2], [3].

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

No contexto da Administração Pública, especialmente no âmbito municipal, esse desafio é agravado pela expansão orgânica das infraestruturas de TI, pela morosidade dos processos de aquisição e pela ausência de instrumentos consolidados de gestão e governança digital, fatores que comprometem a continuidade e a confiabilidade dos serviços públicos digitais [4], [5].

Embora a literatura aponte benefícios do *framework* ITIL 4 para a eficiência e a qualidade dos serviços de TI [6], revisões recentes indicam a inexistência de abordagens integradas que articulem, de forma operacional, a monitoração, a classificação contextual de criticidade e o tratamento automatizado de eventos, especialmente em ambientes públicos com alta heterogeneidade tecnológica [7]. Além disso, permanece pouco explorado o uso de mecanismos configuráveis capazes de transformar sinais operacionais em decisões proporcionais de priorização, com base em impacto e urgência, sem dependência de limiares rígidos.

Diante desse cenário, este artigo desenvolve e demonstra um mecanismo de inferência Fuzzy configurável para classificação de criticidade de eventos de TI, integrado a uma arquitetura baseada em ferramentas *open source* de monitoração e gestão de serviços. A proposta busca apoiar decisões mais contextuais e auditáveis, reduzir intervenções manuais nas etapas iniciais do tratamento e fortalecer a rastreabilidade do ciclo operacional.

Neste estudo, considera-se evento de TI toda mudança detectável no estado de um ativo monitorado como serviço, *host*, enlace ou aplicação com potencial de impactar a continuidade operacional ou o cumprimento de acordos de nível de serviço, demandando registro, atualização ou encerramento de *ticket*. Assim, excluem-se do escopo ocorrências estritamente administrativas, sem efeito direto sobre a operação dos serviços de TI.

Com base nesse recorte, a questão de pesquisa que orienta este estudo é: "*Como projetar e demonstrar um mecanismo de inferência Fuzzy configurável para classificar a criticidade de eventos de TI, com base em impacto e urgência, no contexto da administração pública municipal?*"

A avaliação foi conduzida como piloto em ambiente segregado, alimentado com dados reais oriundos de uma secretaria municipal. Nesse contexto, além da classificação inicial, o modelo contempla mecanismos de *follow-up* automatizado, baseados na reavaliação do estado do ativo e na atualização correspondente do *ticket*, de modo a assegurar rastreabilidade do tratamento desde a detecção até o encerramento do evento..

II. Fundamentação teórica

Esta seção apresenta os conceitos e referências que sustentam a proposta de classificação automatizada da criticidade de eventos de TI por meio de um mecanismo de inferência Fuzzy configurável, integrado a ferramentas *open source* de monitoração e gerenciamento de serviços.

A. Governança e Gerenciamento de Serviços de TI: ITIL 4 e COBIT 2019

O ITIL 4 consolida boas práticas que integram pessoas, processos e tecnologias com o objetivo de elevar a eficiência, a qualidade e o valor gerado pelos serviços de TI [8]. Entre as 34 práticas descritas, o Gerenciamento de Eventos é particularmente relevante por permitir a detecção, análise e resposta a ocorrências capazes de comprometer a disponibilidade ou o desempenho dos serviços [6], [9], [10] [11]. No contexto deste estudo, o ITIL 4 fornece o referencial operacional para compreender a necessidade de identificar, classificar e tratar eventos de forma proporcional à sua criticidade.

A adoção do ITIL 4 em prefeituras, descrita em estudos recentes, evidencia a relevância do *framework* como modelo de referência para a estruturação de serviços de TIC na esfera pública [12].

Em complemento, o COBIT 2019 oferece diretrizes de mais alto nível voltadas à governança, ao controle, à auditoria e ao alinhamento estratégico dos processos de TI [13]. Embora ITIL e COBIT possam ser utilizados de forma complementar, este trabalho adota o ITIL 4 como referencial principal, por sua aderência ao gerenciamento operacional de eventos, enquanto o COBIT 2019 é considerado apenas como apoio conceitual para a dimensão de governança.

B. Monitoração Automatizada com Zabbix

O software livre Zabbix consolidou-se como uma solução de monitoramento de infraestrutura de TI de código aberto, amplamente utilizada em ambientes organizacionais complexos [14]. A plataforma permite a coleta de métricas em tempo real, o correlacionamento de eventos e a integração com sistemas externos por meio de API REST, viabilizando fluxos automatizados de tratamento de incidentes [15], [16].

C. Inferência de Criticidade por Lógica Nebulosa (Fuzzy)

A Lógica Nebulosa ou Fuzzy Logic (FL), proposta por [17], é um sistema matemático que lida com o conceito de "verdade parcial", superando as limitações da lógica booleana tradicional (verdadeiro/falso). Seu desenvolvimento teórico e a aplicação prática em sistemas de controle foram significativamente ampliados por [18] que detalhou os fundamentos matemáticos e as aplicações empresariais da teoria, e por [19], que focou na implementação prática de sistemas baseados em FL, elucidando a relação entre a lógica booleana e a abordagem nebulosa.

Diferentemente de classificações binárias (verdadeiro/falso), que forçam uma decisão categórica, a FL opera com o conceito de graus de pertinência. Este princípio define o quanto um elemento pertence a um conjunto ou categoria, representado por um valor contínuo entre 0 (não pertence) e 1 (pertence completamente). Por exemplo, um evento pode ter um "grau de pertinência" de 0,8 à categoria "alto impacto" e 0,6 à categoria "urgência média", capturando nuances que uma simples categorização "sim/não" ignoraria. Essa capacidade de modelar a incerteza e a subjetividade a torna extremamente eficaz para aplicações como análise de risco e priorização de incidentes [20], [21], [22]

D. A Matriz Multicritério

A priorização de eventos e incidentes em TI normalmente combina múltiplos critérios, especialmente impacto e urgência, conforme recomendado pelo ITIL 4 [8]. Modelos tradicionais baseados em matrizes categóricas utilizam limiares fixos para definição de prioridades, o que pode gerar transições abruptas entre níveis em situações de fronteira, reduzindo a sensibilidade do processo decisório [21], [22].

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

A literatura recente tem explorado a aplicação de abordagens multicritério associadas à Lógica Nebulosa para refinar esses modelos, permitindo transições mais suaves entre níveis de prioridade e maior aderência ao contexto operacional [23], [21]. Fundamentada em princípios consolidados de decisão multicritério [24], essa abordagem possibilita incorporar conhecimento especializado e promover decisões mais adaptativas e robustas no gerenciamento de eventos e incidentes.

E. Service Desk e GLPI como ITSM Open Source

O GLPI é uma suíte *open source* de Gerenciamento de Serviços de TI (ITSM) que integra funcionalidades como catálogo de serviços, registro de incidentes, Base de Dados de Gerenciamento de Configuração (CMDB) e gestão de relatórios de Acordos de Nível de Serviço (SLA). A ferramenta disponibiliza API REST com autenticação por *token* e suporte a *webhooks*, o que favorece sua integração com plataformas de monitoração e automação [25].

F. Idempotência e Deduplicação de Incidentes

O conceito de idempotência foi introduzido por [26] no contexto de arquiteturas REST, garantindo que múltiplas execuções de uma mesma operação produzam o mesmo estado final do sistema. [27] expandiu esse conceito para o domínio corporativo ao propor o padrão de Operação Idempotente, recomendando o uso de identificadores únicos para prevenir efeitos colaterais em execuções repetidas.

No contexto deste estudo, a idempotência é essencial para evitar a duplicidade de tickets em fluxos automatizados de gerenciamento de eventos, assegurando coerência entre a ocorrência monitorada e seu tratamento no sistema de ITSM.

III. Metodologia

Este estudo foi conduzido com base na abordagem Design Science Research (DSR), amplamente utilizada em pesquisas em Sistemas de Informação que buscam conceber, demonstrar e avaliar artefatos tecnológicos. Segundo [1], o ciclo DSR compreende seis etapas: (*i*) identificação do problema e motivação; (*ii*) definição dos objetivos da solução; (*iii*) design e desenvolvimento; (*iv*) demonstração; (*v*) avaliação; e (*vi*) comunicação. As etapas foram conduzidas de forma sequencial e iterativa.

Na fase de identificação do problema, observou-se que, no contexto da administração pública, ainda há carência de soluções automatizadas para o gerenciamento de eventos de TI que, além de integrar monitoração e tratamento, permitam classificar a criticidade dos eventos de forma contextual e configurável. Estudos recentes indicam que o gerenciamento de alertas e incidentes permanece amplamente manual e carece de arquiteturas que integrem todo o ciclo, do monitoramento à resolução [6], [10], [7]. O município base do estudo, classificado como de grande porte na categoria GP1A segundo [28], disponibiliza diversos serviços eletrônicos à população e executa um Plano Diretor de Tecnologia da Informação (PDTI) voltado ao amadurecimento da governança de TI. A validação do modelo ocorreu em ambiente de testes segregado, alimentado em tempo real por registros da infraestrutura produtiva de uma secretaria municipal de saúde, caracterizada por elevada demanda digital e requisitos rigorosos de continuidade operacional.

Na etapa de definição dos objetivos, orientada pelos princípios do ITIL 4 [8], estabeleceram-se como metas: (*i*) desenvolver um mecanismo de inferência Fuzzy configurável para classificar a criticidade de eventos com base em impacto e urgência; (*ii*) integrar esse mecanismo a ferramentas *open source* de monitoramento e gestão de serviços; (*iii*) apoiar decisões proporcionais, rastreáveis e passíveis de atualização ao longo do ciclo do evento; e (*iv*) demonstrar a viabilidade do artefato em ambiente municipal.

O design e desenvolvimento do artefato foi modelado em BPMN 2.0 [29], especificando as interações entre três componentes principais: (*i*) Zabbix, responsável pelo monitoramento em tempo real e envio de eventos; (*ii*) MIF, módulo central do artefato, que recebe o evento, aplica a matriz de criticidade 5x5 baseada em LF fundamentada em [17], [18][19] e em modelos de risco descritos por [20], [22] além de utilizar parâmetros configuráveis para impacto e urgência; e (*iii*) GLPI, acessado por API REST, que registra e/ou atualiza o ticket conforme a prioridade calculada. Para evitar duplicidade de *tickets*, o MIF aplica idempotência, mantendo um log dos eventos processados e descartando repetições subsequentes.

A demonstração do artefato foi conduzida em ambiente piloto segregado, alimentado por eventos provenientes de um ativo real de infraestrutura em operação na Secretaria municipal de saúde. Um cenário de interrupção e posterior restauração de conectividade foi processado integralmente pelo fluxo automatizado, permitindo verificar não apenas a abertura e o encerramento automático de *tickets*, mas também a reavaliação do estado do ativo e a atualização correspondente do registro ao longo do tratamento, sem exposição de dados sensíveis da infraestrutura produtiva.

A avaliação foi conduzida de forma qualitativa e comparativa, confrontando o fluxo automatizado com o cenário anterior baseado em registros manuais. Para estabelecer uma linha de base empírica preliminar, analisaram-se os 90 dias anteriores à implantação (15 de julho a 15 de outubro de 2025), período em que foram examinados 209 registros de incidentes. Desses, 160 apresentaram dados temporais completos para cálculo das métricas, resultando em um MTTD médio de 19,08 horas e um MTTR médio de 4,92 dias. Esses valores caracterizam um contexto operacional predominantemente reativo e foram utilizados como referência exploratória para avaliação inicial do artefato proposto, sem pretensão de generalização estatística. Nesta etapa, a avaliação não teve como objetivo comprovar ganhos quantitativos pós-implantação, mas verificar a viabilidade funcional do mecanismo, sua capacidade de classificação contextual, a rastreabilidade do fluxo e a coerência entre detecção, priorização e tratamento.

Por fim, a etapa de comunicação consistiu na sistematização dos procedimentos, resultados e lições aprendidas, contribuindo para a disseminação de abordagens automatizadas e inteligentes de gerenciamento de eventos de TI em diferentes contextos institucionais.

IV. Modelo de monitoração e gerenciamento de eventos

O modelo de MGE adotado neste estudo estrutura o tratamento dos eventos de TI em cinco etapas principais: (*i*) cole-

ISBN: 978-989-36481-2-4

ta de dados, (*ii*) correlação, (*iii*) classificação, (*iv*) priorização via matriz Fuzzy e (*v*) encaminhamento conforme prioridade em alinhamento as diretrizes do ITIL 4 para gerenciamento de eventos [8]. A representação completa desse fluxo, modelada em BPMN [29], já foi apresentada em trabalho anterior [30]. Neste artigo, esse modelo é retomado apenas como referência do contexto operacional em que se insere o artefato proposto.

A Fig. 1, apresenta uma visão sintética das etapas do MGE e destaca a lógica geral do processo. Com base nessa estrutura, o foco analítico deste trabalho recai sobre a automação do gerenciamento de eventos e, de modo particular, sobre o Motor de Inferência Fuzzy (MIF), componente responsável pela classificação contextual da criticidade dos eventos com base em impacto e urgência e pelo apoio ao tratamento automatizado no sistema de ITSM.

A representação visual do processo adota um esquema de cores seguro para melhorar a legibilidade e a distinção entre etapas sem comprometer a semântica do BPMN [31].

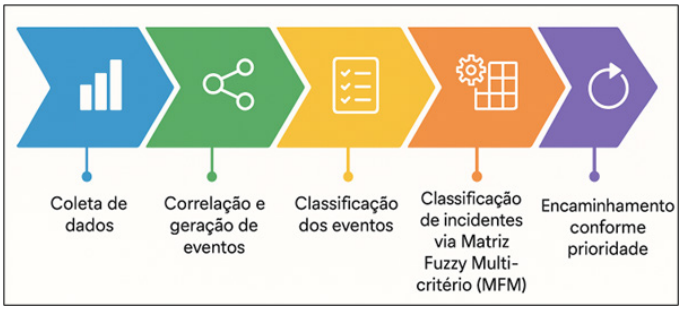


Figura 1. Etapas do modelo de Monitoração e Gerenciamento de Eventos

V. Automação do Gerenciamento de Eventos de TI

A automação do Gerenciamento de Eventos de TI foi concebida para viabilizar o controle integrado, escalável e auditável do ciclo de tratamento dos eventos. O modelo adota uma arquitetura modular composta por três componentes principais: Zabbix, Motor de Inferência Fuzzy (MIF) e GLPI, interligados por APIs RESTful. Essa arquitetura permite monitoração contínua, classificação contextual da criticidade e tratamento automatizado, reduzindo intervenções manuais e favorecendo maior consistência operacional. O ambiente de validação utilizou Zabbix 7.4, MIF desenvolvido em Python sobre Ubuntu 24.04 LTS e GLPI 10.0.19.

A. *Arquitetura Integrada do Sistema*

O ciclo operacional inicia-se com a detecção de eventos pelo Zabbix, responsável pela monitoração contínua dos ativos de TI. Os eventos identificados são encaminhados automaticamente ao MIF por meio de requisições HTTP POST, onde são validados, classificados quanto à criticidade e submetidos ao controle de duplicidade com base nas variáveis impacto e urgência. Após esse processamento, o evento é encaminhado ao GLPI, que realiza a abertura, atualização ou encerramento do *ticket*, conforme o resultado da classificação e o estado da ocorrência. Toda a comunicação entre os módulos ocorre por APIs REST, com *payloads* JSON e autenticação baseada em *token*, restrita à rede interna.

B. *Módulo de Monitoração: Zabbix*

O Zabbix atua como ponto de entrada do modelo, sendo responsável pela coleta contínua de métricas e pela detecção de eventos em ativos de infraestrutura, rede e aplicações. A identificação ocorre por meio de *templates* e *triggers* previamente configurados. Quando uma condição anômala é detectada, o sistema aciona um *webhook* customizado que extrai os dados relevantes do evento e os encaminha ao MIF por meio de API REST, permitindo a integração automática com as etapas subsequentes do fluxo.

C. *Módulo de Classificação Inteligente: Motor Fuzzy*

Para implementar o mecanismo de classificação automática de eventos proposto neste estudo, foi desenvolvido o MIF, componente responsável por intermediar a comunicação entre o sistema de monitoramento e a ferramenta de gestão de *tickets*, integrando a detecção de eventos à execução automatizada das ações de tratamento. A Fig.2, demonstra o funcionamento do MIF, ilustrando as etapas do fluxo, desde a ingestão do evento até o fechamento automatizado do *ticket*.

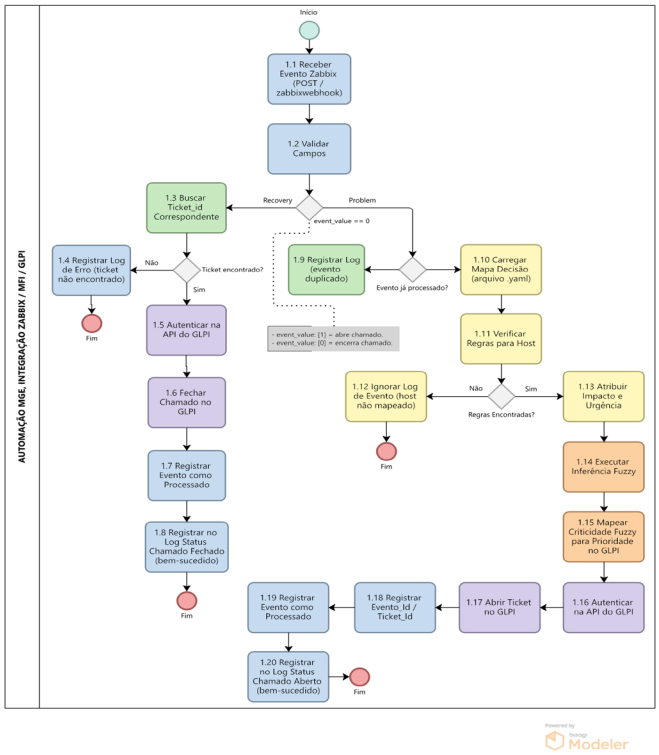


Figura 2. Azul claro = coleta/registro; Verde claro = correlação/controle; Amarelo claro = classificação/regras; Laranja claro = avaliação/priorização; Roxo claro = registro no MIF e no ITSM.

O MIF atua como *middleware* entre o Zabbix e o GLPI, recebendo eventos por meio de *webhooks*, realizando a validação e a normalização das informações e executando o processo de inferência Fuzzy. Os parâmetros utilizados na classificação de impacto e urgência são definidos em um arquivo de configuração externo que associa tipos de eventos e ativos monitorados aos respectivos critérios de avaliação, possibilitando ajustes dinâmicos sem necessidade de alteração do código-fonte.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

A classificação da criticidade é realizada por meio de uma Matriz Fuzzy Multicritério 5x5, na qual impacto e urgência são representados por cinco níveis linguísticos, variando de Muito Baixo a Muito Alto. A combinação desses critérios gera uma criticidade composta que orienta automaticamente a abertura ou atualização de *tickets* no GLPI, assegurando tratamento proporcional dos eventos e alinhamento às práticas de gerenciamento de eventos do ITIL 4 [20], [22].

D. Módulo de Gestão de Tickets: GLPI

No modelo proposto, o GLPI atua como sistema de ITSM responsável pelo registro, acompanhamento e rastreabilidade do ciclo de vida dos incidentes. Integrado ao MIF por meio de API REST autenticada, o GLPI recebe automaticamente os eventos classificados e registra os respectivos *tickets* com prioridade definida a partir da criticidade calculada. Essa integração padroniza o fluxo de atendimento, permitindo a criação, atualização e encerramento automático de registros conforme a evolução dos eventos monitorados. Adicionalmente, mecanismos de controle baseados em idempotência evitam a duplicidade de registros, enquanto o histórico de *tickets* do GLPI, combinado aos logs operacionais do MIF, assegura rastreabilidade das ações realizadas e reforça a transparência do processo.

VI. Discussão de resultados

A implantação piloto do MGE demonstrou viabilidade técnica ao integrar detecção automatizada (Zabbix), priorização contextual baseada em MIF e gestão de *tickets* (GLPI), em alinhamento com as práticas do ITIL 4. No ambiente avaliado, o modelo mostrou potencial para reduzir etapas manuais de triagem, favorecer a padronização do encaminhamento inicial dos eventos e diminuir a dependência de julgamento subjetivo nas decisões de priorização.

Em comparação ao cenário anterior, no qual a abertura e a priorização de *tickets* eram realizadas manualmente, observou-se que, no fluxo automatizado, a criação do registro ocorreu de forma praticamente imediata após a detecção do evento crítico, indicando viabilidade funcional da integração entre monitoração, classificação e tratamento. Embora a avaliação nesta fase piloto tenha sido qualitativa e restrita a um único contexto municipal, os achados são consistentes com estudos que associam automação a maior eficiência operacional e com trabalhos recentes que, em contexto municipal, também relatam a aplicação piloto de modelos baseados em ITIL 4 [32]

No que se refere à priorização, a adoção de inferência Fuzzy permitiu substituir severidades fixas por uma classificação contínua de criticidade baseada em impacto e urgência, ampliando a granularidade da decisão e reduzindo classificações abruptas em situações limítrofes. Além disso, a rastreabilidade foi fortalecida pela geração automática de evidências no MIF e no GLPI, compondo uma trilha de auditoria compatível com os requisitos da ISO/IEC 20000-1:2018. O fluxo também passou a contemplar reavaliação do estado do ativo e atualização correspondente do *ticket*, reforçando o acompanhamento do evento ao longo do tratamento. A arquitetura modular, desacoplada por APIs REST, mostrou-se flexível, permitindo ajustes nos parâmetros de decisão sem alteração do código-fonte. Ainda assim, aspectos como escalabilidade, segurança da integração e comportamento do modelo sob maior volume de eventos permanecem como pontos relevantes para investigação em etapas futuras.

VII. Limitações e trabalhos futuros

Apesar dos resultados promissores, o estudo apresenta limitações relacionadas ao seu escopo, uma vez que a validação foi conduzida em ambiente piloto, restrita a um único órgão municipal e baseada em conjunto reduzido de ativos monitorados. Além disso, a avaliação teve caráter qualitativo, não contemplando mensuração quantitativa pós-implantação nem análise aprofundada de aspectos como escalabilidade, segurança da integração e comportamento do modelo sob maior volume de eventos.

Como perspectivas futuras, destacam-se a parametrização assistida de impacto e urgência dos ativos, a autocalibração das funções de pertinência Fuzzy com base no histórico de *tickets* e o desenvolvimento de painéis executivos para monitoramento em tempo real de criticidade, volume de eventos e cumprimento de SLA. Também se mostram relevantes a ampliação da validação para outros contextos organizacionais e a realização de avaliações quantitativas em ambiente operacional, considerando o nível de maturidade institucional e os requisitos de governança.

VIII. Conclusões

Este trabalho apresentou um modelo de automação para MGE de TI que integra Zabbix, MIF e GLPI, automatizando o tratamento dos eventos desde a detecção até a atualização ou encerramento do *ticket*, em alinhamento com as práticas do ITIL 4. O protótipo funcional demonstrou viabilidade técnica em ambiente piloto e indicou que a inferência Fuzzy pode apoiar uma priorização mais contextualizada dos eventos do que abordagens baseadas em limiares fixos. Além disso, a arquitetura modular baseada em APIs REST e ferramentas *open source* mostrou-se adequada à integração entre monitoração, classificação e tratamento automatizado. Como trabalhos futuros, destacam-se a autocalibração dos parâmetros de decisão e a ampliação da validação em outros contextos organizacionais.

IX. Disponibilidade de dados e artefatos

Os conjuntos de dados, a planilha de métricas do sistema legado (MTTD e MTTR), os scripts de análise, os diagramas e os demais artefatos que sustentam o modelo de integração entre Zabbix, MIF e GLPI estão disponíveis em repositório aberto em: https://figshare.com/s/bfd647f9379b14c36dfc, com o objetivo de promover transparência, reprodutibilidade e suporte a futuras extensões da pesquisa.

X. Considerações éticas

Este estudo utilizou exclusivamente dados técnicos de infraestrutura de TI, coletados em ambiente piloto isolado (Zabbix e GLPI) e referentes a ativos reais em produção. Os registros foram anonimizados, não contêm dados pessoais e estão em conformidade com a LGPD (Lei 13.709/2018). Como não houve participação humana, não foi necessária submissão a Comitê de Ética em Pesquisa.

Agradecimentos

Durante a preparação deste manuscrito, os autores utilizaram a ferramenta de IA generativa ChatGPT: https://chatgpt.com, (acesso em março de 2026) exclusivamente para correções

gramaticais e ortográficas. Nenhum conteúdo foi inserido sem revisão humana crítica, e a ferramenta não foi utilizada para gerar ideias científicas, realizar revisões bibliográficas, criar figuras ou conduzir análises de dados. Os autores permanecem integralmente responsáveis pela originalidade e integridade de todas as seções deste trabalho.

Referências Bibliográfica

[1] K. Peffers, T. Tuunanen, M. Rothenberger, and S. Chatterjee, "A design science research methodology for information systems research," *Journal of Management Information Systems*, vol. 24, pp. 45–77, 2007.

[2] M. Mora and others, "The role of decision-making support systems in IT service management processes," *Intelligent Decision Technologies*, vol. 8, no. 2, pp. 147–163, 2014.

[3] D. Das, "A proactive event-management framework for cloud services," in *Proc. 12th IEEE Int. Conf. Cloud Comput.*, 2019, pp. 123–130.

[4] M. A. E. Araújo, "Gênios: Framework para Planejamento Visual de TI Utilizando Arquitetura Corporativa," Universidade Federal de Pernambuco, 2020. [Online]. Available: http://cin.ufpe.br/~posgraduacao

[5] E. Przeybilovicz, M. A. Cunha, and F. de S. Meirelles, "O uso da tecnologia da informação e comunicação para caracterizar os municípios: quem são e o que precisam para desenvolver ações de governo eletrônico e smart city," *Revista de Administração Pública*, vol. 52, no. 4, pp. 630–649, 2018, doi: 10.1590/0034-7612170582.

[6] J. B. Silva, M. A. Costa, and A. P. Oliveira, "ITIL 4 adoption in Brazilian public organizations: impacts on efficiency and service quality," *J. Inf. Syst. Public Admin.*, vol. 12, no. 1, pp. 25–40, 2020.

[7] Q. Yu *et al.*, "A survey on intelligent management of alerts and incidents in IT services," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 224, p. 103842, 2024, doi: 10.1016/j.jnca.2024.103842.

[8] Axelos, *ITIL ® Foundation ITIL 4 Edition*, 1st ed. Norwich, 2019.

[9] L. A. Costa, A. Fontão, and R. Santos, "PSECO-IM: An Approach for Incident Management to Support Governance in Proprietary Software Ecosystems," in *Anais Estendidos do XVIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI 2022)*, 2022, pp. 130–132. doi: 10.5753/sbsi_estendido.2022.222264.

[10] C. Sengik and G. Lunardi, "Benefits of ITIL-based service management in the Brazilian public sector," *iSys – Revista Brasileira de Sistemas de Informação*, vol. 16, no. 2, pp. 45–60, 2023.

[11] L. Topin, E. Borges, and L. Ribeiro, "Uma abordagem para adequação de serviços baseada em práticas da ITIL," in *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação (SBSI 2017)*, 2017, pp. 579–584. doi: 10.5753/sbsi.2017.6090.

[12] R. Miranda De Barros, V. T. De Oliveira Barros, and V. Mantovani, "A Performance and Capacity Monitoring Model based on ITIL 4: A case study applied in a City Hall."

[13] ISACA, *COBIT 2019 Framework: Governance and Management Objectives*. Rolling Meadows, IL, USA: ISACA, 2019.

[14] M. E. Melo, A. R. Almeida, L. F. Silva, and R. J. Souza, "Zabbix: Plataforma open source para monitoramento de infraestrutura de TI," *Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada*, vol. 6, no. 2, pp. 123–135, 2021.

[15] Zabbix LLC, "Zabbix Documentation 7.0," 2025.

[16] T. Reis, P. Leite, and R. Barros, "Implantação do Zabbix na UFAL Campus Arapiraca," in *Anais ERI-GO*, 2020.

[17] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.

[18] H. J. Zimmermann, *Fuzzy Set Theory—and Its Applications*, 4th ed. Boston: Springer, 2001.

[19] E. Cox, *The Fuzzy Systems Handbook*. Boston, MA: AP Professional, 1994.

[20] A. S. Markowski, M. S. Mannan, and A. Bigoszewska, "Fuzzy logic for process safety analysis," *J. Loss Prev. Process Ind.*, vol. 22, no. 6, pp. 695–702, 2009, doi: 10.1016/j.jlp.2008.11.011.

[21] L. V Olano and others, "Prioritization of incident management process using ITIL-fuzzy for informatics development sector of private universities," *Int. J. Fuzzy Logic Intell. Syst.*, vol. 25, no. 1, pp. 37–54, 2025, doi: 10.5391/IJFIS.2025.25.1.37.

[22] N. Tomak and F. Polat, "A fuzzy multi-criteria model for risk prioritization in incident management," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 168, p. 108030, 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108030.

[23] G. Pascarella and others, "Risk analysis in healthcare organizations: Methodological framework and critical variables," *Risk Manag. Healthc. Policy*, vol. 14, pp. 2897–2911, 2021, doi: 10.2147/RMHP.S309098.

[24] R. L. Keeney and H. Raiffa, *Decisions with Multiple Objectives: Preferences and Value Tradeoffs*. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.

[25] G. Project, "GLPI Documentation," 2025.

[26] R. T. Fielding, "Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures," University of California, Irvine, 2000. [Online]. Available: https://www.ics.uci.edu/~fielding/pubs/dissertation/top.htm

[27] M. Fowler, *Patterns of Enterprise Application Architecture*. Boston, MA: Addison-Wesley Professional, 2002.

[28] Ministério do Desenvolvimento e Assistência Social Família e Combate à Fome (MDS), "Sistema Único de Assistência Social (SUAS) – Gestão do SUAS e classificação de porte municipal," 2025.

[29] Object Management Group (OMG), "Business Process Model and Notation (BPMN), Version 2.0," 2011.

[30] L. C. Garanhani, M. de Sousa Galian, S. D. Tereza, V. T. de Oliveira Barros, and R. M. de Barros, "Structured Event Monitoring and Management Model with ITIL 4: Application and Maturity Diagnosis in a Municipal Public Agency," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 278, pp. 450–457, 2026, doi: https://doi.org/10.1016/j.procs.2026.03.012.

[31] C. A. Brewer, *Color Use Guidelines for Mapping and Visualization*. Elsevier, 1994.

[32] M. de Sousa Galian, J. E. Santana, F. D. Abrahão, V. T. de Oliveira Barros, and R. M. de Barros, "Design and Pilot Implementation of a Management Model for the Information and Communication Technology (ICT) Infrastructure and Platform Management (IPM) Practice in Municipal Public Administration," *Journal on Interactive Systems*, vol. 17, no. 1, pp. 193–213, 2026.

ISBN: 978-989-36481-2-4

YACHAY-SIG: Plataforma Geográfica Inteligente para el Fortalecimiento de la Vigilancia Epidemiológica del Cáncer

YACHAY-SIG: A Smart Geographic Platform for Strengthening Cancer Epidemiological Surveillance

Ricardo Timarán Pereira
Departamento de Sistemas
Universidad de Nariño
San Juan de Pasto, Colombia
ritimar@udenar.edu.co

Arsenio Hidalgo Troya
Departamento de Matemáticas y Estadística
Universidad de Nariño
San Juan de Pasto, Colombia
archi@udenar.edu.co

Luisa Bravo Goyes
Centro de Estudios en Salud CESUN
Universidad de Nariño
San Juan de Pasto, Colombia
lume.goyes@udenar.edu.co

Anivar Torres Chaves
Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional Abierta y a Distancia
San Juan de Pasto, Colombia
anivar.chaves@unad.edu.co

Fredy Vidal Alegría
Facultad de Ingeniería
I.U. Colegio Mayor del Cauca
Popayán, Colombia
fvidal@unimayor.edu.co

Ginna Leyton Yela
Doctorado en Ingeniería
Universidad del Valle
Cali, Colombia
ginnaleytony@gmail.com

***Resumen* — El cáncer constituye un desafío crítico para la salud pública en Pasto (Colombia), lo que exige sistemas de vigilancia epidemiológica con alta precisión geoespacial. Este artículo presenta el desarrollo de YACHAY-SIG, una plataforma de información geográfica diseñada para potenciar las capacidades analíticas del Registro Poblacional de Cáncer del Municipio de Pasto (RPCMP). El sistema permite la visualización multiescalar de la enfermedad a nivel de barrios, comunas, corregimientos y veredas. La metodología comprendió la migración de datos clínicos a una arquitectura relacional en PostgreSQL/PostGIS y la implementación de un motor de geocodificación especializado. Para abordar la baja estandarización de las direcciones residenciales, se desarrollaron procesos de normalización y validación mediante servicios de cartografía externa y la integración de un modelo de lenguaje de gran escala (LLM) para optimizar la precisión del vínculo con la base cartográfica oficial del DANE. Desarrollado con tecnologías web modernas, el sistema genera mapas dinámicos de calor, puntos y coropletas, permitiendo el filtrado avanzado por variables demográficas, clínicas y socioeconómicas. Los resultados demuestran que YACHAY-SIG transforma datos tabulares en inteligencia visual estratégica, revelando patrones espaciales de incidencia previamente imperceptibles. Esta herramienta se consolida como un soporte tecnológico fundamental para la optimización de la toma de decisiones y el diseño de políticas públicas de salud con un enfoque territorial preciso.**

***Palabras Clave* – Registros de Cáncer; Sistemas de Información Geográfica (SIG); Geocodificación; Análisis Espacial; Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLM).**

***Abstract* — Cancer represents a critical public health challenge in Pasto, Colombia, demanding epidemiological surveillance systems with high spatial precision. This paper presents the development of YACHAY-SIG, a geographic information platform designed to enhance the analytical capabilities of the Population-based Cancer Registry of the Municipality of Pasto (RPCMP). The system enables multiscale disease visualization across neighborhoods, districts, and rural areas.The methodology integrated the migration of clinical data to a relational architecture in PostgreSQL/PostGIS and the implementation of a custom geocoding engine to transform residential addresses into geographic coordinates. To address the low standardization of address data, normalization and validation processes were applied using external mapping services and the integration of a Large Language Model (LLM) to optimize spatial intersections with official DANE cartographic databases. Developed with modern web technologies, the system generates dynamic heat, point, and choropleth maps, incorporating advanced filters for demographic, clinical, and socioeconomic variables. The results demonstrate that YACHAY-SIG transforms tabular data into strategic visual intelligence, revealing previously imperceptible spatial incidence patterns. This tool establishes itself as an essential technological support for optimized decision-making and the design of territorial-based public health policies.**

Keywords – Cancer Registries; Geographic Information Systems (GIS); Geocoding; Spatial Analysis; Large Language Models (LLM).

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

ISBN: 978-989-36481-2-4

I. Introducción

A nivel global, el cáncer se consolida como una de las principales causas de morbilidad y mortalidad, impactando profundamente los indicadores de salud pública y exigiendo estrategias de vigilancia epidemiológica de alta precisión [1].

La gestión sanitaria contemporánea enfrenta el desafío de procesar volúmenes masivos de datos donde la dimensión espacial es determinante; casi cualquier fenómeno epidemiológico está intrínsecamente ligado a una ubicación geográfica [2]. La capacidad de georreferenciar estos eventos permite una comprensión superior de la prevalencia de enfermedades crónicas mediante el análisis de patrones territoriales [3]. En este escenario, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han evolucionado de herramientas de visualización a potentes sistemas de apoyo a la decisión (DSS), capaces de integrar la dimensión espacial en la formulación de soluciones sanitarias [4].

Los registros poblacionales de cáncer (RPC) son sistemas de información y vigilancia epidemiológica que permiten conocer la magnitud del cáncer en una población determinada. Su función es recopilar, procesar y analizar la información de todos los casos nuevos de cáncer en una población definida, proporcionando datos de incidencia, mortalidad, patrones, tendencias y supervivencia poblacional [5].

En el contexto regional, el municipio de Pasto (Colombia) cuenta con el Registro Poblacional de Cáncer (RPCMP), entidad fundamental que recolecta datos clínicos y sociodemográficos siguiendo estándares internacionales [6]. No obstante, a pesar de contar con direcciones residenciales, históricamente estos datos no se han explotado para análisis geoespaciales de alta resolución. Esta limitación subyace en la ausencia de infraestructura tecnológica adecuada y en desafíos críticos de calidad de datos, tales como registros incompletos o nomenclaturas no estandarizadas que dificultan la geocodificación automática [7].

Para cerrar esta brecha, se ha desarrollado YACHAY-SIG, una plataforma diseñada para transformar registros clínicos estáticos en un ecosistema de información espacial multiescalar. El sistema se fundamenta en una arquitectura modular que emplea un stack de código abierto: PostgreSQL/PostGIS para el motor de base de datos espacial [8], y una interfaz desarrollada en *React* con la librería *Leaflet.js* para la gestión cartográfica. El núcleo algorítmico aborda la complejidad de la malla vial local mediante procesos de normalización asistida mediante la implementación de autómatas finitos deterministas y el uso proyectado de Modelos de Lenguaje de Gran Escala (LLM) para automatizar la corrección de inconsistencias en las direcciones [9].

Finalmente, la plataforma ofrece capacidades analíticas avanzadas a través de mapas de puntos, calor y coropletas basados en algoritmos de clasificación estadística como Jenks [10]. Al integrar filtros multidimensionales, YACHAY-SIG no solo optimiza la vigilancia epidemiológica, sino que se consolida como una herramienta estratégica para la planificación de políticas públicas y la asignación eficiente de recursos en salud con un enfoque territorial preciso [11]. siguiendo el ejemplo.

II. Materiales y Métodos

La metodología de YACHAY-SIG se estructuró mediante un proceso técnico que integra la ingeniería de requisitos, el procesamiento geoespacial y la inteligencia artificial para la vigilancia epidemiológica. El proyecto se desarrolló bajo el marco de trabajo ágil Scrum [12], permitiendo iteraciones incrementales entre el equipo de desarrollo y los expertos del RPCMP.

A. Fase I (Desarrollo): Metodología y herramientas

El sistema se fundamentó en un análisis detallado de 26 requerimientos funcionales y el modelado de diagramas de actividades para asegurar la interacción eficiente entre el administrador y el módulo de georreferenciación. Las herramientas seleccionadas son de código abierto y alto rendimiento:

Front-end: *React*, para una interfaz dinámica basada en componentes [13].

Back-end: Node.js con Express para la gestión de APIs y lógica de servidor.Base de datos: *PostgreSQL* potenciado con la extensión *PostGIS* para el soporte de objetos espaciales [14] [15].

Visualización cartográfica: Leaflet.js para mapas interactivos.

Procesamiento: Python para algoritmos de conteo y Simple-Statistics para clasificación estadística.

B. Fase II (Datos): Arquitectura, Procesos ETL y Normalización con LLM

La gestión de datos se dividió en etapas críticas de Extracción, Transformación y Carga (ETL) [16]:

Extracción: Se procesaron tres archivos maestros (.txt) del RPCMP (pacientes, tumores y fuentes). Tras una limpieza inicial, se consolidó una base depurada de 18,733 registros aptos para geocodificación.

Geocodificación Híbrida y Normalización con LLM: Para la transformación de direcciones en coordenadas geográficas, el sistema implementa una estrategia híbrida estructurada en dos etapas secuenciales. En primera instancia, se emplea un geocodificador determinístico especializado para la ciudad de Pasto [17], el cual opera sobre la malla vial oficial (ver Fig. 1). En segunda instancia, ante la baja estandarización de los registros residenciales —caracterizada por abreviaturas inconsistentes o nomenclaturas basadas en manzanas y lotes— se integra un Modelo de Lenguaje de Gran Escala (LLM) para la fase de normalización [18].

Este modelo actúa como un agente de Procesamiento de Lenguaje Natural (*NLP*) que interpreta, corrige y normaliza las cadenas de texto no estructuradas, reintegrándolas posteriormente al motor de geocodificación. Los resultados experimentales validan que la estrategia de ajuste fino supervisado mediante *LoRA* (*Low-Rank Adaptation*) es altamente eficaz para esta tarea. El modelo *Gemma 3 4B-IT* destacó como la solución de mayor rendimiento con una precisión del 98.67%, seguido por *Llama 3.2 3B Instruct* con un 96.67% [19]. Esta sinergia tecnológica reduce drásticamente la pérdida de información y minimiza la necesidad de recolección manual de coordenadas, optimizando la integridad del análisis geoespacial.

Carga Espacial: Los puntos geográficos resultantes se vincularon con polígonos administrativos del DANE [20] mediante la función de intersección espacial *ST_Intersects()*.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

C. *Fase III (Análisis/Inteligencia): Visualización y analítica*

Esta fase transforma los datos procesados en conocimiento estratégico mediante:

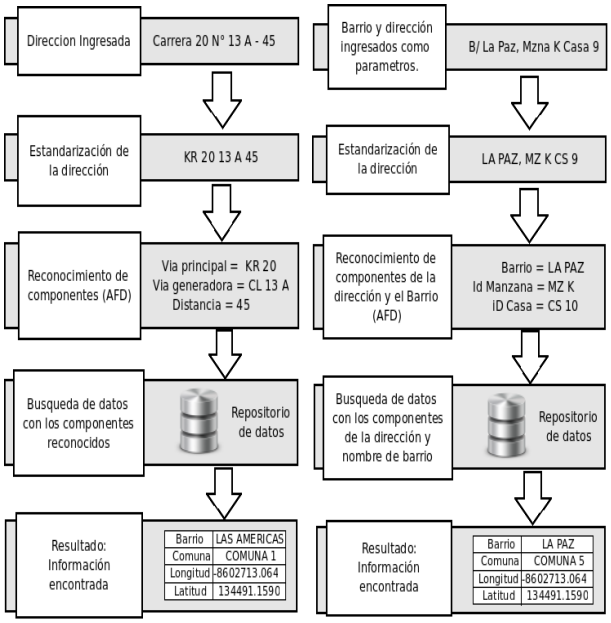


Figura 1. Geocodificación de direcciones urbanas [17]

Mapas Temáticos: Generación de mapas de calor (densidad), puntos (dispersión) y coropletas.

Algoritmos de Clasificación: Para los mapas coropléticos, el sistema implementa métodos como Jenks (Natural Breaks), Cuartiles, Pretty Breaks e Intervalos Iguales. Estos algoritmos son métodos de **coropletas** (clasificación de datos en mapas). Su función principal es agrupar valores numéricos en rangos o "clases" para que la representación visual en el mapa sea coherente y no engañosa.

Filtrado Multidimensional: Permite cruces analíticos entre variables demográficas (sexo), clínicas (morfología, grado, localización), socioeconómicas (estrato, ocupación) y rangos etarios basados en estándares de la OMS.

Interoperabilidad: Exportación de datos filtrados en formato Excel y descarga de mapas en JPEG para informes técnicos oficiales.

III. Resultados

En esta sección se describen los resultados obtenidos tras el desarrollo e implementación de YACHAY-SIG. El sistema consolida el procesamiento de registros clínicos con capacidades de visualización geoespacial, facilitando la identificación de patrones territoriales en la distribución de enfermedades oncológicas. Asimismo, la herramienta permite evaluar los factores espaciales asociados a la incidencia, proporcionando una base analítica para la toma de decisiones en salud pública.

A. *Arquitectura del sistema*

YACHAY-SIG se fundamenta en una arquitectura modular orientada a la escalabilidad y la separación de responsabilidades (ver Fig. 2). La estructura técnica se organiza en tres capas funcionales, articuladas mediante tecnologías específicas:

Capa de Presentación (Front-end): gestiona la interacción del usuario mediante una interfaz gráfica dinámica desarrollada en *React*. Esta elección permite el uso de componentes reutilizables, garantizando una navegación fluida y una gestión eficiente del estado de la interfaz en tiempo real.

Capa de Lógica (Back-end): constituye el núcleo procesador del sistema. Implementa procesos de geocodificación mediante la integración del *Geocoder* y modelos de lenguaje de gran escala (*LLM*) para el tratamiento de datos no estructurados. Asimismo, ejecuta los algoritmos de análisis espacial y las reglas de negocio necesarias para la interpretación de los datos oncológicos.

Capa de Datos y Conexión: responsable de la persistencia y seguridad de la información. Se utiliza *PostgreSQL* con la extensión *PostGIS* [15], lo que permite el almacenamiento optimizado de objetos geométricos y la ejecución de consultas espaciales complejas esenciales para el análisis territorial.

B. *Componentes de Presentación (Front-end)*

La interfaz de usuario (GUI) se implementó mediante la biblioteca *React* [21], adoptando un paradigma de arquitectura basado en componentes que garantiza una estructura modular, mantenible y escalable. El diseño se centra en la experiencia del usuario (UX) para facilitar la interpretación de datos epidemiológicos complejos a través de las siguientes funcionalidades:

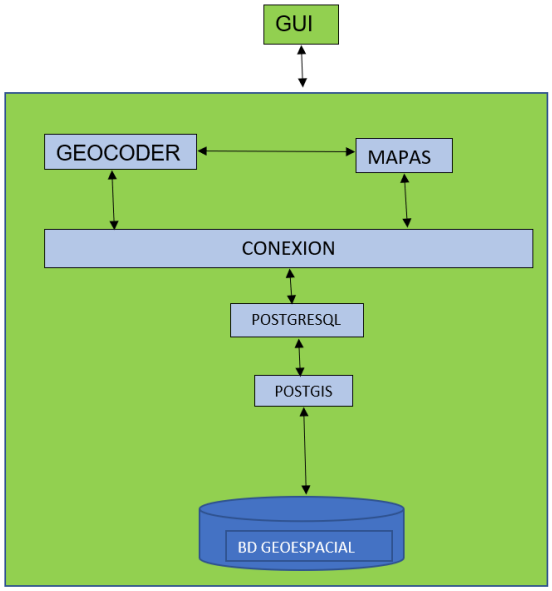


Figura 2. Arquitectura del sistema YACHAY-SIG

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Visualización Dinámica y Filtrado Territorial: el panel principal permite la conmutación entre perspectivas urbanas y rurales. El sistema integra filtros multidimensionales que desglosan la información por comunas, barrios, corregimientos y veredas, optimizando la granularidad del análisis (ver Fig. 3).

Análisis Geoespacial Interactivo: se incorporan herramientas para la manipulación de mapas de calor, permitiendo ajustar parámetros de intensidad (weight) y radio de influencia (radius). Estas capacidades facilitan la identificación visual de clusters de incidencia y patrones de dispersión espacial.

Exportación de Datos e Interoperabilidad: cada visualización generada es exportable como informe técnico. El sistema procesa los datos geoespaciales para generar tablas estructuradas (formatos CSV/PDF), permitiendo auditorías y análisis en entornos no gráficos (ver Fig. 4).

Seguridad y Control de Acceso: se implementó un módulo de autenticación robusto encargado de la validación de credenciales y la asignación de roles (Administrador o Recolector). Este mecanismo asegura la integridad y confidencialidad de los datos clínicos sensibles bajo protocolos de autorización definidos.

Para el despliegue de la cartografía interactiva, se optó por *Leaflet.js,* una biblioteca de alto rendimiento que permite la renderización de capas geográficas con baja carga computacional y alta interoperabilidad en dispositivos móviles y de escritorio.

C. *Componentes de Lógica (Back-end)*

Esta capa constituye el núcleo operativo del sistema, encargándose del procesamiento de datos espaciales, la ejecución de reglas de negocio y la orquestación de servicios analíticos. Su arquitectura se fundamenta en un entorno de ejecución *Node.js* con el f*ramework Express*, complementado con *Python* para tareas de procesamiento de datos de alto rendimiento y cálculos estadísticos complejos.

Las funcionalidades principales son:

Motor de Geocodificación e Inteligencia Semántica: se implementó un flujo de trabajo híbrido que asigna coordenadas geográficas a partir de la malla vial y el sistema de nomenclatura local (barrios, manzanas y predios). Para mitigar la baja calidad de los registros iniciales, se integró un LLM local especializado en la normalización y estandarización de direcciones con inconsistencias, errores ortográficos o formatos no convencionales, optimizando significativamente la tasa de éxito de la georreferenciación [22].

Análisis Espacial y Clasificación de Datos: el sistema emplea algoritmos de clasificación estadística para la generación de mapas de coropletas, permitiendo representar distribuciones territoriales mediante métodos como Cuantiles, *Jenks* (Natural Breaks), *Pretty Breaks* e Intervalos Iguales [23] (ver Fig. 5). Estas técnicas aseguran que la visualización de los datos oncológicos sea estadísticamente significativa y libre de sesgos visuales.

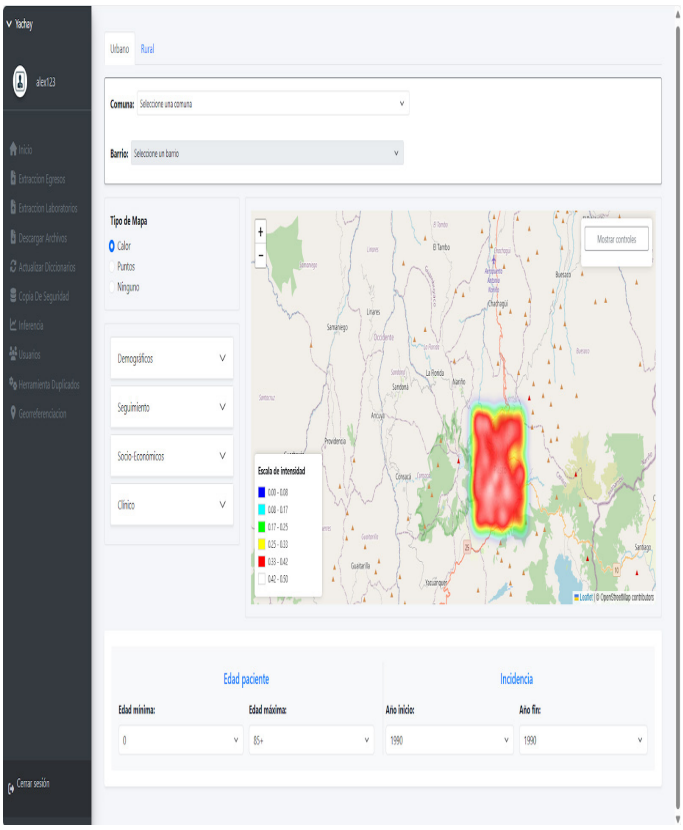
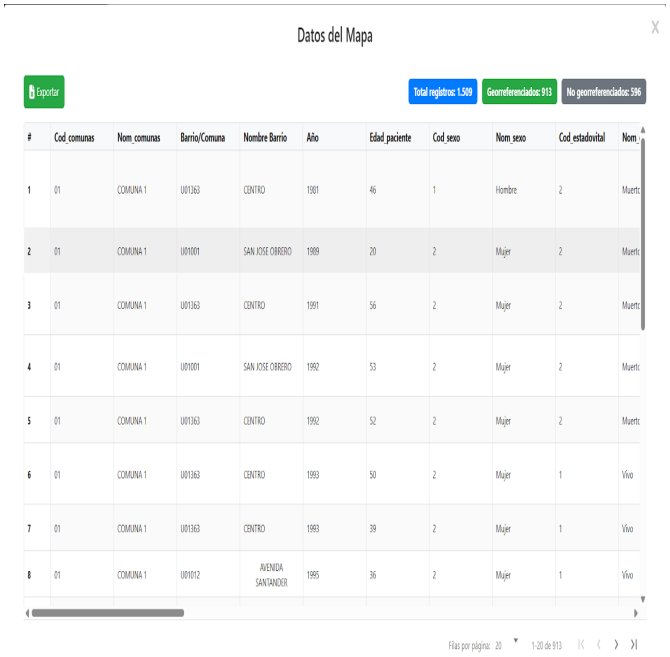


Figura 3. Interfaz gráfica Georeferenciación.



#	Cod comunas	Nom comunas	Barrio/Comuna	Nombre Barrio	Año	Edad paciente	Cod sexo	Nom sexo	Cod estadovital	Nom.
1	01	COMUNA 1	U01363	CENTRO	1981	46	1	Hombre	2	Muerto
2	01	COMUNA 1	U01001	SAN JOSE OBRERO	1989	20	2	Mujer	2	Muerto
3	01	COMUNA 1	U01363	CENTRO	1991	56	2	Mujer	2	Muerto
4	01	COMUNA 1	U01001	SAN JOSE OBRERO	1992	53	2	Mujer	2	Muerto
5	01	COMUNA 1	U01363	CENTRO	1992	52	2	Mujer	2	Muerto
6	01	COMUNA 1	U01363	CENTRO	1993	50	2	Mujer	1	Vivo
7	01	COMUNA 1	U01363	CENTRO	1993	39	2	Mujer	1	Vivo
8	01	COMUNA 1	U01012	AVENIDA SANTANDER	1995	36	2	Mujer	1	Vivo

Figura 4. Datos de reporte de cada mapa.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

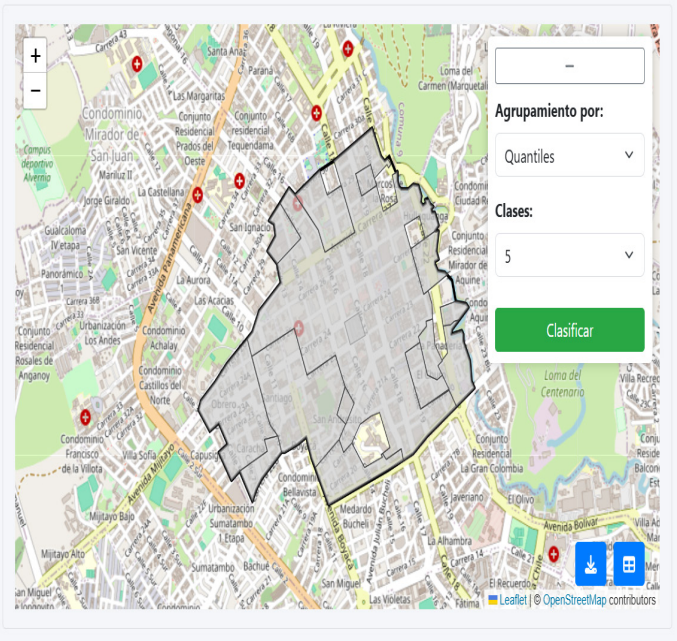


Figura 5. Georeferenciación de casos de cáncer municipio de Pasto, mapas de coropletas de acuerdo con el procesamiento de reglas.

Visualización de Densidad y Patrones: se integran capacidades para el renderizado de mapas de calor (*Heatmaps*) y mapas de puntos, facilitando la detección de clusters epidemiológicos y la densidad de incidencia por zonas geográficas (ver Fig. 6 y Fig. 7).

Procesamiento Estadístico: Mediante la librería Simple-Statistics y scripts optimizados en Python, el sistema ejecuta operaciones de agrupamiento, cálculo de frecuencias y análisis de distribución de casos en tiempo real, garantizando una respuesta ágil ante grandes volúmenes de registros clínicos.

D. Componente de datos y Persistencia Espacial

El almacenamiento y la gestión de la información constituyen el núcleo funcional del sistema, garantizando la integridad, accesibilidad y precisión de la información epidemiológica. Para soportar este volumen de datos críticos, se seleccionó PostgreSQL como sistema de gestión de bases de datos relacional, debido a su robustez y escalabilidad (ver Fig. 8).

Las principales características de esta capa incluyen:

Arquitectura de Datos Normalizada: la información clínica y de fuentes externas se organiza en tablas normalizadas. Destaca la entidad *tab_direccion tumor*, diseñada específicamente para la persistencia geoespacial. Esta almacena atributos clave como el identificador de la ficha clínica, la dirección normalizada, coordenadas decimales y el objeto geográfico en formato WKT (*Well-Known Text*).

Extensión PostGIS: el sistema integra la extensión PostGIS, permitiendo el tratamiento de objetos geométricos (puntos, líneas y polígonos) como tipos de datos nativos. Esto habilita la ejecución de consultas espaciales complejas que superan las capacidades de una base de datos relacional convencional.

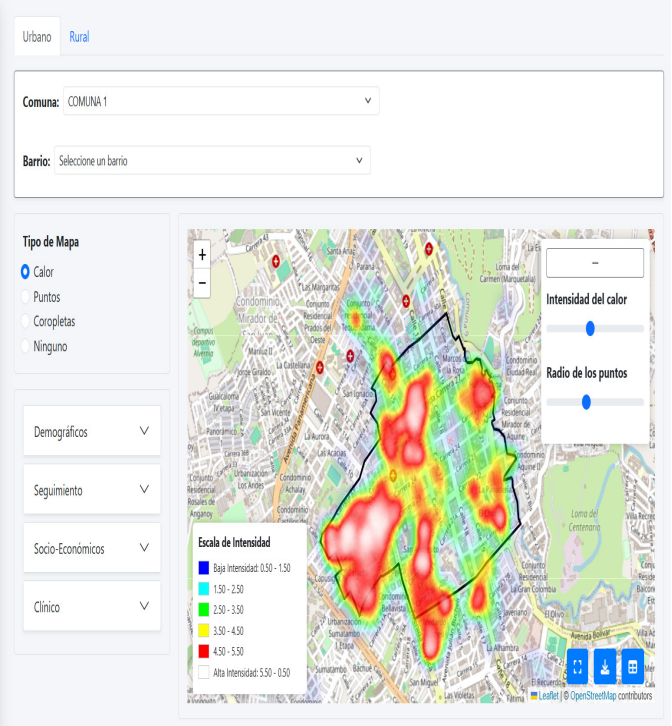


Figura 6. Georeferenciación de casos de cáncer municipio de Pasto, mapa de calor.

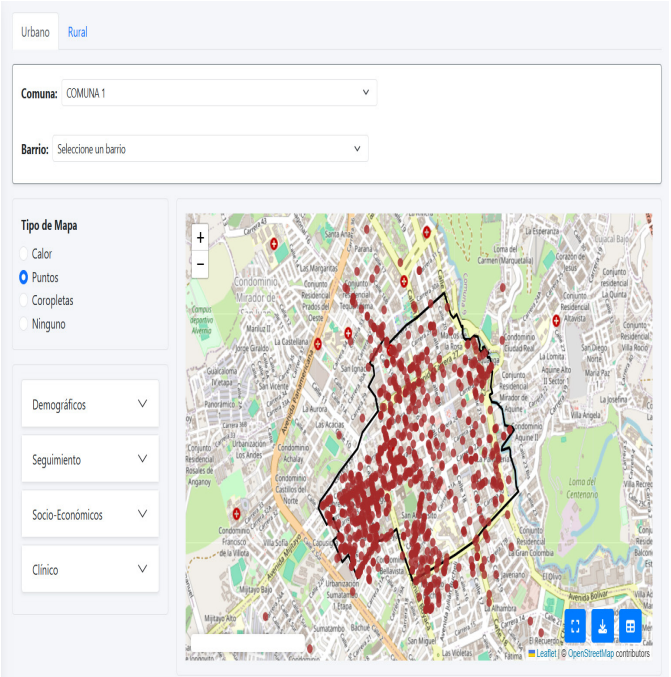


Figura 7. Georeferenciación de casos de cáncer municipio de Pasto, mapa de puntos.

Validación y Operaciones Espaciales: para garantizar la precisión en la asignación de puntos a polígonos administrativos (barrios o comunas), el sistema implementa funciones de análisis espacial avanzado [15]:

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

ST_Intersects(). Utilizada para verificar la inclusión exacta de los puntos de incidencia dentro de las delimitaciones geográficas oficiales.

ST_Distance(). Empleada para calcular la proximidad entre registros y centros de salud o puntos de interés

ST_DWithin(). Utilizada para definir radios de búsqueda y rangos espaciales aceptables, optimizando el rendimiento de las consultas de vecindad.

Estas operaciones reducen significativamente los errores de asignación territorial y fortalecen la fiabilidad del análisis espacial posterior, asegurando que cada caso oncológico esté correctamente vinculado a su contexto geográfico.

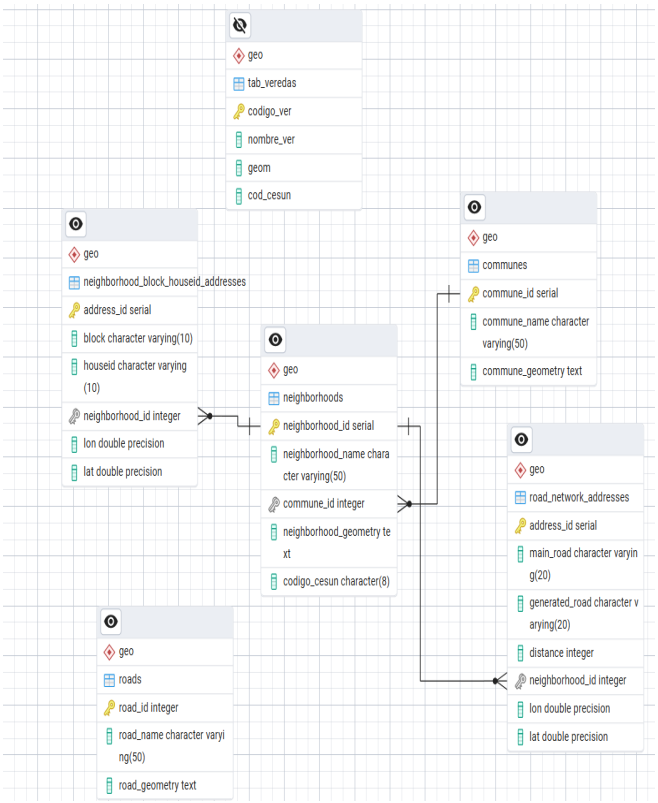


Figura 8. Base de datos Yachaydb.

IV. Conclusiones y Trabajos Futuros

El desarrollo de YACHAY-SIG demuestra que la convergencia entre los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la Inteligencia Artificial (IA) constituye una estrategia eficaz para fortalecer la vigilancia epidemiológica. A partir de los resultados obtenidos, se derivan las siguientes deducciones fundamentales:

Integración y Precisión Geoespacial: el sistema logra una sinergia entre registros clínicos complejos y el análisis territorial. La aplicación de algoritmos de clasificación estadística (*Jenks, Cuantiles)* permite transformar datos heterogéneos en representaciones visuales robustas, facilitando la identificación de clústeres oncológicos con una precisión superior a los métodos tradicionales de tabulación.

Innovación mediante LLM y NLP: La incorporación de un modelo de lenguaje de gran escala (*Gemma 3 4B-IT*) para la normalización de direcciones representa el principal aporte técnico de esta investigación. Este enfoque resuelve la problemática de la inconsistencia en las nomenclaturas urbanas y rurales, alcanzando una tasa de acierto del 98.67%. La automatización de la limpieza de datos reduce el sesgo de información y minimiza la intervención manual en el proceso de georreferenciación.

Eficiencia en la Persistencia de Datos: El uso de PostgreSQL/PostGIS trasciende el almacenamiento convencional, actuando como un motor analítico capaz de ejecutar validaciones geométricas en tiempo real. Esto garantiza la integridad de la relación entre el caso clínico y su ubicación geográfica, permitiendo estudios de proximidad y densidad con alta fiabilidad técnica.

Escalabilidad e Impacto en Salud Pública: La arquitectura modular del sistema asegura su adaptabilidad a diversos contextos regionales y patologías. Como herramienta de soporte a la decisión, YACHAY-SIG proporciona evidencia científica para la planificación de servicios de salud y el diseño de políticas preventivas focalizadas, optimizando la asignación de recursos en territorios con disparidades epidemiológicas.

Se propone como trabajos futuros implementar modelos de aprendizaje automático para identificar zonas de riesgo potencial antes de que aparezcan nuevos clústeres significativos.

Agradecimientos

Este proyecto es financiado con recursos del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación MINCIENCIAS, administrados por ICETEX y con recursos de contrapartida de la Universidad de Nariño, Universidad Abierta y a Distancia UNAD e Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca.

Referências Bibliográfica

[1] World Health Organization, *Global Action Plan for the Prevention and Control of Noncommunicable Diseases 2013-2020*, Geneva, Switzerland: WHO Press, 2013.

[2] G. J. Rushton, "Public Health, Geographies of," in *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 2nd ed., J. D. Wright, Ed. Oxford: Elsevier, 2015, pp. 581–587.

[3] E. K. Cromley and S. L. McLafferty, *GIS and Public Health*, 2nd ed. New York, NY: Guilford Press, 2012.

[4] M. F. Goodchild, "GIS and public health: bridging the gap," *Journal of Geographical Systems*, vol. 23, no. 1, pp. 1–10, 2021.

[5] C. Taramasco, C. Rimassa, and J. Acevedo, "Challenges in the surveillance of all cancer cases in Chile: National Cancer Registry" [Desafios en la vigilancia de todos los casos de cáncer en Chile: Registro Nacional de Cáncer], *Medwave*, vol. 24, no. 1, p. e2771, Jan. 2024, doi: 10.5867/medwave.2024.01.2771..

[6] International Agency for Research on Cancer (IARC), *Cancer Registration: Principles and Methods*, Lyon, France: IARC Scientific Publications, 2022..

[7] P. A. Zandbergen, "A comparison of address point libraries and TIGER files for geocoding," *Transactions in GIS*, vol. 12, no. 2, pp. 163–180, 2018.

[8] R. O. Obe and L. S. Hsu, *PostGIS in Action*, 3rd ed. Shelter Island, NY: Manning Publications, 2021.

[9] J. Devlin et al., "BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding," in *Proc. of the 2019 Conf. of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics*, 2019, pp. 4171–4186.

[10] G. F. Jenks, "The Data Model Concept in Statistical Mapping," *Interna-*

tional Yearbook of Cartography, vol. 7, pp. 186–190, 1967.
[11] S. S. Richards et al., "The role of GIS in the planning of health services: A systematic review," *Health Policy and Technology*, vol. 10, no. 3, pp. 100527, 2021.
[12] E. Y. Hernández Salazar and C. A. Beltrán, "SCRUM, un enfoque práctico de metodología ágil para la ingeniería de software," Tecnología, Investigación y Academia (TIA), vol. 8, no. 2, pp. 61–73, 2022.
[13] J. Hayward, A. Fedosejev, N. Prusty, A. Horton, R. Vice, E. Holmes, and T. Bray, React: Building Modern Web Applications. Birmingham, U.K.: Packt Publishing, 2016.
[14] P. Löwe, Á. Anguix Alfaro, A. Antonello, P. Baumann, M. Carrera, K. Durante, and P. Wessel, "Open source–GIS," in Springer Handbook of Geographic Information. Cham, Switzerland: Springer International Publishing, 2022, pp. 807–843.
[15] P. Ramsey, M. Leslie, and PostGIS Contributors, "Geometries," in Introduction to PostGIS, 2023. [Online]. Available: https://postgis.net/documentation/
[16] C. A. Salinas, J. Scantamburlo, and F. M. J. Quaino, Extract-Transform-Load (ETL) en la gestión de datos geoespaciales: prácticas, herramientas y casos de uso. Córdoba, Argentina: IDECOR – AMDG S.A.S., 2024.
[17] R. Timarán, G. Hernández, y N. Quemá, "Geocodificador de Eventos Delictivos Georreferenciados a Nivel de Direcciones Urbanas en el Municipio de Pasto," en *Mem. 5to Congr. Int. Gestión Tecnológica y de la Innovación (COGESTEC)*, Bucaramanga, Colombia: Editorial Universidad Industrial de Santander, 2016, pp. 314-327. ISBN: 978-958-8819-42-6.
[18] W. X. Zhao *et al.*, "A Survey of Large Language Models," *arXiv preprint arXiv:2303.18223*, Mar. 11, 2025. doi: 10.48550/arXiv.2303.18223.
[19] J. D. Viveros, S. R. Timarán, y A. Calderón, "Diagnóstico de la Calidad de Datos para la Geocodificación Inteligente en el Registro Poblacional de Cáncer de Pasto", en *Avances en Investigaciones de Sistemas Inteligentes y Gestión de Conocimiento: Libro de resúmenes del Congr. Int. de Sistemas Inteligentes y Gestión de Conocimiento (CISIGESCO)*, Popayán, Cauca: Editorial Institución Universitaria Colegio Mayor del Cauca, 2025. ISBN: 978-628-96250-7-3.
[20] Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), "Geoportal DANE," 2026. [Online]. Available: https://geoportal.dane.gov.co/
[21] Meta. (2023). React documentation. https://react.dev.
[22] A. Fernando, S. Ranathunga, K. Stock, R. Prasanna, and C. B. Jones, "Georeferencing complex relative locality descriptions with large language models," International Journal of Geographical Information Science, pp. 1–33, 2026.
[23] T. A. Slocum, R. B. McMaster, F. C. Kessler, and H. H. Howard, *Thematic Cartography and Geovisualization*, CRC Press 2022.

Competencias Tecnológicas Docentes en Contextos Rurales: Estrategias para Promover la Equidad Digital

Technological Competencies for Teachers in Rural Contexts: Strategies to Promote Digital Equity

Nayade Vanessa Domenech Polo[1], Jefferson Xavier Gualoto Garcia[1], Marisela Giraldo De López[1]
[1]Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Facultad de estudios de Posgrado

Guayaquil, Ecuador
ndomenech@uteg.edu.ec, j.gualoto.mae@uteg.edu.ec, mgiraldo@uteg.edu.ec

***Resumen* — Esta investigación aborda las competencias tecnológicas docentes en contextos rurales, con el propósito de diagnosticar fortalezas y debilidades en el uso de TIC, así como identificar factores que limitan el acceso a la tecnología y proponer estrategias para promover la equidad en la educación rural. Se empleó el método analítico sintético, bajo el enfoque cualitativo, descriptivo y exploratorio, mediante una metodología no experimental. La población estudiada incluyó docentes y directivos de la Unidad Educativa Fiscal Rural, utilizando una encuesta semi estructurada para recopilar datos. Los resultados evidenciaron que el 58,1% de las instituciones cuentan con conexión a internet mediante banda ancha, aunque el 71% reporta acceso limitado a tecnologías digitales. En cuanto a competencias digitales, el 46,67% de los docentes mostró conocimiento básico en herramientas digitales, mientras que el 48,4% ha participado en programas de formación. Finalmente, el 100% destacó la importancia del uso responsable de la tecnología en educación. Este estudio busca apoyar la formación pedagógica en TIC mediante programas de capacitación adaptados a las necesidades rurales.**

***Palabras Clave* – educación rural; equidad digital; competencias tecnológicas; estrategias herramientas tecnológicas; TIC.**

***Abstract* — This research addresses teachers' technological competencies in rural contexts, with the purpose of diagnosing strengths and weaknesses in the use of ICT, as well as identifying factors that limit access to technology and proposing strategies to promote equity in rural education. The analytical-synthetic method was employed, under a qualitative, descriptive, and exploratory approach, using a non-experimental methodology. The study population included teachers and administrators from the Rural Public-School Unit, using a semi-structured survey to collect data. The results showed that 58.1% of the institutions have broadband internet access, although 71% report limited access to digital technologies. Regarding digital competencies, 46.67% of the teachers demonstrated basic knowledge of digital tools, while 48.4% have participated in training programs. Finally, 100% highlighted the importance of the responsible use of technology in education. This study seeks to support pedagogical training in ICT through training programs adapted to rural needs.**

Keywords – rural education, digital equity, technological skills, technological tools and strategies, ICT..

I. Introducción

La integración de las TIC en el ámbito educativo se configura hoy como un pilar fundamental para garantizar aprendizajes inclusivos y de calidad [1]. Sin embargo, esta transformación no se da de manera homogénea en todo el contexto ecuatoriano. En las zonas rurales, la desigualdad digital educativa plantea desafíos importantes: la infraestructura resulta insuficiente, la conectividad es limitada y estos factores inciden negativamente en el desempeño académico de los estudiantes [2].

Según la UNESCO, solo el 37 % de los habitantes rurales cuenta con un acceso robusto a internet y el 43 % de los estudiantes no tienen acceso a Internet en casa, este informe resalta también que el 89 % de los estudiantes no tiene computadora en casa [3]. Este panorama se vuelve aún más complejo en regiones donde los docentes enfrentan condiciones laborales precarias y carecen de formación continua en competencias tecnológicas, perpetuando así los ciclos de exclusión y desigualdad educativa. En este contexto, las competencias tecnológicas docentes en áreas rurales cobran especial relevancia, ya que su desarrollo no solo influye en la calidad de la enseñanza, sino también en la capacitación de los estudiantes para involucrarse de manera activa en una comunidad que se digitaliza continuamente, [4].

Como base de fundamento para el análisis se tienen dos esquemas teóricos básicos. Por un lado, la teoría del aprendizaje mediado por tecnología resalta el potencial transformador de las herramientas digitales en el proceso educativo. Por otro, el modelo TPACK, propuesto por Schmid, Brianza y Petko, ofrece una guía para comprender cómo los docentes pueden integrar de forma creativa la tecnología en sus prácticas pedagógicas [5]. A la par, la teoría de la exclusión digital permite analizar cómo las desigualdades socioeconómicas, culturales y educativas afectan el acceso y uso efectivo de estas tecnologías, exponiendo las dificultades concretas que los docentes encuentran en entornos

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

rurales de Ecuador [6].

A. Barreras persistentes a pesar de esfuerzos institucionales

A pesar de los esfuerzos del Ministerio de Educación por mejorar la conectividad y ofrecer programas de capacitación docente, persisten barreras estructurales que dificultan la integración efectiva de la tecnología en las aulas rurales. La carencia de conectividad, la insuficiencia de aparatos tecnológicos y las restricciones financieras de los hogares en zonas rurales son elementos que agravan la desigualdad digital. Además, muchos docentes se enfrentan a obstáculos en la inclusión de recursos digitales debido a la falta de formación específica y al temor al cambio tecnológico. Esta situación no solo restringe las oportunidades de aprendizaje de los estudiantes, sino que también refuerza la exclusión digital en un mundo cada vez más dependiente de la tecnología [7].

B. Evidencia estadística de la brecha digital en Ecuador

La brecha digital entre las unidades educativas en el área urbana y rural es una realidad en Ecuador y salió a la luz durante la crisis sanitaria, donde la conectividad puede tener un impacto significativo en la vida de los niños más desfavorecidos. En Ecuador, el analfabetismo digital se materializa al ver las cifras a nivel nacional, según el Instituto Nacional de Estadística y Censo INEC, el 53% de los hogares ecuatorianos tienen acceso a Internet [8]. Sin embargo, esta cifra se desglosa en un 62% en áreas urbanas y apenas un 35% en zonas rurales, en el mismo periodo, el 34,3% de ecuatorianos utilizaron una computadora, sin embargo, el 70,7% de la población nacional accedió a internet desde cualquier dispositivo (computadora, teléfono celular, Tablet, televisor inteligente, etc.), en el área urbana fue del 77,1% y en el área rural del 59,9%. A pesar el esfuerzo realizado por el Ministerio de Educación tan solo el 41,99% se logró mejorar de la calidad educativa, la cobertura y garantía de derechos a través de la innovación tecno-pedagógica y el equipamiento tecnológico, conectividad, formación y capacitación docente [9].

Por otra parte, se estima que el 19% de la población rural en Ecuador es analfabeta digital, en comparación con el 3,6% en las áreas urbanas [10]. Este fenómeno dificulta la adopción de estrategias educativas basadas en tecnología, a pesar de los esfuerzos por implementar políticas de inclusión digital, persisten desafíos estructurales: falta de adaptación de los programas de formación a las necesidades específicas de las zonas rurales, escasez de recursos tecnológicos sostenibles y desconocimiento de estrategias pedagógicas que integren las TIC de manera contextualizada.

C. Problemática actual de los docentes y resistencia al cambio

Este estudio se pone de manifiesto un problema latente al cual se enfrentan los docentes en la actualidad, la metodología de enseñanza tradicional está experimentando cambios profundos, producto de las nuevas tecnologías que están revolucionando las formas actuales de enseñanza aprendizaje, donde las Tics están inmersas en los modelos de aprendizajes en el mundo virtual, esto ha provocado que exista dificultada debido a la falta de familiaridad o temor para adaptase a nuevas tecnologías, provocando resistencia ya que les resulta complejo para los docentes debido a que el acceso y recursos son limitados, pues esto depende mucho de los recursos que el ministerio de educación implemente en los centros de educación.

Otro factor importante, radica en la falta de capacitación y el insuficiente desarrollo de habilidades tecnológicas entre los docentes, sin una formación solida en esta área, muchos docentes no logran integrar efectivamente las herramientas digitales en sus métodos de enseñanza, lo que limita el aprendizaje de los estudiantes. Esta situación no solo frena el avance educativo, sino que también amplía la brecha digital, dejando a muchos atrás en un mundo cada vez más digitalizado.

D. Marco normativo y constitucional ecuatoriano

Los marcos normativos y estratégicos del Ecuador reflejan un compromiso integral con el fortalecimiento del sistema educativo, en especial en lo que respecta a la inclusión y equidad. posiciona a la educación como un instrumento de transformación social, reconociendo a niños, niñas y adolescentes como el eje central del proceso de aprendizaje y como sujetos de derecho [11]; [12]. En la misma línea el Ministerio de Educación propone acciones interinstitucionales para prevenir el abandono escolar y fomentar la reinserción de estudiantes en condiciones de vulnerabilidad. Esto refuerza la necesidad de una educación flexible, inclusiva y adaptada a los contextos locales, especialmente en zonas rurales. Este conjunto, de normativas y políticas muestran una alineación hacia un modelo educativo más equitativo, digitalmente inclusivo y centrado en el bienestar integral de la comunidad educativa [13]; [14].

Desde la perspectiva histórica se precede a realizar una revisión bibliográfica sobre el uso de herramientas tecnológicas en la educación donde se destaca que la implementación efectiva de las TIC en la educación para mejorar el aprendizaje es importante, ya que se ha convertido en una herramienta clave para mejorar la calidad educativa y preparar a los estudiantes para enfrentar los retos del mundo actual [15]; 16]. Sin embargo, se identifican desafíos como la falta de capacitación docente y la necesidad de estrategias metodológicas adecuadas para su integración efectiva en el proceso educativo.

La UNESCO en el 2005, ya alertaba sobre la necesidad de políticas públicas para garantizar una educación equitativa con el uso de las TIC [17]. Por otra parte, la competencia tecnológica docentes ha sido consolido a partir de auge de educación digital, y en época de pandemia en el 2020 marcó un punto de inflexión en la educación digital, evidenciando la urgente necesidad de formar a los docentes en herramientas tecnológicas. En contextos rurales, la falta de infraestructura adecuada y capacitación específica agravó la desigualdad educativa, impulsando nuevos debates sobre estrategias efectivas para reducir la brecha digital en la enseñanza [18]; [19]. La integración de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en la educación ha transformado las prácticas pedagógicas, ofreciendo nuevas oportunidades de aprendizaje y enseñanza.

En las últimas décadas del siglo pasado surgió un vertiginoso avance tecnológico en el mundo. Los sistemas educativos no quedaron alejados de estos avances, enseñar desde la virtualidad era un nuevo reto [20].

Según García, et al, la educación virtual es una modalidad de estudio que viene en crecimiento [21], pues la educación virtual ofrece múltiples bondades para acceder al conocimiento,

ISBN: 978-989-36481-2-4

a la vez que exige a los docentes capacitación y entrenamiento continuo en las diversas herramientas disponibles para esta metodología.

La competencia tecnológica puede entenderse como un conjunto de conocimientos, habilidades y actitudes que permiten utilizar de manera efectiva y eficiente las herramientas tecnológicas en diversos contextos, orientado a la innovación educativa, lo laboral y social. Estas competencias abarcan desde el manejo básico de dispositivos digitales hasta la capacidad de adaptarse a nuevas tecnologías y resolver problemas técnicos [22].

Por otro lado, Plan Nacional de Formación Permanente como política pública del Ministerio de Educación, plantea a la formación docente como un "proceso permanente y continuo de reflexión de la práctica educativa que permite modificar, fortalecer o transformar los conocimientos, destrezas, habilidades y actitudes pedagógicas, didácticas, disciplinares, digitales, transversales y socioemocionales de los profesionales de la educación" [23]; [24].

Vivimos en una era de rápida evolución tecnológica. La cuarta revolución industrial, impulsada por la inteligencia artificial y la conectividad digital, está transformando todos los sectores y ámbitos de la sociedad, incluida la educación, en este contexto las estrategias se basan en tres dimensiones: acceso, uso y aprovechamiento. Estas diferencias no solo afectan la calidad educativa actual, sino que también influyen en el futuro del aprendizaje en un entorno digitalizado. Abordar y comprender esta discrepancia es fundamental para asegurar una educación equitativa y de calidad para todos [25].

En concordancia con lo anteriormente expuesto es evidente que, en la actualidad, la disparidad digital constituye un obstáculo significativo para para lograr una educación accesible para todos, especialmente en las zonas rurales. Ante esta realidad, la investigación se centra en el análisis de las competencias tecnológicas de los docentes en contextos rurales, con el propósito de identificar estrategias que promuevan la equidad digital educativa. Esto permite evaluar cuales son las principales barreras que enfrentan los educadores al integrar las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en sus prácticas pedagógicas, así como explorar oportunidades para fortalecer su formación y mejorar la enseñanza en entornos con recursos limitados.

II. Materiales y métodos

A. Método de análisis, enfoque y estrategias de investigación.

Se emplea el método analítico-sintético, el cual permite descomponer mentalmente un fenómeno en sus partes, cualidades, relaciones y componentes, para luego reconstruirlo y explicar su totalidad [26]. A partir de este abordaje, se analiza la realidad de las competencias tecnológicas docentes en contextos rurales y se sintetizan los hallazgos para comprender las brechas digitales existentes.

Se adopta un enfoque metodológico mixto con predominio cuantitativo, dado que se integran técnicas de recolección y análisis de datos tanto cualitativas como cuantitativas. Desde la dimensión cuantitativa, se emplea estadística descriptiva (frecuencias y porcentajes) para caracterizar el nivel de competencias tecnológicas y condiciones de acceso. Complementariamente, el componente cualitativo permite interpretar los resultados desde una perspectiva contextual, considerando las condiciones propias del entorno rural.

Este enfoque resulta pertinente, ya que posibilita una comprensión integral del fenómeno estudiado, combinando la medición objetiva de variables con el análisis interpretativo de la realidad educativa [27].

B. Diseño de la investigación.

El diseño de la investigación es no experimental, implicando así, analizar la información sin manipular deliberadamente las variables. Los fenómenos se observan tal como ocurren en su contexto natural, facilitando un estudio sistemático y profundo de la realidad. La unidad de análisis está conformada por los docentes que laboran en la Unidad Educativa Guale, ubicada en el cantón Paján, provincia de Manabí. Este grupo representa el eje central de observación, en este se busca evaluar competencias tecnológicas, identificar las necesidades formativas y proponer estrategias para favorecer la inclusión digital en las prácticas pedagógicas.

C. Población y muestreo.

La población objeto de estudio está compuesta por 32 docentes que integran la planta docente de la Unidad Educativa Guale, por nombramiento o por contrato, durante el periodo lectivo 2025. Dado el tamaño reducido y manejable de esta población, se opta por un muestreo censal, es decir, se considera a la totalidad de los docentes como parte de la muestra. Para la recolección de información primaria, se aplicará una encuesta estructurada, dirigida a todos los docentes participantes, con el fin de obtener datos cuantitativos sobre el nivel de manejo de herramientas digitales, acceso a dispositivos y condiciones de conectividad.

D. Instrumento de recolección de datos.

Se emplean los siguientes instrumentos: encuesta estructurada para recoger evidencia observable del uso de las TIC por parte de los docentes, la información obtenida se organizó por preguntas para identificar los principales factores como son accesibilidad, conectividad, disponibilidad, Conocimientos y Habilidades Tecnológicas y Uso Responsable y Ética Digital.

Para la validación del contenido, se elaboró un instrumento conformado por 15 preguntas, revisadas y validadas por docentes expertos. Estas preguntas se diseñaron en función a las variables de estudio: competencias tecnológicas, accesibilidad, conectividad, disponibilidad, conocimientos y uso responsable. Cada ítem fue estructurado para su aplicación en la encuesta, garantizando su pertinencia y coherencia con los objetivos de la investigación.

La validación del contenido del instrumento se llevó a cabo mediante un análisis factorial exploratorio (AFE). Este método se seleccionó debido a la ausencia de un modelo teórico previo que definiera la estructura de las preguntas. Las variables del estudio se organizaron en cinco secciones clave, cada una diseñada para evaluar un aspecto fundamental del uso de la tecnología: competencias tecnológicas, accesibilidad, conectividad, disponibilidad y uso responsable, tal como se muestra a continuación:

ISBN: 978-989-36481-2-4

- Acceso a la Tecnología

La primera sección explora este tema mediante cuatro preguntas que nos permiten comprender mejor cómo las personas acceden a dispositivos tecnológicos e internet. Aquí, buscamos identificar si existen limitaciones en términos de infraestructura o recursos económicos que dificulten el acceso equitativo a estas herramientas.

- Conocimientos y Habilidades Tecnológicas

La segunda parte profundiza en el nivel de competencia digital de los participantes, a través de otras cuatro preguntas. Nos interesa saber si las personas cuentan con las habilidades necesarias para aprovechar al máximo las tecnologías disponibles, así como qué áreas requieren mayor atención formativa.

- Uso Responsable y Ética Digital

En esta tercera sección, tres preguntas permiten reflexionar sobre la importancia de un comportamiento ético y responsable en el entorno digital. Exploramos temas como privacidad, seguridad y el impacto social de nuestras acciones en línea, conscientes de que el uso adecuado de la tecnología es crucial para construir comunidades más seguras y solidarias.

- Barreras y Desigualdades en el Uso de la Tecnología

A través de dos preguntas, la cuarta sección aborda los obstáculos que impiden un acceso pleno y equitativo a la tecnología. Aquí reconocemos que las brechas digitales no son solo una cuestión técnica, sino también social, afectando principalmente a grupos vulnerables como mujeres, jóvenes y adultos mayores.

- Estrategias para Reducir la Brecha Digital

Finalmente, la quinta y última sección propone soluciones prácticas mediante tres preguntas orientadas a identificar estrategias efectivas para cerrar estas brechas.

III. Resultados

Los resultados de esta investigación se exponen de manera ordenada y estructurada, respetando el flujo lógico de los datos estadísticos obtenidos a través de un cuestionario aplicado cuidadosamente. Este instrumento fue diseñado no solo para recopilar información relevante, sino también para entender las experiencias, desafíos y oportunidades que enfrentan los docentes en su interacción con la tecnología.

El análisis se consideraron preguntas clave, cada una abordando un aspecto fundamental del uso de la tecnología.

A. Conectividad

Los resultados que se muestran en la figura 1, revelan que el 56% de las instituciones educativas del sector rural cuentan con conexión a Internet mediante banda ancha, seguido por un 22% que accede mediante red comunitaria, un 19 % que depende de datos móviles, y un 3 % que no cuenta con ningún tipo de conexión. Este hallazgo pone de manifiesto que la institución educativa tiene acceso a internet y por ende acceso a recursos educativos en áreas rurales, evidenciando así que la mitad de los docentes están equipados para aprovechar el uso de la tecnología.

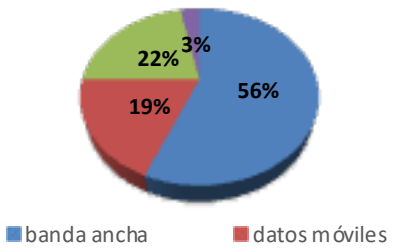


Figura 1. Conectividad.

B. Acceso a la Tecnología:

La primera sección explora este tema mediante cuatro preguntas que nos permiten comprender mejor cómo las personas acceden a dispositivos tecnológicos e internet.

Se evidencia que las instituciones educativas tienen acceso con 73%, seguido con 63% disponibilidad en su lugar de trabajo, y finalmente con 60% tiene acceso es a través del dispositivo.

C. Disponibilidad de acceso

Como se muestra en la figura 2, un 71% de los docentes reportan tener un acceso limitado a tecnologías digitales dentro de la institución, mientras que un 16.1% goza de acceso total y un 12.9% no tiene acceso en absoluto. Estos datos sugieren una brecha significativa en el acceso a herramientas digitales, lo cual es preocupante en un contexto educativo que cada vez más demanda la integración de la tecnología en el proceso de enseñanza-aprendizaje.

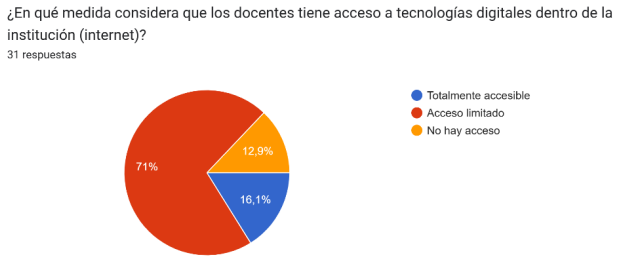


Figura 2. Disponibilidad de acceso.

D. Conocimientos y Habilidades Tecnológicass

La segunda parte profundiza en el nivel de competencia digital de los docentes, a través de otras cuatro preguntas. Se busca determinar si los docentes cuentan con las habilidades necesarias para aprovechar al máximo las tecnologías disponibles, así como qué áreas requieren mayor atención formativa. En los datos recolectados al respecto se encontró que el 47% el nivel de conocimiento es alto en cuanto a herramientas digitales, plataformas educativas para la enseñanza, con el 43% de los docentes acota tener conocimiento y habilidad tecnológicas, con el 21% la frecuencia del uso de herramientas tecnológicas tiene un nivel medio, es decir, a menudo.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

E. Formación o capacitación del uso de tecnología

En cuanto al nivel de conocimiento sobre herramientas digitales y plataformas educativas, un 48,4 % los docentes tienen curso y programas de formación, manifestó tener un nivel alto, mientras que un 45,2 % indicó tener un nivel medio, debido a tutoriales en líneas o autodidactas, y solo un 9,7 % reportó un nivel muy bajo o nula, ver figura 3. Estos datos evidencian una percepción positiva, pero con predominancia de niveles no avanzados, lo cual puede implicar que los docentes se sienten familiarizados con la tecnología, pero no plenamente competentes para su implementación pedagógica compleja.

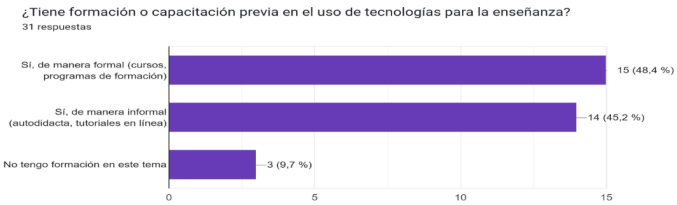


Figura 3. Formación del uso de tecnología.

F. Dominio de herramientas digitales

Los resultados en la figura 4, reflejan una tendencia hacia el uso de herramientas más accesibles y conocidas como redes sociales y presentaciones digitales con el 58,1%. Con el 41.9% los docentes hacen uso de herramientas de presentación como: Power Point, entre otras; y con 35,5% de los docentes hacen uso de Moodle o Classroom. Sin embargo, existe una brecha en el dominio de plataformas educativas formales y software especializado, lo cual indica la necesidad de fortalecer la capacitación docente en tecnologías educativas más estructuradas e interactivas.

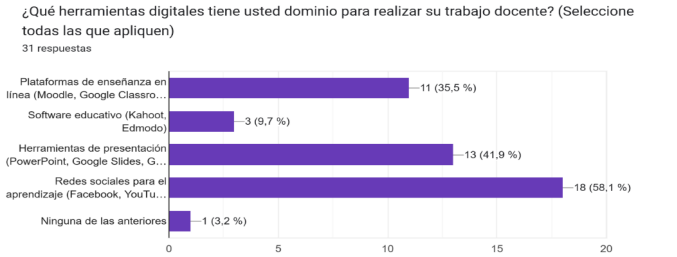


Figura 4. Dominio de herramientas digitales.

G. Uso Responsable y Ética Digital

En esta tercera sección, tres preguntas permiten identificar la importancia de un comportamiento ético y responsable en el entorno digital. Exploramos temas como practicas seguras, uso responsable y uso ético, esto permite que los docentes deben estar conscientes de que el uso adecuado de la tecnología es crucial para construir comunidades más seguras y solidarias. Se evidencia, en los datos, que el 100% de los docentes acotaron que, si es necesario actuar con una amplia conciencia sobre la necesidad de actuar con responsabilidad al utilizar herramientas digitales, y en cuanto a las prácticas de ciberseguridad el si es necesario proteger la información y equipos, a pesar que existe una base de conocimiento, se evidencia una necesidad urgente de sensibilización y formación en ciberseguridad. Y finalmente, 63% personas acotan que existe una falta de valorización o comprensión sobre la importancia de la ética digital, lo que podría tener implicaciones en la forma en que se utiliza la tecnología, especialmente en entornos educativos.

H. Barreras y Desigualdades en el Uso de la Tecnología

A través de dos preguntas, la cuarta sección aborda los obstáculos que impiden un acceso pleno y equitativo a la tecnología, como se muestra en la figura 5. Aquí se reconoce que las brechas digitales no son solo una cuestión técnica, sino también social, afectando principalmente a grupos vulnerables como mujeres, jóvenes y adultos mayores.

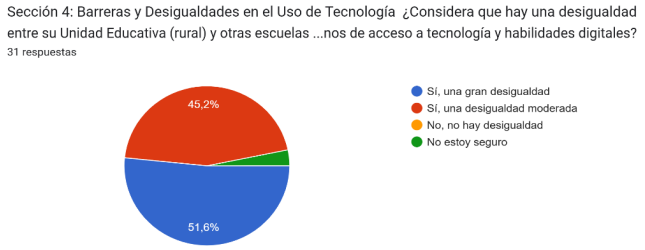


Figura 5. Barreras en el uso de tecnología ¿Considera que hay una desigualdad entre su unidad educativa (rural) y otras escuelas respecto al uso y acceso a tecnologías y habilidades digitales?.

Los resultados de la encuesta realizada a los docentes con el 51,6% acotan que existe una desigualdad en el acceso a tecnología y habilidades digitales, y reconocen que existe una brecha significativa entre la unidad educativa rural, especialmente en cuanto a acceso a dispositivos, conectividad y formación en habilidades digitales. Mientras que con el 45.2% opinan que existe una desigualdad modera.

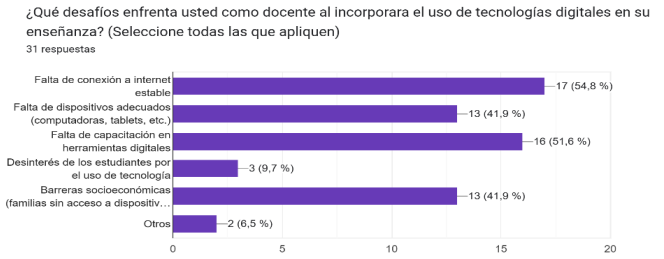


Figura 6. Desafíos al uso de tecnologías.

La percepción en cuanto a desigualdad es percibida en forma de desigualdad debido a que las brechas tecnológicas en muy visible en escuelas rurales, por ello es necesario programas educativos que aborden la equidad digital en zonas rurales.

De total de docentes encuestado se evidencia que 54.8% los docentes se enfrentan a desafíos por la falta de conexión a

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

internet estable, lo cual limita seriamente su capacidad para implementar estrategias de enseñanza virtual o híbrida de manera efectiva. Asimismo, con el 51.6% existe falta de capacitación em herramientas digitales lo que representa una barrera importante para la integración de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en los procesos educativos, ver figura 6.

I. Estrategias para promover la equidad Digital

Se proponen soluciones prácticas orientadas a identificar estrategias efectivas para fomentar la equidad digital. Desde iniciativas educativas hasta políticas públicas inclusivas, que promuevan una sociedad más conectada y equitativa.

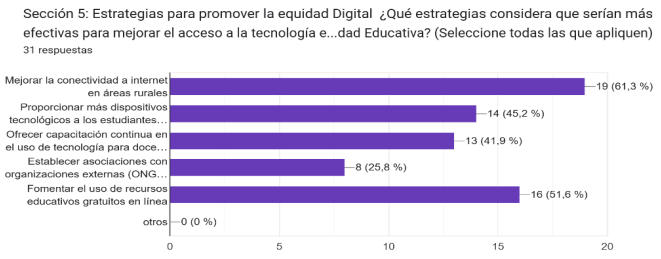


Figura 7. Estrategias para promover la equidad digital.

De total de docentes encuestado se evidencia que 61.3% refleja la importancia mejorara la actividad a internet en áreas rurales, donde el acceso a internet suele ser limitado o inexistente, con el 51.6% de los docentes destaca fomentar el uso de recursos educativos materiales educativos accesibles y gratuitos en línea, puede reducir costos y aumentar la inclusión educativa, ver figura 7.

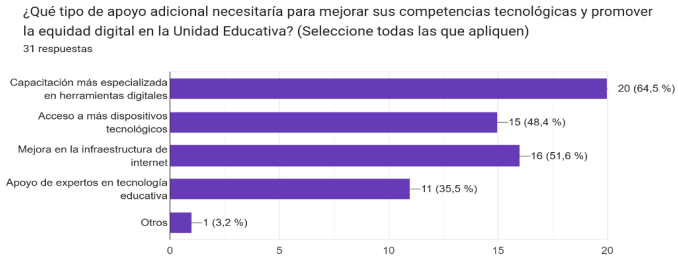


Figura 8. Tipo de apoyo para mejorar competencias.

Como se muestra en la figura 7, de total de docentes encuestado se evidencia que el 64.5% refleja es necesario la capacitación más especializada en herramientas digitales, así mismo con el 51.6% indica hay que mejorara la infraestructura de internet y finalmente con el 48.4% el acceso a más dispositivos tecnológico como computadoras, tablets o teléfonos inteligente, permite garantizar que todos los miembros de la unidad educativa puedan acceder a las herramientas necesarias para desarrollar sus competencias tecnológicas..

IV. Discusión

El acceso a la tecnología en las instituciones educativas del sector rural es de gran relevancia, dado que impacta directamente a la calidad de la educación y la capacidad de los docentes para integrar herramientas digitales en su práctica docente, según los datos obtenidos en la investigación, el 56% de las instituciones educativas rurales cuenta con conexión a Internet mediante banda ancha. Este hallazgo coincide con estudios previos realizados por Pico y Villao [28], quienes destacan que, a través de la banda ancha móvil se puede acceder a Internet desde cualquier lugar y navegar por la Web. En este sentido, Ramos y Ortiz, [29], subrayan la calidad del acceso a internet en instituciones educativas es un factor crucial que afecta diversos aspectos, desde la aceptación de sistemas de información por parte de los estudiantes hasta la calidad de la educación en general. Estos resultados revelan las condiciones tecnológicas de las escuelas rurales, donde la mayoría de los docentes y estudiantes enfrentan limitaciones significativas en cuanto a infraestructura, conectividad y capacitación digital. Sino también, a la formación y habilidades digitales del personal docente, que muchas veces no cuenta con el acompañamiento ni las herramientas necesarias para aprovechar el potencial pedagógico de las tecnologías.

A pesar de estos avances, el análisis del acceso a la tecnología en entornos educativos, donde la unidad educativa estudiada reportan tener un acceso limitado a tecnologías digitales dentro de la institución en un 71%, evidenciándose que existe desafíos relacionados con el acceso individual a dispositivos y la consistencia en el uso de la tecnología. Zambrano et al, [30], refuerza que estas limitaciones no solo afectan el acceso a dispositivos, sino también el uso efectivo de nuevas tecnologías y herramientas digitales en el proceso de enseñanza.

El segunda aspecto clave se centra en el nivel de competencia digital que tiene los docentes, evaluando tanto el conocimiento como el uso de herramientas digitales por parte de los docentes con el 41,9%, se evidencia que los docentes están familiarizados con variadas tecnologías como procesadores de texto, hojas de cálculo, presentaciones Power Point, aplicaciones colaborativas (Zoom, Microsoft Teams) y otras herramientas que facilitan la creación y gestión de contenidos educativos. No obstante, a pesar de este uso frecuente de herramientas digitales, la profundidad y el alcance de las competencias digitales sigue siendo limitada. Según, Basilotta et al, [31], destacan en su investigación, aunque los docentes reconocen poseer cierto nivel de competencia digital, esta suele ser baja o medio-baja. Además, se observa una ausencia notable de competencias relacionadas con la evaluación de la práctica educativa mediada por tecnología, lo cual representa un área crítica para el desarrollo profesional docente (práctica educativa). Este hallazgo revela que existe una inequidad entre el uso de la tecnología y su integración pedagógicas. Es decir, mientras muchos docentes adoptan herramientas tecnológicas en sus planificaciones, esta no es aplicadas de forma correcta, lo que limita el proceso de enseñanza aprendizaje, sino también la forma de adaptarse a nuevos entornos educativos.

En relación con la formación en tecnología de la información, con el 48,4 % los docentes tienen curso y programas de formación. Estos programas han permitido que los docentes adquieran competencias básicas en el uso de herramientas accesibles y conocidas como redes sociales y presentaciones digitales, pero este aprendizaje lo han realizado a través de curso

ISBN: 978-989-36481-2-4

online o autodidacta. No obstante, Torre et al, [32], señalan que la formación es muy básica a básica de competencia digital y se encontró que, a mayor formación en las TIC, mayor es el desarrollo de la competencia digital.

Otro factor relevante analizado en esta investigación es el uso responsable y ética digital. El 100% los docentes acotaron que es necesario actuar con responsabilidad al utilizar herramientas digitales en el proceso educativo. Granizo [33], destaca en una investigación similar acotan que es necesario una formación e información para poder educar a sus alumnos en el uso seguro y responsable de la red, integrando herramientas, recursos digitales de manera segura y responsable en el proceso de enseñanza-aprendizaje. Esto incluye la integración de herramientas y recursos digitales de manera segura y ética en el proceso de enseñanza-aprendizaje, promoviendo valores como la privacidad, la ciberseguridad y el respeto en entornos virtuales.

Finalmente, los resultados se evidencian que 54,8% de los docentes se enfrentan a desafíos significativos por la falta de conexión a internet estable, lo cual limita seriamente su capacidad para implementar estrategias de enseñanza virtual o híbrida de manera efectiva, a través del mejoramiento de la conectividad es fundamental para garantizar que todos los estudiantes, independientemente de su ubicación geográfica, puedan acceder a recursos educativos digitales. Además, el 64,5% refleja la importancia de brindar formación específica en el uso de herramientas digitales para mejorar las competencias tecnológicas de los docentes. Esta formación debe ser integral, abarcando tanto aspectos técnicos como pedagógicos, para asegurar que los docentes puedan aprovechar al máximo las tecnologías disponibles y transformar positivamente sus prácticas educativas.

V. Limitaciones del estudio

El estudio presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas para la interpretación de los resultados. En primer lugar, el tamaño de la muestra es reducido y corresponde a una sola institución educativa rural, lo que limita la generalización de los hallazgos a otros contextos con características diferentes.

En segundo lugar, el uso de un diseño no experimental impide establecer relaciones causales entre las variables analizadas, restringiendo el alcance del estudio a un nivel descriptivo e interpretativo. Asimismo, la recolección de datos mediante encuesta puede estar sujeta a sesgos de autopercepción por parte de los participantes.

Adicionalmente, aunque se incorporó un análisis estadístico descriptivo, no se aplicaron técnicas inferenciales que permitan contrastar hipótesis o establecer relaciones significativas entre variables.

En función de estas limitaciones, se sugiere que futuras investigaciones desarrollen estudios de tipo longitudinal que permitan analizar la evolución de las competencias tecnológicas docentes en el tiempo, así como estudios comparativos entre contextos rurales y urbanos. También se recomienda incorporar metodologías experimentales o cuasi-experimentales que permitan evaluar el impacto de programas de formación docente en competencias digitales.

VI. Conclusiones

El nivel actual de las competencias tecnológicas podemos destacar de los docentes en instituciones rurales se caracteriza por un conocimiento básico y funcional en el uso de herramientas digitales, especialmente aquellas relacionadas con la elaboración de contenidos y la comunicación (como procesadores de texto, presentaciones y plataformas colaborativas). No obstante, persisten debilidades significativas en el uso pedagógico, e integración de la tecnología en la práctica docente.

Por otro lado, las limitaciones en infraestructura tecnología y conectividad sigue siendo una barrera en cuanto al uso de tic en contexto educativos rurales. Aunque el porcentaje es relevante en la institución educativa y dispone de conexión a Internet mediante banda ancha, esta suele ser de baja calidad o intermitente. Además, el acceso individual a dispositivos digitales es insuficiente, lo que restringe la incorporación sistemática de tecnologías en el aula lo que profundiza la inequidad digital entre zonas rurales.

El análisis nos muestra que, aunque la institución educativa ha dado pasos importantes en el camino hacia la integración de la tecnología, el uso ético y responsable representa una fortaleza valiosa, sin embargo, es evidente que los docentes sean reconocidos por los avances que aportan al desarrollo en el uso de herramientas digitales. Sin embargo, también es claro que estos logros no son suficientes.

Las brechas digitales persisten, es por ello que se requiere de implementación de estrategias de capacitación de programas continua y mejorar el acceso a la tecnología, muchos docentes carecen de una conexión estable a internet, lo que limita su capacidad para enseñar de manera efectiva en entornos virtuales o híbridos.

Al mismo tiempo, se deben garantizar condiciones mínimas de infraestructura tecnológica, conectividad estable y disponibilidad de dispositivos, creando un entorno que facilite la integración efectiva y sostenible de las tecnologías en los procesos de enseñanza-aprendizaje.

Referências Bibliográfica

[1] E. Mena, L. Vera y A. Mora, "Integración de la tecnología educativa en el aula de educación básica en Ecuador," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 2, pp. 150–162, mar.-abr. 2024, doi: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10389.

[2] M. Moreira y R. Agramonte, "Tecnologías digitales en escuelas rurales: un análisis de la era digital," *Revista Ciencia y Desarrollo Social Reincasol*, vol. 3, no. 6, pp. 415–436, 2024, doi: https://doi.org/10.59282/reincisol.V3(6)415-436.

[3] UNESCO, *Tecnología en la educación: ¿una herramienta en los términos de quién?*, 2023. doi: https://doi.org/10.54676/NEDS2300.

[4] M. Minor y J. Cortés, "Percepción de la importancia de las competencias tecnológicas en docentes de escuelas rurales," *Revista Electrónica en Educación y Pedagogía*, vol. 3, no. 4, pp. 57–71, 2019, doi: http://dx.doi.org/10.15658/rev.electron.educ.pedagog19.03030404.

[5] M. Schmid, E. Brianza y D. Petko, "Self-reported technological pedagogical content knowledge (TPACK) of pre-service teachers in relation to digital technology use in lesson plans," *Computers in Human Behavior*, vol. 115, pp. 1–20, 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.chb.2020.106586.

[6] R. Cevallo, E. Rodríguez y J. Bonilla, "Repercusiones de la evolución de la digitalización en el sector rural del Ecuador durante la pandemia," *Revista Polo del Conocimiento*, vol. 7, no. 10, pp. 1627–1644, 2022, doi: 10.23857/pc.v7i8.

[7] J. Cedeño, A. Freira, I. Moran, J. Llivi, M. Chalare y N. Iza, "Reducción de la brecha digital en zonas rurales: soluciones tecnológicas para una

educación equitativa," *South Florida Journal of Development*, vol. 5, no. 10, pp. 1–14, 2024, doi: 10.46932/sfjdv5n10-033.

[8] Instituto Nacional de Estadística y Censos, *Indicadores de tecnología de la información y comunicación. Boletín técnico N.º 04-2021. Encuesta Multipropósito*, Quito, Ecuador, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.ecuadorencifras.gob.ec/documentos/web-inec/Estadisticas_Sociales/TIC/2020/202012_Boletin_Multiproposito_Tics.pdf

[9] Ministerio de Educación, *Reducción de la brecha digital en el Sistema Nacional de Educación*, Quito, Ecuador, 2023. [En línea]. Disponible en: https://educacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2023/02/PROYECTO_INVERSION-DNTE.pdf

[10] C. Marcayata, "La brecha digital es la gran deuda pendiente en Ecuador, más en la ruralidad," *Revista Gestión*, 2023. [En línea]. Disponible en: https://revistagestion.ec/analisis-sociedad/la-brecha-digital-es-la-gran-deuda-pendiente-en-ecuador-mas-en-la-ruralidad/

[11] Asamblea Nacional del Ecuador, *Constitución de la República del Ecuador*, Quito, Ecuador, 2021.

[12] Asamblea Nacional del Ecuador, *Ley Orgánica de Educación Intercultural*, Quito, Ecuador, 2023.

[13] Ministerio de Educación, *Secretaría de Fundamentos Educativos*, 1ª ed., Quito, Ecuador: República del Ecuador, 2024.

[14] Ministerio de Telecomunicaciones y de la Sociedad de la Información, *Agenda de Transformación Digital del Ecuador 2022–2025*, Quito, Ecuador, 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.arcotel.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/Agenda-transformacion-digital-2022-2025.pdf

[15] N. Paladines, "Implementación efectiva de las TIC en la educación para mejorar el aprendizaje: una revisión sistemática," *Ciencia Latina Revista Multidisciplinar*, vol. 7, no. 1, pp. 5788–5804, ene.-feb. 2023. [En línea]. Disponible en: https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/4862/7374

[16] M. Punina, J. Paguay, E. Yacelga y L. Camuendo, "El papel de las TIC en la implementación de metodologías activas en el campo de la educación," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 1, 2024, doi: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.10566.

[17] UNESCO, *Declaración mundial sobre la educación superior en el siglo XXI: visión y acción*, 2005. [En línea]. Disponible en: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000141952

[18] K. Guapulema, P. Alvarado, M. Proaño y K. Peñaloza, "La brecha digital en la educación ecuatoriana: desafíos post pandemia," *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, vol. 5, no. 5, 2024, doi: https://doi.org/10.56712/latam.v5i5.2907.

[19] J. López y D. Martínez, "Educación rural y TIC: entre la tradición y la innovación," *Cuadernos de Pedagogía Rural*, vol. 10, no. 4, pp. 25–40, 2020.

[20] E. Pérez y Y. Reyes, "Competencias tecnológicas: un nuevo modelo pedagógico," *Revista Internacional Tecnología Educativa Docentes 2.0*, vol. 11, no. 2, pp. 76–83, 2021. [En línea]. Disponible en: https://ojs.docentes20.com/index.php/revista-docentes20/article/view/246/627

[21] J. García, B. Pineda, O. Rodríguez y D. Rodríguez, "Desarrollo de competencias tecnológicas en docentes utilizando un modelo de diseño instruccional," *Educación y Educadores*, vol. 26, no. 1, 2023, doi: https://doi.org/10.5294/edu.2023.26.1.3.

[22] UniCatólica, "¿Qué son las competencias tecnológicas?," 2022. [En línea]. Disponible en: https://www.unicatolica.edu.co/noticias/competencias-tecnologicas-crecimiento-profesional/

[23] Mecapacito, "Plan nacional de formación permanente," mar. 2024. [En línea]. Disponible en: https://mecapacito.educacion.gob.ec/plan-nacional-de-formacion-permanente/

[24] E. Muñoz, E. Jacome y G. Medina, "Análisis de la brecha digital y el acceso a recursos tecnológicos en las instituciones de educación secundaria en Ecuador," *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, no. 2, pp. 1–23, 2024, doi: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i2.11086.

[25] UNIR, "Cómo afrontar y superar la brecha tecnológica en la educación," oct. 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.unir.net/revista/educacion/como-enfrentarse-y-superar-brecha-tecnologica-educacion/

[26] A. Rodríguez y A. Pérez, "Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento," *Revista Escuela de Administración de Negocios*, no. 82, pp. 175–195, 2017, doi: https://doi.org/10.21158/01208160.n82.2017.1647.

[27] R. Hernández, C. Fernández y M. Baptista, *Metodología de la investigación*, 6ª ed. México: McGraw-Hill Education, 2014.

[28] D. S. Pico y F. N. Villao, "Propuesta para mejorar el plan nacional de desarrollo de la banda ancha en el Ecuador," Escuela Superior Politécnica del Litoral, pp. 1–8, 2014.

[29] F. Ramos y M. Ortiz, "Efecto de la calidad de acceso a internet en la aceptación de un sistema de información en estudiantes universitarios," *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, pp. 404–413, 2022.

[30] M. Zambrano, L. Zambrano, M. Barba, C. Macías y K. Macías, "Tecnologías digitales y equidad en la educación global," *Avances Multidisciplinarios en Innovación y Desarrollo Sostenible*, vol. 5, no. 2, 2024, doi: https://doi.org/10.55813/gaea/ccri/v5/n2/642.

[31] V. Basilotta, P. Gómez, M. Matarranz, L. Casado y A. Ochoa, "Teachers' digital competencies in higher education: a systematic literature review," *Springer Nature*, vol. 19, no. 8, pp. 2–16, 2022.

[32] C. Torres, A. Lagunes y M. Gómez, "Competencia digital de los futuros docentes en una institución de educación superior en Paraguay," *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación*, no. 63, pp. 159–195, 2022, doi: https://doi.org/10.12795/pixelbit.91049.

[33] R. Granizo, "Educar y practicar la ética digital," *Tecnología Educativa Docente 2.0*, vol. 17, no. 1, 2024, doi: https://doi.org/10.37843/rted.v17i1.435.

Balanceamento Incremental de Distribuição de Classes
Incremental Class Distribution Balancing

Rafael Nink de Carvalho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO
Campus Porto Velho Zona Norte
Porto Velho - Rondônia, Brasil
rafaelnink@id.uff.br

Simone de Lima Martins, Alexandre Plastino de Carvalho
Instituto de Computação - Universidade Federal Fluminense
Niterói, Rio de Janeiro, Brasil
simone@ic.uff.br, plastino@ic.uff.br

***Resumo* — O desbalanceamento de classes constitui um desafio crítico na classificação supervisionada, com modelos tendendo a favorecer a classe majoritária em detrimento da minoritária, efeito especialmente impactante em aplicações como detecção de fraudes e diagnósticos médicos. Este trabalho propõe uma estratégia de sobreamostragem incremental que gera e seleciona iterativamente blocos de amostras sintéticas com base em ganhos efetivos na medida de desempenho do classificador denominada F1-Score. O método foi testado em 21 bases binárias desbalanceadas (selecionadas dos repositórios da UCI, KEEL e Kaggle) utilizando seis classificadores (kNN, DTree, RF, NB, LogReg e SVM) com validação cruzada estratificada de 5 folds. Resultados obtidos demonstram superioridade estatística da abordagem incremental sobre sobreamostragem tradicional (teste de Wilcoxon, p<0.05 em 12/21 bases), com vitórias em até 29/30 cenários (base abalone). A estratégia incremental obteve F1-Score médio superior em 71% das bases, confirmando sua robustez independentemente do classificador ou do grau de desbalanceamento. Conclui-se que a sobreamostragem incremental constitui uma alternativa promissora para equilibrar bases desbalanceadas, melhorando a qualidade das amostras sintéticas.**

***Palavras Chave* – Bases de Dados Desbalanceadas; Sobreamostragem Incremental; Classificação Binária; Balanceamento de Classes.**

***Abstract* — Class imbalance poses a critical challenge in supervised classification, as models often favor the majority class at the expense of the minority class, particularly relevant in applications such as fraud detection and medical diagnostics. This paper proposes an incremental oversampling strategy that iteratively generates and selects synthetic minority class samples based on the classifier performance measure F1-Score. The method was tested on 21 binary imbalanced datasets (from UCI, KEEL, and Kaggle repositories) using six classifiers (kNN, DTree, RF, NB, LogReg, and SVM) with 5-fold stratified cross-validation. Results demonstrate the statistical superiority of the incremental approach over traditional oversampling (Wilcoxon test, p<0.05 in 12/21 datasets), achieving victories in up to 29/30 scenarios (abalone dataset). The incremental strategy obtained a superior average F1-Score in 71% of datasets, confirming its robustness across classifiers and imbalance ratios. We concluded that incremental oversampling constitutes a promising alternative for imbalanced classification, improving synthetic sample quality.**

Keywords – Imbalanced Datasets; Incremental Oversampling; Binary Classification; Class Balancing.

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

I. Introdução

A proposta deste trabalho é explorar o problema da classificação em bases de dados com distribuição de classes desbalanceadas, com foco nas técnicas de sobreamostragem como uma estratégia para melhorar o desempenho dos classificadores treinados.

A classificação na mineração de dados utiliza padrões históricos para prever categorias dos dados (classes) com base em seus atributos observados. Sua função principal é converter dados brutos em resultados preditivos aplicáveis. No setor financeiro, destaca-se a análise de transações com cartão de crédito para prever possíveis movimentações fraudulentas [1] [2] ou em diagnósticos médicos [3] [4] [5], onde a identificação correta de casos doentes é importante para o tratamento mais apropriado.

Em muitas situações, as classes representadas nos dados não estão equilibradas, ou seja, uma classe pode ter significativamente mais exemplos do que outra. Por exemplo, nos exames de diagnóstico por imagem para detecção de câncer [6], há uma frequência muito maior de casos saudáveis em comparação com casos de câncer. Esse desbalanceamento pode levar os modelos treinados a ter dificuldade de classificar corretamente exemplos da classe minoritária, devido à escassez de exemplos.

O tratamento do desbalanceamento de classes envolve, primordialmente, estratégias de reamostragem, como sobreamostragem e subamostragem, ou o uso de algoritmos sensíveis a custo.

Nesse cenário, a proposta deste trabalho se diferencia das abordagens tradicionais de sobreamostragem, que geram todos os novos exemplos de uma única vez sem avaliar sua qualidade, ao introduzir uma estratégia incremental. Esta proposta contribui para o estado da arte ao implementar um controle de qualidade iterativo, onde a geração de amostras sintéticas, via geradores de algoritmos como SMOTE, ADASYN, Borderline-SMOTE, SVMSMOTE e ROS, é submetida a uma validação contínua. Assim, em vez de assumir que toda amostra sintética é benéfica, o método garante que apenas blocos de dados que resultem em ganhos efetivos na medida F1-Score sejam integrados ao conjunto final, otimizando a robustez do classificador de maneira seletiva e orientada ao desempenho.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Este trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção II oferece uma revisão dos principais conceitos que fundamentam as seções subsequentes, permitindo ao leitor uma compreensão das bases que sustentam a pesquisa e um panorama de como a literatura explora o tema em questão. Na sequência, a Seção III detalha o método proposto, baseado no balanceamento incremental, mostrando os procedimentos e técnicas que serão utilizados para alcançar os objetivos da pesquisa, bem como os critérios de avaliação desta. A Seção IV apresenta os resultados obtidos, analisando-os à luz dos conceitos discutidos anteriormente. Por fim, a Seção V apresenta as conclusões do trabalho.

II. Referenciais Teóricos

Em bases de dados que apresentam um desbalanceamento significativo na distribuição de classes, a questão que se impõe é que os modelos de aprendizado de máquina tendem a obter uma alta taxa de acerto para dados da classe majoritária, mas apresentam baixo desempenho no acerto para dados da classe minoritária.

Ademais, o desbalanceamento pode distorcer métricas de desempenho do modelo de classificação, como a acurácia [7] [8] [9], que podem indicar um bom desempenho na classificação realizada pelo modelo mesmo quando ele não está realmente capturando a complexidade dos dados. Isso pode levar a uma falsa credibilidade, fazendo com que decisões críticas sejam tomadas com base em informações imprecisas.

Dessa forma, um aspecto importante ao lidar com situações de desbalanceamento de classes é escolher métricas de avaliação que reflitam melhor o desempenho em ambas as classes, como a matriz de confusão, precisão, recall, F1-Score, G-mean e a curva ROC-AUC, pois oferecem uma visão mais completa da eficácia do modelo.

O F1-Score é uma métrica de avaliação amplamente utilizada em problemas de classificação, especialmente em cenários onde os dados são desbalanceados. Ela combina duas métricas importantes: precisão (*precision*) e cobertura (*recall*), em uma única medida, fornecendo um equilíbrio entre elas, ou seja, entre a capacidade do modelo de identificar corretamente instâncias positivas e evitar falsos positivos. A fórmula do F1-Score é dada por:

$$F1Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (1)$$

Onde *Precision* mede a proporção de instâncias corretamente classificadas como positivas entre todas as instâncias classificadas como positivas; e *Recall* mede a proporção de instâncias positivas corretamente identificadas entre todas as instâncias positivas que existem na base.

Para enfrentar esses desafios, estratégias podem ser adotadas, sendo uma delas o uso de técnicas de reamostragem [10], que envolvem aumentar a classe minoritária (sobreamostragem) ou diminuir a classe majoritária (subamostragem) [11]. Outra abordagem é a utilização de algoritmos de aprendizado que são intrinsecamente mais robustos a desbalanceamentos, como árvores de decisão adaptativas ou métodos sensíveis a custo [12] [13].

Por meio da aplicação de técnicas de sobreamostragem busca-se aumentar a representatividade da classe minoritária, permitindo que os modelos de classificação aprendam de maneira mais eficaz a partir de exemplos que, de outra forma, poderiam ser negligenciados. Essa abordagem pode resultar em uma melhoria significativa na capacidade do modelo de identificar corretamente casos relevantes.

Das técnicas clássicas e amplamente referenciadas na literatura destacam-se: SMOTE [14] [15], que gera amostras sintéticas por interpolação linear entre exemplos minoritários e seus vizinhos mais próximos; ADASYN [16], que prioriza adaptativamente regiões mais difíceis de classificação com base na densidade local de exemplos majoritários; Borderline-SMOTE [17], focada em instâncias minoritárias localizadas na borda de decisão entre classes; SVMSMOTE [18], que combina SVM para identificar regiões de suporte da classe minoritária antes da geração sintética; e Random Oversampling (ROS) [19] [20], que aumenta o número de instâncias duplicando as existentes.

Este estudo investiga a viabilidade de implementar estratégias de sobreamostragem de maneira incremental, tomando por base os geradores de técnicas amplamente referenciadas na literatura. O objetivo central é otimizar as métricas de desempenho, especificamente o F1-Score, através de um processo iterativo de seleção de amostras até que se alcance o equilíbrio desejado entre as instâncias das classes.

Para validar a eficácia e a versatilidade da estratégia de sobreamostragem incremental, esta será avaliada utilizando-se seis classificadores que representam distintos paradigmas de aprendizado de máquina: k-Nearest Neighbors [21], Decision Tree [22], Random Forest [23], Naive Bayes [24], Logistic Regression [25] e Support Vector Machine [26]. Esses classificadores foram selecionados por representarem diferentes paradigmas de aprendizado (instância, árvore, *ensemble*, probabilístico, linear e kernel), permitindo uma avaliação abrangente da estratégia proposta em cenários diversos.

III. O Método Proposto

O método de balanceamento incremental proposto é uma técnica iterativa voltada para bases de dados binárias desbalanceadas. O processo inicia-se com a divisão estratificada da base de dados em duas partes: a primeira (de treinamento) é utilizada para gerar amostras sintéticas e treinar o modelo, enquanto a segunda (de avaliação) é reservada para validar o ganho de desempenho e decidir sobre a inclusão das amostras geradas. Em cada iteração, um bloco de amostras é criado e adicionado à base de treinamento a partir da qual um modelo é treinado, seguido pela avaliação do desempenho deste modelo utilizando a base de avaliação. Se a métrica de desempenho apresentar melhoria, o bloco é mantido; do contrário, um novo bloco é gerado, e o ciclo se repete até que haja melhoria ou que o limite máximo de tentativas seja atingido. Esse processo é repetido para cada bloco até que o número previsto de blocos a serem adicionados seja alcançado. Ao final, as duas partes (treinamento e avaliação) são unidas, resultando em uma base de dados balanceada e pronta para modelagem preditiva. O funcionamento detalhado do método é apresentado através do fluxograma da figura 1.

ISBN: 978-989-36481-2-4

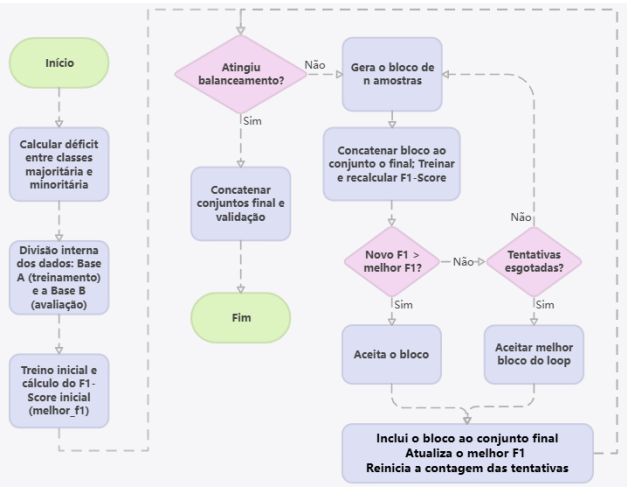


Figura 1. Método de amostragem incremental.

O fluxograma detalha o processo iterativo de balanceamento de classes, gerando e avaliando blocos sintéticos até atingir o balanceamento desejado, retornando o conjunto final balanceado.

Inicialmente, o método recebe como parâmetros de entrada a base de dados binária desbalanceada e a proporção de balanceamento desejada, que servirá de base para calcular o déficit entre as classes majoritária e minoritária. O déficit de instâncias (D) é calculado com base no número de instâncias da classe majoritária ($Nmaj$) e na proporção de balanceamento alvo (P), definida pelo usuário (onde $0<P\leq 1$). O objetivo é determinar quantas instâncias sintéticas ($Nsin$) devem ser adicionadas à classe minoritária original ($Nmin$) para que a nova proporção seja atingida. A fórmula para o cálculo do déficit é:

$$D = Nmaj \times P - Nmin \tag{2}$$

Na sequência, a base passa por uma divisão estratificada em duas partes, a Base A (treinamento) e a Base B (avaliação). Essa divisão garante que a proporção entre as duas classes seja mantida em ambas as partes. A primeira parte, Base A, é utilizada como base para a geração de amostras e treinamento do modelo. A segunda parte, Base B, é reservada para avaliação do desempenho do modelo. Essa divisão é crucial para garantir que o processo de balanceamento seja realizado de maneira controlada e que o modelo seja avaliado com dados que não fazem parte do treinamento.

Como o método envolve o treinamento e validação de modelos em cada iteração, é essencial especificar o classificador que será utilizado para treinar o modelo, o amostrador que irá gerar os elementos sintéticos e a métrica de desempenho para avaliar a eficácia das amostras geradas, que neste trabalho é o F1-Score.

Além disso, devido à natureza iterativa do algoritmo, é necessário informar o tamanho dos blocos de amostras que serão adicionados, bem como o limite máximo de tentativas para encontrar o melhor bloco.

Subsequentemente, inicia-se o processo de balanceamento incremental, no qual blocos de amostras são gerados e adicionados à base de treinamento (Base A). A cada inserção, o modelo é retreinado e o seu desempenho é reavaliado por meio do cálculo do F1-Score a partir da Base B, que atua como um conjunto de validação independente. Esse ciclo iterativo persiste até que se encontre um bloco que promova uma melhoria efetiva na métrica em relação ao melhor resultado anterior.

Se o limite de tentativas for atingido sem melhora na métrica de desempenho, o melhor bloco gerado durante a iteração é incluído na Base A. Isso garante que, mesmo sem melhoria contínua, o método ainda contribua para o equilíbrio das classes com a melhor opção disponível. Esse mecanismo de plano de contingência é importante para evitar que o processo fique preso em um loop infinito e para garantir que o balanceamento progrida de maneira eficiente.

Ao término do processo iterativo, a Base A, agora aprimorada com os blocos de amostras gerados e validados, é unida à Base B. A nova base resultante dessa união atinge o nível de balanceamento definido pelo usuário.

Experimentos preliminares com kNN e F1-Score permitiram correlacionar o desempenho obtido na validação dos blocos (F1-Interno) com o resultado final na base balanceada (F1-Final). Para garantir a imparcialidade, o F1-Final é calculado exclusivamente sobre os dados de teste da validação cruzada (5-fold), mantidos isolados de todas as etapas de geração e seleção de amostras. Na base abalone, observou-se uma forte correlação de Pearson (r = 0,83) entre as métricas (Figura 2), reforçando a hipótese de que a qualidade dos blocos inseridos influencia diretamente o desempenho do modelo final.

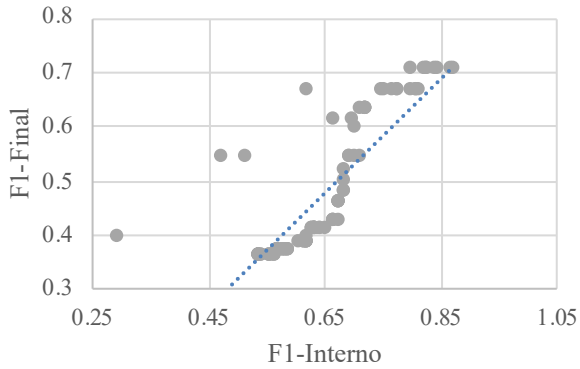


Figura 2. Diagrama de dispersão F1-Score para a base abalone.

IV. Resultados Experimentais

Os experimentos foram conduzidos utilizando 21 bases de dados binárias desbalanceadas, conforme detalhado na Tabela I, selecionadas dos repositórios UCI Machine Learning Repository, KEEL Imbalanced Datasets e Kaggle Datasets. Essas bases distinguem-se por sua ampla heterogeneidade em termos de número de instâncias, razão de desbalanceamento entre classes (número de instâncias minoritárias/número de instâncias majoritárias) e quantidade de atributos preditivos. Tal diversidade assegura uma avaliação abrangente e estatisticamente robusta da técnica de balanceamento incremental propostas, permitindo a generalização dos resultados para cenários reais heterogêneos.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

A Tabela I apresenta o nome da base, o número de instâncias da classe minoritária (min), o número de instâncias da classe majoritária (max) e a relação de desbalanceamento (min/max).

TABELA I. Bases analisadas

Id	*Base*	*Min*	*Min*	*Min/Max*
1	abalone	37	516	0,07
2	appendicitis	21	85	0,25
3	cleveland-0_vs_4	130	1640	0,08
4	diabetes	2680	5000	0,54
5	ecoli-0-1_vs_2-3-5	240	2200	0,11
6	ecoli-0-2-3-4_vs_5	200	1820	0,11
7	ecoli-0-2-6-7_vs_3-5	220	2020	0,11
8	ecoli-0-3-4_vs_5	200	1800	0,11
9	ecoli-0-3-4-6_vs_5	200	1850	0,11
10	ecoli-0-4-6_vs_5	200	1830	0,11
11	ecoli-0-6-7_vs_3-5	220	2000	0,11
12	ecoli-0-6-7_vs_5	200	2000	0,10
13	glass0	70	144	0,49
14	glass-0-1-2-3_vs_4-5-6	510	1630	0,31
15	glass-0-1-5_vs_2	170	1550	0,11
16	glass-0-4_vs_5	90	830	0,11
17	glass1	760	1380	0,55
18	haberman	810	2250	0,36
19	led7digit-0-2-4-5-6-7-8-9_vs_1	370	4060	0,09
20	new-thyroid1	350	1800	0,19
21	yeast-2_vs_8	20	462	0,04

Os experimentos foram conduzidos utilizando validação cruzada estratificada de 5 folds. Nessa abordagem, cada base de dados foi particionada em cinco blocos estratificados, cada um contendo exatamente 20% das instâncias totais, preservando rigorosamente a proporção original entre classes majoritária e minoritária em todos os folds. Em cada iteração, 80% dos dados foram destinados ao treinamento (com aplicação do balanceamento incremental) e 20% reservados exclusivamente para teste. Os resultados reportados correspondem à média das métricas obtidas nas cinco execuções da validação cruzada

Os algoritmos de classificação utilizados foram: k-Nearest Neighbors (kNN), Decision Tree (DTree), Random Forest (RF), Naive Bayes (NB), Logistic Regression (LogReg) e Support Vector Machine (SVM), todos implementados com as configurações padrão da biblioteca scikit-learn [27]. O scikit-learn constitui referência consolidada na comunidade de aprendizado de máquina por oferecer implementações eficientes, otimizadas e amplamente validadas.

As técnicas de balanceamento avaliadas incluem SMOTE, ADASYN, Borderline-SMOTE, SVMSMOTE e Random Oversampling (ROS), todas disponíveis nativamente na biblioteca imbalanced-learn, extensão especializada do scikit-learn para problemas de classes desbalanceadas.

Quanto aos parâmetros que definem o tamanho dos blocos de amostras e o número máximo de tentativas em função do tamanho das bases selecionadas, optou-se por adotar blocos com (1) uma instância e no máximo 20 tentativas de encontrar um bloco que melhore a métrica adotada. A escolha destes impactam no tempo de processamento e podem ser ajustados às especificidades das bases.

A escolha de blocos unitários (1 amostra sintética) com 20 tentativas máximas garante controle seletivo máximo, rejeitando individualmente instâncias ruins sem contaminar o conjunto acumulado ou distorcer distribuições em dados ruidosos/sobrepostos.

Diferente da sobreamostragem tradicional, essa abordagem evita a propagação de erros comuns em blocos maiores e estabelece um baseline rigoroso que prioriza a qualidade das instâncias. Tal configuração conservadora é essencial para validar o conceito em cenários extremos, especialmente em bases com alta escassez na classe minoritária, como a "yeast-2_vs_8" (apenas 20 instâncias), antes que otimizações de escala sejam aplicadas.

Para cada uma das bases analisadas, comparou-se sistematicamente o F1-Score obtido pela estratégia original de cada algoritmo de balanceamento (com aplicação única para atingir o balanceamento) com a proposta incremental utilizando o amostrador do respectivo algoritmo de balanceamento. Nos experimentos em ambas as estratégias, o nível de balanceamento adotado foi de 1:1. A Tabela II apresenta os resultados obtidos para a base "abalone".

TABELA II. Comparativo entre estratégias

Classificador	Algoritmo de Balanceamento	Estratégia Original	Estratégia Incremental
KNN	SMOTE	0,321381	**0,430523**
KNN	ADASYN	0,327815	**0,412384**
KNN	BorderlineSMOTE	0,394089	**0,418498**
KNN	SVMSMOTE	0,444348	**0,472251**
KNN	ROS	0,401588	**0,451429**
DTree	SMOTE	0,286032	**0,385413**
DTree	ADASYN	0,32942	**0,331933**
DTree	BorderlineSMOTE	0,276872	**0,332005**
DTree	SVMSMOTE	0,350427	**0,353649**
DTree	ROS	**0,347619**	0,330476
RF	SMOTE	0,352274	**0,395952**
RF	ADASYN	0,353355	**0,455618**
RF	BorderlineSMOTE	0,359514	**0,400135**
RF	SVMSMOTE	0,384266	**0,397427**
RF	ROS	0,316364	**0,325556**
NaiveBayes	SMOTE	0,180998	**0,360535**
NaiveBayes	ADASYN	0,186456	**0,344647**
NaiveBayes	BorderlineSMOTE	0,187057	**0,253677**
NaiveBayes	SVMSMOTE	0,194128	**0,286797**
NaiveBayes	ROS	0,207335	**0,369076**
LogReg	SMOTE	0,413014	**0,526102**
LogReg	ADASYN	0,411958	**0,489184**

ISBN: 978-989-36481-2-4

Classificador	Algoritmo de Balanceamento	Estratégia Original	Estratégia Incremental
LogReg	BorderlineSMOTE	0,44441	**0,481684**
LogReg	SVMSMOTE	0,478839	**0,492033**
LogReg	ROS	0,466502	**0,524233**
SVM	SMOTE	0,44757	**0,62549**
SVM	ADASYN	0,43731	**0,634524**
SVM	BorderlineSMOTE	0,457581	**0,594046**
SVM	SVMSMOTE	0,530763	**0,544669**
SVM	ROS	0,477731	**0,562257**

Os resultados obtidos para a base abalone (Tabela II) ilustram a superioridade do método incremental. Esses 30 cenários derivam do cruzamento entre os seis classificadores e os cinco amostradores. Em quase todos esses contextos, a estratégia proposta superou a original. Destaca-se o desempenho com o classificador SVM, onde o uso do SMOTE incremental elevou o F1-Score de 0,447 para 0,625, um ganho expressivo que demonstra a capacidade do método em selecionar instâncias que de fato auxiliam na definição da fronteira de decisão.

Na avaliação de desempenho das técnicas de balanceamento de classes, para garantir a confiabilidade dos resultados obtidos, optou-se por utilizar testes estatísticos não paramétricos. Esses métodos são mais flexíveis e adequados para comparar as diferentes estratégias de balanceamento, pois não dependem de pressupostos rígidos sobre a distribuição dos dados.

Neste estudo, o teste de Wilcoxon [28] foi empregado para validar se a diferença de desempenho entre as estratégias é estatisticamente significante. Enquanto o número de vitórias aponta a frequência da superioridade da estratégia incremental, o p-valor indica a robustez dessa vantagem. Para cada base, o teste processa os pares de resultados dos 30 cenários, garantindo que o sucesso medido pelo F1-Score não seja fruto de variações aleatórias na amostragem.

Embora o teste de Wilcoxon identifique a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as estratégias, os p-valores isoladamente não permitem determinar qual abordagem é superior. Para complementar essa distinção, utiliza-se o critério de número de vitórias, que quantifica a frequência com que cada estratégia obteve o melhor F1-Score dentro desses mesmos 30 cenários de avaliação por base de dados. Uma vitória é contabilizada sempre que uma estratégia supera a outra em um cenário específico, permitindo uma análise comparativa direta e robusta sobre a eficácia do método proposto.

TABELA III. Desempenho por base

Id	*Base*	*Wilcoxon*	Vitórias		
			Original	Incre-mental	empate
1	abalone	0,000000	1	29	0
2	appendicitis	0,000011	4	26	0
3	cleveland-0_vs_4	0,323454	18	12	0
4	diabetes	0,164184	17	13	0
5	ecoli-0-1_vs_2-3-5	0,004628	6	20	4
6	ecoli-0-2-3-4_vs_5	0,001113	5	25	0
7	ecoli-0-2-6-7_vs_3-5	0,002210	7	19	4
8	ecoli-0-3-4_vs_5	0,688336	14	16	0
9	ecoli-0-3-4-6_vs_5	0,000001	4	26	0
10	ecoli-0-4-6_vs_5	0,012505	5	24	1
11	ecoli-0-6-7_vs_3-5	0,000915	6	21	3
12	ecoli-0-6-7_vs_5	0,000216	5	22	3
13	glass0	0,032721	11	19	0
14	glass-0-1-2-3_vs_4-5-6	0,468834	14	15	1
15	glass-0-1-5_vs_2	0,140283	16	14	0
16	glass-0-4_vs_5	0,000069	22	5	3
17	glass1	0,280087	18	12	0
18	haberman	0,236652	15	15	0
19	led7dig-it-0-2-4-5-6-7-8-9_vs_1	0,304372	14	15	1
20	new-thyroid1	0,182836	6	16	5
21	yeast-2_vs_8	0,000002	3	27	0

Das 21 bases analisadas detalhadamente na Tabela III, a estratégia incremental obteve a maioria das vitórias em 15 bases (aprox. 71%). Em casos emblemáticos como as bases abalone, ecoli e yeast, a superioridade foi quase absoluta (ex: 29 vitórias em 30 cenários para a abalone). Tais resultados evidenciam que a abordagem incremental é significativamente mais robusta que a aplicação original dos amostradores.

Uma observação importante desta avaliação reside na correlação entre a superioridade numérica de vitórias e a significância estatística dos resultados. Ao analisar a Tabela III, observa-se que nas bases onde a estratégia incremental obteve a vasta maioria das vitórias (como abalone, ecoli e yeast), o teste de Wilcoxon apresentou p-valores extremamente baixos ($p<0,05$), confirmando que o ganho de desempenho não é fruto do acaso, mas sim da eficácia do método. Em contrapartida, nas raras bases onde a estratégia original obteve numericamente mais vitórias (como cleveland e glass-0-1-5_vs_2), os p-valores situaram-se acima do limiar de significância (todos com $p>0,14$). Isso demonstra que, mesmo quando a estratégia tradicional parece ser superior em termos absolutos, não há evidência estatística de que ela de fato supera o método incremental. Portanto, a abordagem proposta mostra-se não apenas mais eficaz na maioria dos cenários, mas também estatisticamente mais consistente e confiável para o tratamento do desbalanceamento de classes.

Embora o custo computacional por iteração seja superior ao de métodos de passo único, dado o ciclo de treinamento e validação para cada nova amostra, esse investimento reflete-se na precisão do modelo final. Para bases de grande volume, o método pode ser otimizado através do aumento do tamanho dos blocos, mantendo o controle de qualidade com menor custo de processamento.

ISBN: 978-989-36481-2-4

V. Conclusões

Este trabalho investigou o problema da classificação em bases de dados binárias com distribuição desbalanceada de classes, propondo uma estratégia de sobreamostragem incremental capaz de aprimorar o desempenho de modelos supervisionados em comparação às abordagens tradicionais de reamostragem. A proposta fundamenta-se na geração interativa e controlada de amostras sintéticas da classe minoritária, utilizando diferentes técnicas de amostragem amplamente consolidadas na literatura, aliada a um processo de avaliação contínua por meio do F1-Score.

Do ponto de vista metodológico, a proposta de balanceamento incremental introduz uma forma sistemática de seleção de blocos sintéticos, na qual apenas os blocos que resultam em ganho efetivo de desempenho, medido em uma base de validação independente, são incorporados ao conjunto de treinamento. Esse mecanismo, complementado por uma estratégia de plano de contingência para casos em que não há melhoria direta, permite um avanço gradual rumo ao balanceamento desejado, evitando tanto o acréscimo indiscriminado de instâncias artificiais quanto o risco de estagnação do processo.

Os resultados experimentais, obtidos a partir da aplicação do método em 21 bases de dados binárias desbalanceadas, com diferentes níveis de desbalanceamento, número de instâncias, atributos e domínios, evidenciam a efetividade da abordagem proposta. De maneira geral, a estratégia incremental apresentou F1-Score superior à estratégia original de sobreamostragem em grande parte das combinações de classificadores e amostradores avaliados, com destaque para cenários em que o desbalanceamento é mais acentuado. A análise estatística, baseada no teste de Wilcoxon, confirmou que, em várias bases, as diferenças observadas são estatisticamente significativas, e a contagem de vitórias mostrou que a abordagem incremental supera com frequência as estratégias originais.

Outro aspecto relevante é que a proposta foi avaliada em conjunto com seis classificadores de naturezas, o que permitiu verificar que os ganhos proporcionados pelo sobreamostragem incremental não se restringem a um único paradigma de aprendizado, mas se estendem a diferentes arquiteturas. Esse resultado reforça a robustez e a aplicabilidade da estratégia em cenários práticos variados, nos quais a escolha do classificador pode ser condicionada por requisitos específicos do problema.

Em síntese, os experimentos demonstram que a combinação de sobreamostragem incremental e avaliação iterativa baseada em F1-Score constitui uma alternativa promissora para o tratamento de bases desbalanceadas, especialmente em contextos em que a classe minoritária possui maior relevância, como na detecção de fraudes e em diagnósticos médicos.

Como trabalhos futuros, propõe-se: (i) investigar outros critérios de seleção e parada, incorporando métricas adicionais como G-mean e AUC-ROC; (ii) avaliar o custo computacional do método em comparação às abordagens tradicionais, analisando tempo de execução, consumo de memória e escalabilidade em bases de dados de grande volume; (iii) explorar estratégias adaptativas de ajuste automático do tamanho dos blocos sintéticos e do número máximo de tentativas em função das características da base de dados; e (iv) realizar uma comparação sistemática com métodos de sobreamostragem de próxima geração e abordagens híbridas, visando melhor contextualizar a contribuição do balanceamento incremental frente ao estado da arte.

Referências Bibliográfica

[1] R. Agra, F. N. B. De Souza, P. C. Soares, and G. L. Da Silva, "A comparative analysis between undersampling and oversampling approaches to data balancing", in 2023 18th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI), 2023, pp. 1–6.

[2] I. Brown and C. Mues, "An experimental comparison of classification algorithms for imbalanced credit scoring data sets", Expert Systems with Applications, vol. 39, no. 3, pp. 3446–3453, 2012.

[3] S. Shilaskar, A. Ghatol, and P. Chatur, "Medical decision support system for extremely imbalanced datasets", Information Sciences, vol. 384, pp. 205–219, 2017.

[4] G. Cohen, M. Hilario, H. Sax, S. Hugonnet, and A. Geissbuhler, "Learning from imbalanced data in surveillance of nosocomial infection", Artif. Intell. Med., vol. 37, no. 1, pp. 7–18, May 2006.

[5] D. C. Li, C.W. Liu, and S. C. Hu, "A learning method for the class imbalance problem with medical data sets", Computers in Biology and Medicine, vol. 40, no. 5, pp. 509–518, 2010.

[6] Z. Wang, J. Xie, and J. Zhang, "A Robust Enhanced Ensemble Learning Method for Breast Cancer Data Diagnosis on Imbalanced Data", IEEE Access, vol. 12, pp. 189776–189788, 2024.

[7] F. Provost and T. Fawcett, "Robust Classification for Imprecise Environments", Machine Learning, vol. 42, no. 3, pp. 203–231, Mar. 2001.

[8] H. He and E. A. Garcia, "Learning from imbalanced data", IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, vol. 21, no. 9, pp. 1263–1284, 2009.

[9] B. Krawczyk, "Learning from Imbalanced Data: Open Challenges and Future Directions", Progress in Artificial Intelligence, vol. 5, no. 4, pp. 221–232, 2016.

[10] I. Albisua, O. Arbelaitz, I. Gurrutxaga, A. Lasarguren, J. Muguerza, and J. M. Pérez, "The quest for the optimal class distribution: an approach for enhancing the effectiveness of learning via resampling methods for imbalanced data sets", Progress in Artificial Intelligence, vol. 2, pp. 45–63, 2012.

[11] G. Haixiang, L. Yijing, J. Shang, G. Mingyun, H. Yuanyue, and G. Bing, "Learning from class-imbalanced data: Review of methods and applications", Expert Systems with Applications, vol. 73, pp. 220–239, 2017.

[12] V. López, A. Fernández, J. G. Moreno-Torres, and F. Herrera, "Analysis of preprocessing vs. cost-sensitive learning for imbalanced classification. Open problems on intrinsic data characteristics", Expert Systems with Applications, vol. 39, no. 7, pp. 6585–6608, 2012.

[13] O. Loyola-González, J. F. C. O. Martínez-Trinidad, J. A. Carrasco-Ochoa, and M. García-Borroto, "Cost-Sensitive Pattern-Based classification for Class Imbalance problems", IEEE Access, vol. 7, pp. 60411–60427, 2019.

14[] N. V. Chawla, K. W. Bowyer, L. O. Hall, and W. P. Kegelmeyer, "SMOTE: synthetic minority over-sampling technique", J. Artif. Int. Res., vol. 16, no. 1, pp. 321–357, June 2002.

[15] A. Fernández, S. García, M. Galar, R. C. Prati, B. Krawczyk, and F. Herrera, Learning from Imbalanced Data Sets. Springer, 2018.

[16] H. He, Y. Bai, E. A. Garcia, and S. Li, "ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning", in 2008 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence), 2008, pp. 1322–1328.

[17] H. Han, W.-Y. Wang, and B.-H. Mao, "Borderline-SMOTE: A new over-sampling method in imbalanced datasets learning", in International Conference on Intelligent Computing, 2005, pp. 878–887.

[18] C. Bunkhumpornpat, K. Sinapiromsaram, and C. Lursinsap, "SVMS-MOTE: A novel SVM-based oversampling method for imbalanced data", Journal of Research and Practice in Information Systems, vol. 7, no. 1, pp. 5–22, 2011.

[19] G. E. Batista, R. C. Prati, and M. C. Monard, "A study of the behavior of several methods for balancing machine learning training data", ACM SIGKDD Explorations Newsletter, vol. 6, pp. 20–29, 2004.

[20] P. Branco, L. Torgo, and R. P. Ribeiro, "A Survey of Predictive Modeling on Imbalanced Domains", ACM Computing Surveys, vol. 49, no. 2, pp. 1–50, 2016.

[21] T. Cover and P. Hart, "Nearest neighbor pattern classification", IEEE Transactions on Information Theory, vol. 13, no. 1, pp. 21–27, 1967.

ISBN: 978-989-36481-2-4

[22] J. R. Quinlan, “Induction of decision trees”, Machine Learning, vol. 1, pp. 81–106, 1986.
[23] L. Breiman, “Random forests”, Machine Learning, vol. 45, pp. 5–32, 2001.
[24] G. H. John and P. Langley, “Estimators for probabilistic component”, Machine Learning International Workshop, pp. 361–368, 1995.
[25] D. W. Hosmer Jr, S. Lemeshow, and R. X. Sturdivant, Applied Logistic Regression. Wiley, 2013.
[26] C. Cortes and V. Vapnik, “Support-vector networks”, Machine Learning, vol. 20, pp. 273–297, 1995.
[27] L. Buitinck et al., “API design for machine learning software: experiences from the scikit-learn project”, in ECML PKDD Workshop: Languages for Data Mining and Machine Learning, 2013, pp. 108–122.
[28] F. Wilcoxon, “Individual Comparisons by Ranking Methods”, Biometrics Bulletin, vol. 1, no. 6, pp. 80–83, 1945.

ISBN: 978-989-36481-2-4

TIC y Educación de Calidad: Evaluación de su Impacto en el Proceso de Enseñanza-Aprendizaje en el Contexto Preuniversitario

ICT and Quality Education: Evaluating Their Impact on the Teaching-Learning Process in the Pre-University Context

Nayade Vanessa Domenech Polo[1], Santiago Fernando Pineda Rosales[1], Xiomara Josefina Bastardo Contreras[1]
[1]Universidad Tecnológica Empresarial de Guayaquil, Facultad de estudios de Posgrado
Guayaquil, Ecuador
ndomenech@uteg.edu.ec, p.santiago@uteg.edu.ec, xbastardo@uteg.edu.ec

***Resumen* — El presente articulo analiza el impacto del uso de las Tecnologías de la Información y Comunicación en el proceso de enseñanza-aprendizaje en el Preuniversitario William James durante el periodo lectivo 2025, teniendo como objetivo principal evaluar cómo influyen las TIC en el rendimiento académico y en la práctica pedagógica de los docentes. Para lograr este propósito se aplicó una metodología cuantitativa con diseño no experimental, de tipo transversal y de alcance descriptivo-correlacional, la recolección de datos se realizó mediante encuestas estructuradas dirigidas a los estudiantes y la observación directa en el aula. En cuanto al análisis estadístico, se empleó la técnica de regresión lineal simple, por medio el software SPSS, incluyendo tablas e histogramas que permitieron determinar la relación entre el uso de TIC y el rendimiento académico de los estudiantes, A partir de este análisis se evidenció que la integración de las TIC fortaleció el aprendizaje autónomo, resaltando su relevancia en la práctica educativa. En consecuencia, se concluye que factores como la capacitación docente, la infraestructura tecnológica disponible y la planificación pedagógica son elementos claves para garantizar una educación de calidad. De este modo, se plantea la necesidad de establecer programas de formación continua en competencias digitales, con el fin de optimizar el uso de las TIC en los preuniversitarios del país. Finalmente, los resultados obtenidos demostraron la existencia de una correlación positiva, ya que los estudiantes que utilizaron los recursos digitales con mayor frecuencia mostraron un mejor desempeño académico, siendo más participativos en las clases.**

***Palabras Clave* – TIC, rendimiento académico, recursos digitales, preuniversitario, docentes, estudiantes.**

***Abstract* — This article analyzes the impact of the use of Information and Communication Technologies on the teaching-learning process at the William James Pre-University during the 2025 academic year. The main objective is to evaluate how ICTs influence academic performance and the pedagogical practice of teachers. To achieve this purpose, a quantitative methodology with a non-experimental, cross-sectional design and descriptive-correlational scope was applied. Data collection was carried out through structured surveys directed at students and direct observation in the classroom. Regarding the statistical analysis, the simple linear regression technique was used, through SPSS software, including tables and histograms that allowed determining the relationship between the use of ICTs and students' academic performance. From this analysis, it was evident that the integration of ICTs strengthened autonomous learning, highlighting their relevance in educational practice. Consequently, it is concluded that factors such as teacher training, available technological infrastructure, and pedagogical planning are key elements in ensuring quality education. Thus, there is a need to establish ongoing training programs in digital skills to optimize the use of ICTs in the country's pre-university programs. Finally, the results obtained demonstrated a positive correlation, as students who used digital resources more frequently showed better academic performance and were more participatory in classes.**

Keywords – ICT, academic performance, digital resources, pre-university, teachers, students.

I. Introducción

En la actualidad, el rápido avance de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) ha cambiado de forma significativa muchos aspectos de la sociedad, especialmente en el campo de la educación. La integración de los recursos digitales, plataformas tecnológicas educativas, contenidos multimedia y conectividad a internet ha transformado las dinámicas tradicionales de enseñanza y aprendizaje en el aula, ya que permite la implementación de nuevos modelos pedagógicos más flexibles, inclusivos y tecnológicos que se centra en el estudiante. Sin embargo, esta transformación no solo consiste en utilizar equipos o herramientas tecnológicas, sino que también implica un cambio en la manera de pensar y como el estudiante utiliza la tecnología para fines educativos. Para que las TICs aporten un valor significativo en la educación se debe realizar un cambio en las prácticas pedagógicas, construyendo nuevas estrategias educativas que implementen tecnología vinculadas con los recursos humanos [1].

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

El impacto de las TICs en el campo de la educación depende de la capacidad que tiene los docentes para innovar la educación y de las instituciones educativas que adquieren tecnología dentro de sus campus escolares, para consolidar un conocimiento con estrategias metodológicas innovadoras mejorando así la educación. Investigaciones recientes demuestran que cuando los docentes demuestran que tienen habilidades en competencias digitales y reciben formación continua son capaces de diseñar experiencias de aprendizaje activas, motivadoras e inclusivas que contribuyen a mejorar el rendimiento académico de los estudiantes [2]; [3]. Por ello, es importante utilizar el modelo TPACK [4], para generar los conocimientos tecnológicos, pedagógicos y de contenido, permitiendo un uso efectivo de las TIC en el aula.

Además, metodologías como el aula invertida y el aprendizaje hibrido, ha transformado la educación, ya que los estudiantes pueden estudiar los conceptos teóricos desde sus hogares, permitiendo la autoeducación y que utilicen el tiempo de clase para la resolución de problemas el trabajo colaborativo y la aplicación práctica de los conocimientos. Utilizar estas estrategias o metodologías incrementan la participación y el compromiso de los estudiantes [5], ayudando a fortalecer sus habilidades cognitivas y sociales. Sin embargo, el uso de la tecnología si una adecuada planificación pedagógica puede convertirse en un recurso limitado sin resultados [6]. Por lo tanto, se debe aplicar nuevas metodologías de estudio implementando dispositivos tecnológicos, plataformas digitales y tecnología con conciencia, para obtener resultados positivos en el ámbito educativo y transformar la educación hacia un modelo integral y sostenible.

El potencial de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en la transformación de los procesos educativos es necesario comprender que su uso efectivo enfrenta muchos desafíos, particularmente en entornos educativos como los preuniversitarios. Entre los principales obstáculos se encuentran la resistencia al cambio por parte de algunos actores educativos, la persistente brecha digital y la falta de formación continua en competencias tecnológicas. Estas limitaciones dificultan la integración pedagógica de las TIC y reducen su impacto positivo en el aprendizaje [7]. Estos problemas se agravan en contextos donde no existe una cultura institucional orientada a la innovación ni políticas claras que promuevan la actualización docente y la integración tecnológica de manera sistemática [8], [9].

Es importante resaltar que la tecnología por sí sola no garantiza tener mejores resultados de aprendizaje, por lo que se debe incorporar un marco pedagógico bien estructurado, donde el uso de herramientas digitales esté alineado con los objetivos educativos y sean las adecuadas. En este sentido, la creación de espacios virtuales debe estar orientada a la participación activa del estudiante, fomentando su compromiso en el ámbito educativo. Además de facilitar una mayor motivación, estos entornos digitales también fomentan la independencia, por medio del desarrollo personal y académico de los estudiantes. Sin embargo, para que esto se pueda cumplir, es esencial la orientación adecuada por parte del docente, para que garantice un aprendizaje significativo y bien guiado

En Ecuador, existen muchos desafíos en la incorporación de las TIC en los establecimientos educativos y más en los preuniversitario, donde los estudiantes se preparan para ingresar a la educación superior. El Preuniversitario William James, ubicado en Ibarra-Ecuador, ha implementado recursos tecnológicos para mejorar la calidad de la educación, sin embargo, existe dificultades en la capacitación docente digital, porque no existe una planificación pedagógica, ni infraestructura tecnológica para que todos los estudiantes puedan acceder a una educación del siglo XXI. La importancia de este estudio no solo radica en analizar el impacto de las TIC en el rendimiento académico de los estudiantes, sino también en comprender cómo estas herramientas pueden transformar las prácticas docentes, para construir un modelo educativo más inclusivo, tecnológico y sostenible [10].

Este análisis es necesario, ya que la educación preuniversitaria es importante para otorgar a los estudiantes habilidades necesarias para enfrentar los desafíos en la educación superior. Sin una integración adecuada de las TIC en la educación secundaria. Los estudiantes no pueden ingresar a la universidad, porque no tienen habilidades académicas necesarias para prosperar en la educación superior, ya que no tienen contextos altamente digitalizados. Por lo tanto, hay la necesidad de integración de las TIC en la educación [11].

En este sentido, el presente estudio permite comprender el impacto de las TIC en un preuniversitario específico de Ecuador. Siendo así que el objetivo principal es evaluar el impacto del uso de las TIC en el proceso de enseñanza-aprendizaje en el Preuniversitario William James durante el período lectivo 2025, identificando sus limitaciones en tecnología e infraestructura, sus alcances y oportunidades para mejorar la educación. De esta manera el estudio se centra en identificar los cambios tecnológicos realizados y el desarrollo de las actividades académicas tecnológicas implementadas en el Preuniversitario William James, en los años 2024 y 2025. Con el propósito de analizar cuáles son los beneficios y oportunidades que los estudiantes en el proceso de enseñanza-aprendizaje moderno y verificar como mejoro la educación, para que los estudiantes puedan cumplir con sus objetivos que es el ingreso a las universidades y acceder a la educación superior.

II. Materiales y métodos

El presente estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, que permite describir, medir y establecer una relación entre las variables que van a ser medibles como el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) y el rendimiento académico de los estudiantes del Preuniversitario William James. Este enfoque permite obtener datos objetivos para analizar las tendencias estadísticas y cumplir con los objetivos de la investigación [12].

A. Diseño y nivel de investigación

Esta investigación tiene un diseño no experimental de tipo transversal [13], ya que solo se observan las variables en su contexto original, sin ser modificadas o manipuladas, lo que permite al investigador describir las condiciones actuales del uso de TIC en el proceso educativo del Preuniversitario William James. Su nivel es descriptivo-correlacional, porque identifica y caracteriza el tipo de TIC utilizada en el proceso de enseñanza-aprendizaje permitiendo que el estudiante mejore su rendimiento académico con efectividad educativa y es correlacional, ya que determina si existe una relación entre el uso de TIC y el rendimiento académico de los estudiantes.

ISBN: 978-989-36481-2-4

B. Población e Instrumentos de recolección de datos

Se empleó un muestreo no probabilístico por conveniencia, dado que la selección de los participantes se realizó considerando la accesibilidad y la disposición voluntaria de los estudiantes para participar en la investigación. Este tipo de muestreo es apropiado en contextos educativos donde no siempre es posible garantizar condiciones de aleatoriedad estricta, especialmente en estudios aplicados en entornos institucionales específicos.

En este sentido, la muestra quedó conformada por 67 estudiantes de una población total de 120, lo que representa aproximadamente el 55,8% del universo de estudio. Más que responder a criterios de inferencia estadística probabilística, el tamaño de la muestra se justificó en términos de suficiencia analítica y viabilidad operativa, asegurando la recolección de datos relevantes para identificar tendencias y relaciones entre variables.

Siguiendo a Roberto Hernández Sampieri, en estudios de alcance descriptivo-correlacional con muestreo no probabilístico, el énfasis no radica en la generalización estadística, sino en la profundidad del análisis contextual y la coherencia interna del diseño [13];[14]. En consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse dentro del contexto específico del Preuniversitario William James, sin pretensión de extrapolación a otras poblaciones.

Para la recolección de datos se utilizó encuestas estructuradas de forma digital diseñadas en el programa Google Forms, para ser aplicada a los estudiantes y también se utilizó la observación directa en el aula lo que permitió obtener información y datos confiables para la investigación. En cuanto al análisis estadístico, se empleó la técnica de regresión lineal simple, por medio el software SPSS, incluyendo tablas e histogramas que permitieron determinar la relación entre el uso de TIC y el rendimiento académico de los estudiantes, A partir de este análisis se evidenció que la integración de las TIC fortaleció el aprendizaje autónomo, resaltando su relevancia en la práctica educativa.

C. Variables de la investigación

Para este estudio se utilizó dos variables principalmente: el uso de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) como variable independiente y el rendimiento académico como variable dependiente, ambas de carácter cuantitativo.

El uso de las TIC es el conjunto de herramientas digitales y recursos tecnológicos que utilizan los docentes y los estudiantes en el proceso de enseñanza-aprendizaje, para enriquecer la experiencia educativa y facilitar el modo de estudio actual. Esta variable tiene tres dimensiones, la primera es la accesibilidad donde se analiza la disponibilidad de internet y dispositivos que tienen los estudiantes en el proceso de aprendizaje, la segunda dimensión es la frecuencia de uso de las herramientas digitales donde se verifica la cantidad de tiempo semanal que interactúan los estudiantes con las tecnologías y la última dimensión es la aplicación pedagógica, donde se identifica las actividades educativas adecuadas por medio de una planificación guiada con tecnología para mejorar la educación y tener un enfoque pedagógico innovador que promueva la participación activa del estudiante [15]. Para recolectar información sobre esta variable, se aplicó una encuesta estructurada dirigida a los estudiantes.

Por otro lado, para el rendimiento académico se define como los niveles de logros alcanzados por los estudiantes en debes, evaluaciones y actividades educativas, principalmente en el promedio de calificaciones y en la participación activa en el proceso de aprendizaje, para su análisis se estable dos dimensiones la primera es el desempeño académico expresado en las notas obtenidas y la segunda es la participación activa de los estudiantes, donde se puede evidenciar el cumplimiento de las tareas [16].

En síntesis, la operacionalización de estas variables permite medir indicadores que proporcionan una mejor comprensión de la integración de las TICs en el aula y también como puede influir positivamente en el rendimiento académico de los estudiantes al mejorar no solo sus logros cuantitativos, sino también su motivación y participación activa dentro del aula.

D. Técnicas para la recolección de datos.

Se aplicaron dos técnicas principales de recolección de información, la primera es la observación directa no participativa y la segunda es la encuesta estructurada. La elección de estas técnicas se debe a que se tiene la necesidad de obtener datos cualitativos complementarios que permitan validad esta investigación para tener resultados confiables y cumplir los objetivos de este estudio [17].

En primer lugar, se aplicó la encuesta estructurada, diseñada con una escala Likert de 1 a 5 puntos y aplicada mediante un formulario digital en Google Forms con 25 preguntas orientadas a medir las variables, uso de TIC (variable independiente) y rendimiento académico (variable dependiente). La razón de implementar esta técnica es porque permite recopilar datos de manera sistemática y estandarizada de todos los estudiantes encuestados, facilitando el análisis comparativo de datos y la identificación de patrones de comportamiento, gracias a esto es posible valorar los aspectos, como la accesibilidad tecnológica, la frecuencia de uso de las TIC y su aplicación pedagógica, así como el autoaprendizaje de los estudiantes con su desempeño y participación académica.

En segundo lugar, se utilizó la observación directa no participativa, que se realizó durante las clases dictadas. A través de esta técnica se registraron las participaciones de los estudiantes con las herramientas digitales, verificando su nivel de participación en las actividades académicas y como integran las TICs en la práctica pedagógica Esta técnica se justifica porque permite obtener información empírica en tiempo real, contrastando la realidad observada en el aula con las respuestas emitidas en la encuesta.

En conjunto, la aplicación de estas dos técnicas no solo aportó datos cuantitativos y cualitativos, sino que también ofreció una visión más amplia y enriquecida del objeto de estudio. Siendo posible comprender con mayor facilidad y profundidad como se integra las TICS en el ámbito educativo por medio de estrategias pedagógicas, que influye en el rendimiento académico de los estudiantes.

E. Análisis de datos.

Los datos obtenidos fueron analizados mediante una estadística descriptiva e inferencial, se estimaron medidas de tendencia central y se estimó la relación entre las variables a través

ISBN: 978-989-36481-2-4

de un análisis de regresión lineal entre las variables dependientes e independientes se utilizó el software SPSS versión 26. La regresión permitió medir la influencia del uso de TIC sobre el rendimiento académico. Se elaboraron histogramas y tablas para facilitar la interpretación visual de los resultados. Este análisis fue fundamentado en metodologías contemporáneas utilizadas en estudios correlacionales con TIC [18]. Se realizó una encuesta con preguntas cerradas de selección múltiple, a una muestra significativa de estudiantes del Preuniversitario William James, para así continuar con el proceso de la investigación.

La metodología se basó en estudios recientes que evidencian la importancia de la integración tecnológica en la educación. El modelo TPACK, adaptado a entornos digitales y de inteligencia artificial, ha demostrado ser efectivo en competencias docentes y resultados académicos., también el uso del modelo flipped classroom ha sido ampliamente validado en contextos preuniversitarios, mostrando un impacto positivo en el aprendizaje activo y en el desarrollo del pensamiento crítico, con respecto al aprendizaje significativo, motivación académica y autoaprendizaje [19], [5], [20].

III. Resultados-discusión

Se obtienen como principales resultados de que la implementación de Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) en el Preuniversitario William James generó impactos positivos en acceso, disponibilidad tecnológica, participación activa en clase y compromiso de los estudiantes para un mejor rendimiento académico. Los datos obtenidos indicaron respuestas favorables para todos los indicadores y, en la mayoría de los casos, superaron el umbral de aceptación del 75%. Estos resultados, junto con la literatura reciente, sugieren que la disponibilidad de recursos tecnológicos, metodologías de enseñanza activas y la presencia de profesores con habilidades digitales mejoraron la motivación, el compromiso y el rendimiento académico de los estudiantes. Seguido de esto, se presenta el análisis detallado de todos estos hallazgos obtenidos.

A. Acceso y disponibilidad tecnológica

El análisis mostró que el 77,6 % de los estudiantes disponían un acceso adecuado a internet y dispositivos tecnológicos, condición necesaria para implementar las estrategias educativas basadas en TIC. Este hallazgo coincidió con lo planteado por Villao y Matamoros [21], quienes señalaron que la conectividad y la disponibilidad de equipos son requisitos fundamentales para garantizar una educación digital equitativa. Asimismo, Okoye et al., [22] resaltaron que la ausencia de estas condiciones limita el desarrollo de metodologías activas mediadas por tecnología. El bajo porcentaje de respuestas negativas 6 % indicó que la brecha tecnológica fue mínima en este estudio, como lo muestra la Tabla 1. Acceso a internet y dispositivos tecnológicos.

TABELA I. Acceso a internet y dispositivos tecnológicos.

Escala Likert	Número de Estudiantes	Porcentajes
Nada de acuerdo	3	4,5%
En desacuerdo	1	1,5%
Neutral	11	16,4%
De acuerdo	17	25,4%
Muy de acuerdo	35	52,2%
Total	67	100%

También se realizó un análisis de frecuencias en el acceso a internet y dispositivos tecnológicos, para encontrar la media y la desviación estándar de los estudiantes encuestados por medio del software SPSS como se muestra en la Figura 1. Histograma de acceso a internet y dispositivos tecnológicos.

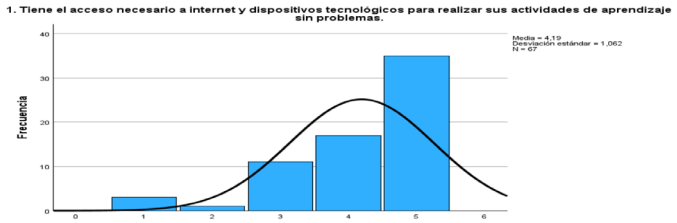


Figura 1. Histograma de acceso a internet y dispositivos tecnológicos

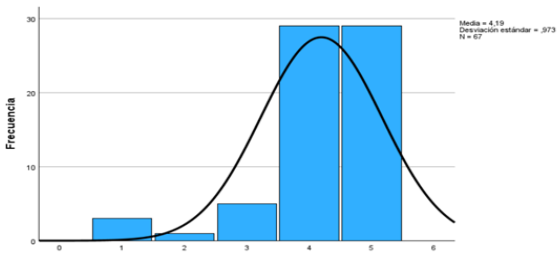
B. Participación y eficacia en el aula con el uso de las TICs

En este caso el 86,6% de los estudiantes, mencionaron que las herramientas tecnológicas hicieron que las clases sean más didácticas, fáciles de aprender con tecnología e innovación y que su participación en los proyectos de aula mejoren su rendimiento académico. Esto concuerda con los hallazgos de Rafiq et al., [23], quienes, demostraron que la incorporación de tecnología en clases, mejora el compromiso y la colaboración de los estudiantes con el proceso de enseñanza y aprendizaje moderno. Como lo muestra la Tabla 2. Participación en proyectos de aula.

TABELA II. Participación en proyectos de aula

Escala Likert	Número de Estudiantes	Porcentajes
Nada de acuerdo	3	4,5%
En desacuerdo	1	1,5%
Neutral	5	7,5%
De acuerdo	29	43,3%
Muy de acuerdo	29	43,3%
Total	67	100%

También se realizó un análisis de frecuencias con la participación y eficacia en el aula de los estudiantes, para encontrar la media y la desviación estándar de los encuestados por medio del software SPSS como se muestra en la Figura 2. Histograma de participación y eficacia en el aula.



2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Figura 2. Histograma de participación y eficacia en el aula

C. *Impacto en el rendimiento académico*

El 77,6 % de los estudiantes encuestados confirmaron que el uso de TIC los apoyó para mejorar las calificaciones, lo que confirma que la hipótesis, que se planteó al inicio funcional. Este resultado coincide con lo señalado por Gonzales [24], que destaca que la utilización de tecnologías en conjunto con metodologías activas, así como la adecuada formación en competencias digitales de los docentes, generan cambios significativos y sostenibles en el rendimiento académico. Los resultados sugieren la idea de que las TIC son utilizadas favorablemente en contextos donde se perciben más oportunidades de aprendizaje y resultados positivo en la enseñanza-aprendizaje moderno. Como lo muestra la Tabla 3. Mejora en el rendimiento académico por medio de las TIC.

TABELA III. Mejora en el rendimiento académico por medio de las TIC

Escala Likert	Nº Estudiantes	Porcentajes
Nada de acuerdo	4	6,0%
En desacuerdo	1	1,5%
Neutral	10	14,9%
De acuerdo	31	46,3%
Muy de acuerdo	21	31,3%
Total	67	100%

Se realizó un análisis de frecuencias para verificar el las mejoras del rendimiento académico por medio de las TIC, encontrando la media y la desviación estándar de los encuestados por medio del software SPSS como se muestra en la Figura 3. Histograma de participación y eficacia en el aula.

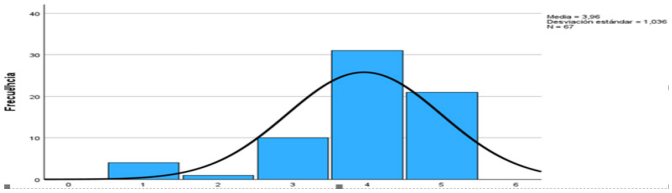


Figura 3. Histograma de rendimiento académico por medio de las TIC

D. *Implicaciones*

Los resultados indican que la mejora en los procesos educativos no solo requiere el uso de recursos tecnológicos, sino también la integración de estos recursos dentro del marco pedagógico que promueve la participación activa, la colaboración y el aprendizaje significativo de los estudiantes. La disponibilidad de infraestructura pedagógica y tecnológica debe ir acompañada de estrategias de motivación e interacción de las competencias digitales de los docentes.

Además, el acceso equitativo a la tecnología muestra que se reduce la brecha de oportunidad educativa y el aprendizaje se vuelve más inclusivo. La integración de herramientas digitales aumenta el compromiso de los estudiantes y conduce a un mejor rendimiento académico. De esta manera, la tecnología se convierte en un potenciador del aprendizaje siempre que su uso esté acompañado de una planificación educativa coherente centrada en el desarrollo integral de los estudiantes.

E. *Impacto en el rendimiento académico*

Por encima de los hallazgos descriptivos, los resultados obtenidos permiten ubicar la integración de las TIC dentro de marcos conceptuales más amplios vinculados a la transformación digital educativa. Particularmente, la evidencia empírica que se obtuvo se alinea perfectamente con enfoques contemporáneos, los cuales destacan que la tecnología no actúa como un factor aislado, sino como un elemento o componente consistente dentro de los ecosistemas educativos digitales.

Desde el punto de vista de los sistemas de información educativos, la incorporación de TIC en el aula puede entenderse como parte de un proceso de digitalización institucional, los cuales requieren articulación entre infraestructura, gestión académica y analítica de datos. Desde esta perspectiva, los resultados muestran que el uso frecuente de herramientas digitales además de mejorar el rendimiento académico, también genera datos educativos valiosos que podrían ser utilizados para la toma de decisiones pedagógicas basadas en evidencia [17].

Igualmente, desde el enfoque de políticas digitales, los resultados muestran la necesidad de avanzar hacia estrategias más estructurales que aventajen la implementación instrumental de la tecnología. En educación digital, la transformación educativa requiere políticas que integren formación docente, acceso equitativo y modelos pedagógicos innovadores [25]. En el ámbito ecuatoriano, esto conlleva a fortalecer programas de capacitación continua y garantizar condiciones de conectividad sostenible.

Por otra parte, el estudio puede entenderse a la luz del modelo TPACK, el cual plantea que la integración efectiva de las TIC depende de la interacción entre conocimiento tecnológico, pedagógico y disciplinar. Los resultados evidencian que cuando estas dimensiones se articulan adecuadamente, se conlleva a mejoras significativas en la participación y el aprendizaje, lo que refuerza la validez de este modelo en contextos preuniversitarios.

En materia de innovación, pese a que el diseño metodológico es descriptivo correlacional, la contribución del estudio radica en su aplicación contextualizada, al analizar empíricamente la relación entre TIC y rendimiento académico en un entorno preuniversitario específico, contribuyendo así a mitigar la brecha de estudios en este nivel educativo, frecuentemente menos explorado en la literatura científica.

Finalmente, los hallazgos permiten proponer un enfoque de integración tecnológica progresiva, donde las TIC no solo se incorporan como herramientas didácticas, sino como elementos estructurales en la reconfiguración del proceso educativo, favoreciendo modelos híbridos, aprendizaje autónomo y entornos digitales colaborativos.

IV. Conclusiones

Los resultados de esta investigación muestran que la integración de las Tecnologías de la Información y la Comunicación en el Preuniversitario William James no solo mejora el acceso a recursos y la conectividad, sino que transforma de forma pos-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

itiva la enseñanza dinámica y explicativa del aula de clase. Los estudiantes mostraron mayor motivación, participación activa y compromiso con las actividades académicas, mientras que los docentes fortalecieron sus competencias digitales y adaptaron sus metodologías a entornos educativos más interactivos y dinámicos. Estos hallazgos confirman que la tecnología, aplicada con un propósito pedagógico, puede convertirse en un aprendizaje innovador y tecnológico en la educación actual.

La investigación demuestra que la relación entre una adecuada infraestructura educativa con tecnológica, la formación continua de los docentes y las estrategias metodológicas innovadoras, forman un pilar fundamental para la creación de entornos inclusivos, motivadores y con un alto impacto. Las evidencias recogidas coinciden en que la tecnología, si se una coherentemente a la metodología y a los objetivos pedagógicos, contribuye, no solamente a mejorar el rendimiento educativo, sino que también estimula la participación del estudiante, el desarrollo de las competencias digitales para mejorar la calidad del proceso educativo.

Como último apartado, el estudio da lugar a nuevas perspectivas del ámbito de la investigación educativa, como el análisis del uso de las TIC en diferentes áreas del currículum o planificación, que permita la correcta medición de las competencias digitales y también en el estudio de cómo estas TIC se relacionan con el desarrollo de habilidades cognitivas, como el pensamiento crítico o la creatividad. Todos estos retos son oportunidades para consolidar un modelo educativo en el que la tecnología sea un medio que ayude a potenciar las capacidades humanas, que permita reducir brechas y construir experiencias de aprendizaje más integradas, para mejorar el rendimiento académico de los estudiantes.

Referências Bibliográfica

[1] M. E. Del Moral Pérez, M. C. Bellver Moreno y A. P. Guzmán Duque, "Dimensiones del ecosistema digital universitario," Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa (RELATEC), vol. 19, no. 1, pp. 9–27, 2020, doi: https://doi.org/10.17398/1695-288X.19.1.9.

[2] M. A. Nacenta, J. M. Sancho y J. Barroso Osuna, "Digital transformation in education: Opportunities and challenges post-pandemic," Computers and Education Open, vol. 4, art. no. 100104, 2023, doi: https://doi.org/10.1007/978-3-031-43393-1_1.

[3] V. B. Gómez Pablos, L. A. Casado Aranda y M. Matarranz, "Teachers' digital competencies in higher education: A systematic literature review," International Journal of Educational Technology in Higher Education, vol. 19, no. 1, 2022, doi: http://dx.doi.org/10.1186/s41239-021-00312-8.

[4] F. D. Guillén Gámez, M. J. Mayorga Fernández y M. Ramos Navas, "Application of the TPACK model in teachers during the COVID-19 pandemic: A systematic review," Education and Information Technologies, vol. 27, no. 4, pp. 4901–4928, 2022.

[5] K. Hava, "A systematic review of flipped learning in EFL," Malaysian Online Journal of Educational Technology, vol. 12, no. 4, pp. 175–188, 2024, doi: http://dx.doi.org/10.52380/mojet.2024.12.4.556.

[6] C. Cobo, "Innovación educativa en la era digital," Revista Iberoamericana de Educación, no. 90, pp. 11–32, 2022.

[7] A. Bozkurt y R. C. Sharma, "Digital transformation and the way we (mis) interpret technology," Asian Journal of Distance Education, vol. 17, no. 1, pp. 1–7, 2022, doi: https://doi.org/10.5281/zenodo.6362290.

[8] R. Camacho Marín, C. Rivas Vallejo, M. Gaspar Castro y C. Quiñonez Mendoza, "Innovación y tecnología educativa en el contexto actual latinoamericano," Revista de Ciencias Sociales, vol. 26, pp. 460–472, 2020, doi: https://doi.org/10.31876/rcs.v26i0.34139.

[9] P. V. Basilotta Gómez, M. Matarranz y L. A. Casado Aranda, "Teachers' digital competencies in higher education: A systematic literature review," International Journal of Educational Technology in Higher Education, vol. 19, pp. 3–15, 2022, doi: https://doi.org/10.1186/s41239-021-00312-8.

[10] Preuniversitario William James S., "Centro de aprendizaje integral William James S.," 2024. [En línea]. Disponible en: https://williamjamespreu.com/

[11] E. Llanga Vargas, C. Andrade Cuadrado y M. Guacho Tixi, "Las TIC como herramientas en la educación superior de Ecuador: Un enfoque filosófico," Telos: Revista de Estudios Interdisciplinarios en Ciencias Sociales, vol. 26, no. 2, pp. 408–421, 2024, doi: https://doi.org/10.36390/telos262.08.

[12] J. N. Caballero Merlo, "Metodología de la investigación desde un enfoque cualitativo, resultados y experiencias," UNESUM-Ciencias: Revista Científica Multidisciplinaria, vol. 9, no. 2, pp. 16–26, 2025, doi: https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v9.n2.2025.

[13] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. del P. Baptista Lucio, Metodología de la investigación, 6.ª ed. México: McGraw-Hill, 2014.

[14] M. A. Domínguez González, A. Luque de la Rosa, C. Hervás Gómez y P. Román Graván, "Teacher digital competence: Keys for an educational future," Contemporary Educational Technology, vol. 17, no. 2, art. ep577, 2025, doi: https://doi.org/10.30935/cedtech/16168.

[15] V. M. Muñoz Baldeón, V. T. Moreno Barzola e I. J. Castro Díaz, "El uso de las TIC como herramienta de enseñanza en la educación secundaria: Beneficios y retos," Revista Social Fronteriza, vol. 4, no. 6, 2024, doi: http://dx.doi.org/10.59814/resofro.2024.4(6)543.

[16] S. R. Sirin, "Socioeconomic status and academic achievement: A meta-analytic review of research," Review of Educational Research, vol. 75, no. 3, pp. 417–453, 2005, doi: https://doi.org/10.3102/00346543075003417.

[17] J. Valverde Berrocoso, J. Acevedo Borrega y M. Cerezo Pizarro, "Educational technology and student performance: A systematic review," Frontiers in Education, vol. 7, 2022, doi: https://doi.org/10.3389/feduc.2022.916502.

[18] R. Hernández y M. Gutiérrez, "El impacto de las plataformas virtuales en el rendimiento académico," Revista de Investigación Educativa, vol. 39, no. 2, pp. 233–249, 2021.

[19] M. V. Vera Macay, K. G. Martínez Contreras y L. G. Hypatia Jared, "The TPACK model in secondary education teacher training," Polo del Conocimiento, vol. 6, no. 10, pp. 664–672, 2021, doi: 10.23857/pc.v6i10.3231.

[20] F. Vera, "Aprendizaje activo y pensamiento crítico: Impulsando el desarrollo estudiantil en una universidad privada chilena," Revista Electrónica Transformar, vol. 4, no. 3, pp. 3–40, 2023.

[21] I. N. Villao Salinas y Á. A. Matamoros Dávalos, "La brecha digital en la educación," LATAM Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades, vol. 5, no. 3, art. 2337, 2024, doi: https://doi.org/10.56712/latam.v5i3.2337.

[22] K. Okoye, T. T. Ngan y J. A. García, "The role of digital infrastructure in enabling active learning methodologies: A systematic review," Computers & Education, vol. 198, art. 104765, 2023, doi: https://doi.org/10.1016/j.compedu.2023.104765.

[23] M. Rafiq, A. Batool y S. U. Rehman, "Technology integration in classrooms: Effects on student engagement and collaboration—A systematic review," Education and Information Technologies, vol. 29, no. 5, pp. 5678–5702, 2024, doi: https://doi.org/10.1007/s10639-023-12245-8.

[24] L. M. Gonzales Chaparro, "Tecnologías emergentes y metodologías activas: Impacto en competencias digitales docentes y rendimiento académico," Revista Latinoamericana de Tecnología Educativa, vol. 23, no. 1, pp. 45–67, 2024, doi: https://doi.org/10.4189/rlete.2024.23.001.

[25] A. Sangrà, D. Vlachopoulos y N. Cabrera, "Building an inclusive definition of e-learning," *The International Review of Research in Open and Distributed Learning*, vol. 13, no. 2, pp. 145–159, 2012.

Detecção de Escravidão Moderna em Cadeias de Suprimentos via Conexões Societárias Ocultas com uso de OSINT e Graph Databases

Modern Slavery Detection in Supply Chains via Hidden Corporate Links using OSINT and Graph Databases

Lucas Afonso da Silva*, José Alberto Sousa Torres*, Elena Javidi da Costa†, João Paulo Javidi da Costa‡, Robson de Oliveira Albuquerque* e Fábio Lúcio Lopes de Mendonça*
*Departamento de Engenharia Elétrica (ENE), Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil lucas.afonso@redes.unb.br, robson@redes.unb.br, betotorres@gmail.com, fabio.mendonca@redes.unb.br
†FHDW, Paderborn / Lippe Innovations, Lippstadt, Alemanha elenajdacosta@gmail.com

‡ Applied Electrical Engineering, Hochschule Hamm-Lippstadt (HSHL) / KINTECH e.V., Alemanha joaopaulo.dacosta@hshl.de

***Resumo* — A opacidade das cadeias de suprimentos globais permite que a escravidão moderna prospere em camadas profundas da rede produtiva. Este trabalho propõe o uso de modelagem em grafos para mapear vínculos societários ocultos entre empresas exportadoras e infratores constantes na "Lista Suja" do trabalho escravo no Brasil. A metodologia realiza a integração semântica de bases govenamentais públicas brasileiras envolvendo empre- sas, focando nas relações de sócios como principal chave de ligação. A análise revelou 197 empresas na lista suja, 180.263 exportadoras e, dentre estas, 20 apresentam vínculo societário direto ou indireto com infratores. Destas, 15,3% operam com capital social irrisório (inferior a R$ 10.000), indicando possível uso de empresas de fachada para blindagem patrimonial. Adicio- nalmente, identificaram-se sócios reincidentes, ligados a empresas distintas na lista suja. Neste sentido, este trabalho propõe o Índice de Contágio (IC) para quantificação do risco. Os resultados da aplicação deste índice validam a eficácia da análise societária em grafos para revelar estruturas de controle centralizado e risco trabalhista em cadeias de exportação.**

***Index Terms* — Escravidão Moderna, Cadeia de Suprimento, OSINT e Graph Database.**

***Abstract* — The opacity of global supply chains allows modern slavery to thrive within the deep layers of production networks. This paper proposes a graph-based modeling approach (Neo4j) to map hidden corporate links between exporting companies and offenders listed on the Brazilian "Dirty List" of slave labor. The methodology performs semantic integration of public governmental databases involving companies, focusing on partner relationships as the primary linking key. The analysis revealed 197 companies on the Dirty List and 180,263 exporters; among these, 20 exhibit direct or indirect corporate ties with offenders. Notably, 15.3% of these companies operate with derisory social capital (below R$ 10,000), indicating the potential use of shell companies for asset shielding. Additionally, repeat offenders were identified across distinct companies on the Dirty List. In this context, this work proposes the Operational Contagion Index (IC) for risk quantification. The results of the index application validate the effectiveness of corporate graph analysis in revealing centralized control structures and labor risks within export chains.**

***Index Terms* — Keywords — Neo4j, Dirty List, Modern Slavery, Social Network Analysis, Corporate Graphs, LGPD, Compliance.**

I. Introdução e fundamentação teórica

A escravidão contemporânea persiste como prática de gestão deliberada dentro de sistemas capitalistas globais, onde a frag- mentação das cadeias de valor cria zonas de invisibilidade e a responsabilidade jurídica se dilui através de múltiplas camadas de subcontratação [1], [11]. O desafio científico e prático reside em conectar infratores conhecidos às cadeias produtivas formais, superando o "Paradoxo da Visibilidade": enquanto a governança corporativa exerce controle sobre fornecedores diretos, a opacidade intensifica-se nas camadas profundas da rede, permitindo que a exploração persista como estratégia de minimização de custos [10].

Para enfrentar essa invisibilidade, este artigo utiliza a Inteligência de Fontes Abertas (OSINT) [16] como metodologia de auditoria social, partindo da premissa de que os rastros societários permanecem registrados em bases públicas, como o Cadastro Nacional de Pessoas Jurídicas (CNPJ). Assim, propõe-se o uso da modelagem em grafos para mapear víncu- los ocultos entre empresas exportadoras e infratores constantes no Cadastro de Empregadores (Lista Suja). A principal con- tribuição reside na proposição do Índice de Contágio (IC), um mecanismo de alerta precoce (*early warning*) que permite a identificação proativa de empresas com alta probabilidade de contaminação indireta por passivos trabalhistas.

Diferente das bases de dados relacionais tradicionais, onde

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

a análise de vínculos de múltiplos saltos exige operações de *join* custosas, a modelagem em grafos permite a travessia de redes societárias de profundidade N com alto desempenho. O processo analítico segue o ciclo de inteligência clássico [17], operando sobre uma pipeline de Extração, Transformação e Carga (ETL) com pseudonimização. O modelo validado revela como estruturas de controle centralizado e empresas de fachada podem ser identificadas para subsidiar estratégias de *compliance* e fiscalização, unindo a capacidade computa- cional ao julgamento heurístico de especialistas (Inteligência Híbrida).

O restante deste artigo está organizado da seguinte forma: a Seção II apresenta a fundamentação baseada em Análise de Redes Sociais (ARS); a Seção III detalha a metodologia experimental e a formulação do IC; a Seção IV expõe os resultados e a identificação de *shell companies*; por fim, a Seção V apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

II. Fundamentação teórica e trabalhos correlatos

A aplicação da Análise de Redes Sociais (ARS) permite transcender a visão atomística da infração ao interpretar a arquitetura do ilícito sob três pilares: (i) Sócios-ponte e Buracos Estruturais [12]; (ii) A Força dos Laços Fracos [20]; e (iii) Propriedades de Mundo Pequeno [21]. Nesse cenário, as *shell companies* funcionam como anteparos que fragmentam o nexo causal entre o ilícito e o beneficiário econômico. Assim, este estudo expande ontologias de ocultação de ativos [8] ao tratar o vínculo `IS_PARTNER` como uma aresta de transmissão de risco reputacional e trabalhista.

A análise comparativa (Tabela I) sintetiza essa evolução, contrastando abordagens jurídicas e qualitativas tradicionais [2], [3] com avanços recentes em Processamento de Lingua- gem Natural (NLP) e modelos neurais. Estudos como os de Duarte et al. [26], Rocha et al. [27] e Marques et al. [28] demonstram a eficácia de arquiteturas baseadas em BERT para a extração automatizada de entidades de registros judiciais e Diários Eletrônicos (DEJT) com alta acurácia. Este trabalho preenche a lacuna entre essas técnicas de extração de IA e a análise estrutural de redes [4], transformando indicadores de transparência pública em uma ferramenta operacional capaz de detectar blindagem patrimonial via um índice quantitativo de risco (IC).

III. Experimento

Esta seção detalha o passo a passo técnico realizado para a transformação de dados públicos heterogêneos em inteligência estratégica voltada ao combate ao trabalho escravo. O fluxo de trabalho foi estruturado para assegurar a integridade analítica e a conformidade regulatória, seguindo rigorosamente as fases do ciclo de inteligência clássico: coleta de bases governamen- tais, processamento via pipeline ETL com pseudonimização, análise de redes complexas e disseminação de resultados via ranqueamento de risco. Para tanto, as subseções a seguir descrevem a integração semântica das bases abertas da da Receita Federal do Brasil, do Ministério do Desenvolvimento Indústria e Comércio (MDIC) e do Ministério do Trabalho e Emprego (MTE), a arquitetura do modelo de dados em grafos no Neo4j e o desenvolvimento do Índice de Contágio como métrica central para a quantificação do risco operacional.

Tabela I. Principais Trabalhos Relacionados

Autores	**Abordagem e Contribuição**	**Relação com Este Trabalho**
Figueira & Lotto [3]; Gonzaga et al. [2]	Análisejurídicae qualitativa doimpacto da Lista Suja no ordenamento brasileiro.	Fornece a base contextual e legal para a interpretação dos dados.
Marques et al. [28]	Método de OSINT e NLP para extração de entidades nomeadas em Diários Judiciários eletrônicos.	Valida a viabilidade técnica de automatizar a coleta de dados de infratores a partir de fontes não estruturadas.
Gerry et al. [4]	Aplicação de métricas de centralidade em grafos para investigar redes de corrupção.	Fornece a base metodológica para o uso de Análise de Redes Sociais (ARS) em contextos de ilícitos.
Searcy et al. [5]	Proposta de um framework de indicadores para due diligence em direitos humanos nas cadeias de suprimentos.	Complementa este trabalho ao sugerir como indicadores como o IC proposto podem ser integrados a processos de compliance.
Needham [6]; Neo4j [7]	Documentação e aplicações industriais de algoritmos de grafos (PageRank, WCC, detecção de comunidades).	Base técnica para a análise escalável de grandes grafos, aplicada aqui ao contexto societário.
Sousa Torres et al. [8]	Desenvolvimento de ontologias para modelagem semântica de vínculos financeiros e ocultação de ativos.	Fundamenta a modelagem semântica das relações (IS_PARTNER) e a interpretação de estruturas societárias complexas.
Duarte et al. [26]	Classificação de textos jurídicos (EUA/Índia) via LLMs e BERT para identificar narrativas de escravidão.	Valida o uso de registros judiciais como fonte de risco, servindo de base para a extração de entidades que alimentam o grafo.
Rocha, da Costa, et al. [27]	Dataset MOSSC e benchmark neural (BERT-ECHR) para classificação de litígios no Reino Unido.	Validação de modelos de IA para detecção de padrões criminais.

A. Fontes de Dados e Pré-processamento

Foram integradas bases do CNPJ (2024), MDIC/Comex Stat (2023) e a "Lista Suja"(2024). O processo de ETL em Python (Pandas) incluiu: (i) limpeza e normalização de CNPJs; (ii) integração via CNPJ raiz; e (iii) pseudonimização de CPFs via hash SHA-256 com salt estático. Este procedimento adota princípios de Privacy by Design [13] para rastrear "sócios reincidentes"em conformidade com o art. 7º, IV, da LGPD [9], [14].

O processo de ETL (Extract, Transform, Load) foi implementado em Python (Pandas) com as seguintes etapas:

- **Limpeza e padronização:** remoção de caracteres não numéricos, normalização de CNPJs para 14 dígitos e eliminação de registros com inconsistentes.
- **Integração:** Junção das bases por CNPJ para identificar quais empresas da Lista Suja e da base de exportadoras estavam presentes nos dados da Receita Federal. Para empresas matriz e filiais, o critério de ligação foi o CNPJ

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

raiz (8 dígitos).

- **Tratamento de dados (LGPD):** Para identificar reincidência de sócios sem expor dados sensíveis, os CPFs foram pseudonimizados via hash SHA-256 determinístico com salt estático e secreto (armazenado em HSM insti- tucional). Este procedimento assegura que o mesmo CPF gere sempre o mesmo identificador relacional, permitindo o rastreamento de vínculos societários em conformidade com o art. 7º, IV, da LGPD [9].

A abordagem de pseudonimização, distinta da anonimização irreversível, é fundamental para a funcionalidade da análise de redes complexas. Ela permite a identificação de "sócios reincidentes"em diferentes empresas sem que o número do documento seja conhecido ou armazenado em texto claro. Este método adota princípios de *Privacy by Design* [13] para equilibrar o legítimo interesse público na investigação de ilícitos trabalhistas com a proteção da identidade dos titulares [14]. O pipeline proposto garante a rastreabilidade técnica necessária para a auditoria social e *compliance* sem comprometer a integridade dos dados pessoais de cidadãos não vinculados diretamente aos ilícitos.

B. Modelo de Dados em Grafo

O banco de dados Neo4j (versão 5.15) foi estruturado com o seguinte modelo:

- **Nó: PessoaJuridica:** Propriedades: `cnpj_hash, razao_social, capital_social, cnae_principal, is_exporter, is_dirty_list.`
- **Nó: Pessoa Fisica:** Propriedades: `cpf_hash, nome_socio` (pseudonimizado, mas mantido para contexto qualitativo interno).
- **Relacionamento [:IS_PARTNER]:** Conecta `PessoaFisica a PessoaJuridica.` Propriedades: `percentual_capital, data_entrada.`

A escolha das métricas de centralidade (grau e intermedia- ção) fundamenta-se na tradição da Análise de Redes Sociais estabelecida por Wasserman & Faust [19]. A centralidade de intermediação, em particular, operacionaliza o conceito de *brokerage* de Burt [12] e dialoga com a teoria dos *weak ties* de Granovetter [20]: os sócios-ponte identificados (como o hash 'a3f5c8...') são justamente os elos fracos que conectam clusters distintos, viabilizando o fluxo de capital e insumos entre o setor exportador formal e as zonas de exploração. Ademais, a estrutura da rede societária brasileira apresenta propriedades de *small-world* [21], o que explica como, em até 3 passos, é possível conectar atores aparentemente isolados.

O modelo de dados em grafo adotado neste artigo expande as ontologias de detecção de ocultação de ativos propos- tas por Sousa Torres et al. [8]. Ao tratar entidades como: `PessoaJuridica e :PessoaFisica` dentro de uma estrutura hierárquica validada, é possível aplicar métricas de centralidade que revelam onde a responsabilidade jurídica é deliberadamente fragmentada em cadeias de suprimentos.

C. Tratamento de Defasagem Temporal

O modelo mitiga o *temporal lag* através da persistência de registros históricos no Neo4j. Embora a Lista Suja apresente infrações pretéritas, o uso de *timestamps* nos relacionamentos `[:IS_PARTNER]` permite verificar se a composição soci- etária no momento da autuação coincide com a estrutura atual da exportadora, evitando falsos positivos decorrentes de mudanças administrativas legítimas ocorridas após o período de fiscalização.

D. Métricas de Rede

Foram calculadas as seguintes métricas para identificar atores críticos:

- **Grau de Centralidade:** Número de conexões de um nó (pessoa ou empresa). Identifica sócios com participação em muitas empresas (*hubs*).

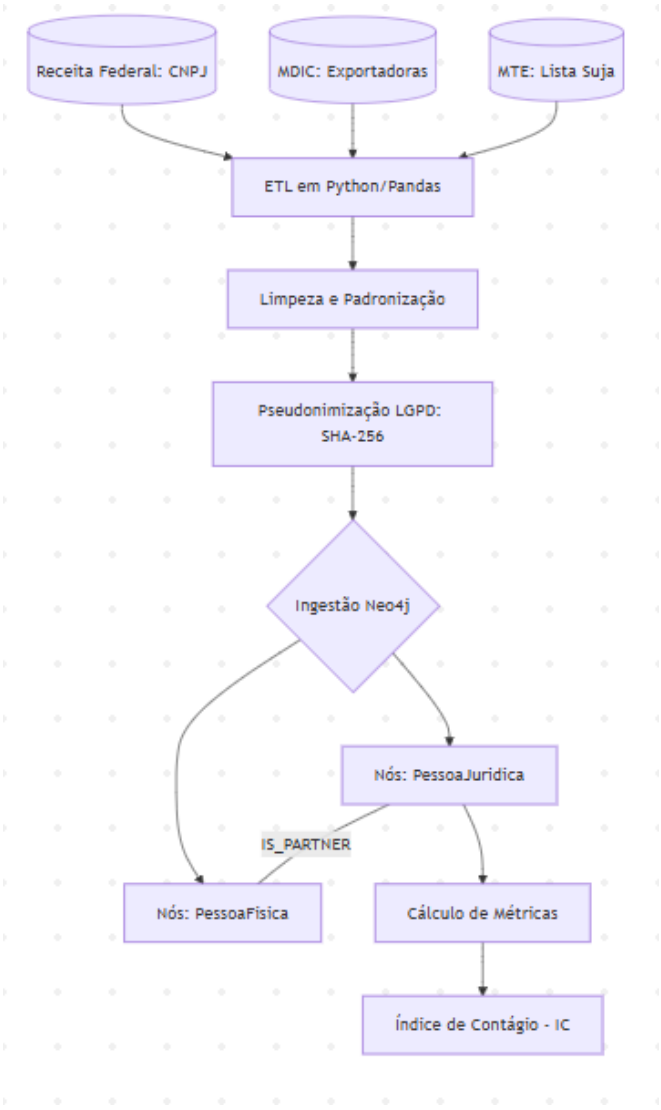


Figura 1. Fluxograma da metodologia: Integração de bases públicas, pipeline deETL e ingestão no Neo4j.

- **Centralidade de Intermediação (Betweenness):** Medea frequência com que um nó aparece no caminho mais curto entre outros dois nós. Identifica "sócios-ponte" que conectam diferentes clusters da rede.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

E. Índice de Contágio Operacional (IC) Normalizado

Para quantificar o risco, a Equação 1define o IC para uma exportadora *e*: crítica (distância ≤ 2) com infratores. O número total de empresas com algum vínculo (distância ≤ 3) é de 33.

Tabela II. Exportadoras por Distância Societária da Lista Suja

Distância (passos no grafo)	Nº de Exportadoras
0 (Empresa na lista)	14
1 (Sócio direto de infrator)	8
2 (Sócio em comum)	12
3 (Via dois intermediários)	13
Total Unívoco (distância ≤ 3)	47

É importante notar que, de um universo de 180 mil exportadoras, apenas 47 (0,026%) apresentaram algum vínculo societário rastreável com a Lista Suja nos dados públicos. Isso pode indicar tanto um relativo isolamento dos infratores do comércio exterior formal, quanto uma limitação do método, que não captura vínculos contratuais (fornecedor-cliente) ou cadeias de subcontratação mais complexas.

$$IC(e) = \sum_{i=1}^{!} \frac{w_i}{d_i + 1} \times \frac{K}{\log_{10}(\text{Capital}(e) + 1)} \qquad (1)$$

Onde *n* é o número de caminhos até distância $D = 3$; d_i é a distância geodésica; w_i é o peso do vínculo (1.0); *Capital*(*e*) é o capital social em Reais; e *K* é uma constante de escala (10^5). A inclusão de *K* atua como um fator de normalização técnica, garantindo que o índice opere em uma escala numérica legível e comparável, compensando a redução logarítmica do denominador e facilitando a definição de limiares de decisão (*thresholds*) em sistemas de monitoramento.

F. Justificativa da Constante de Escala e Estabilidade do Índice

A constante K = 10^5 na Equação 1 foi definida empiricamente para normalizar o *IC* em relação à mediana do capital social das empresas brasileiras do setor agroexportador (aprox. *R*$100.000, 00). Análises de sensibilidade indicam que, sem a constante *K*, o denominador logarítmico comprimiria os resultados em uma escala infinitesimal, dificultando a definição de *thresholds* operacionais. Com *K*, o índice projeta o risco em uma escala linear onde valores > 0, 7 indicam anomalias estruturais críticas (baixo capital e alta conectividade).

IV. Resultados e discussão

A. Estatísticas e Conexões Societárias

A análise identificou que 14 exportadoras constam direta- mente na Lista Suja (distância 0). Ao expandir a busca por vínculos societários (Tabela II), revelou-se um ecossistema de risco onde 20 empresas exportadoras possuem proximidade

B. Identificação de Hubs e Shell Companies

A análise de centralidade de intermediação revelou indivíduos agindo como "nós-ponte". Um exemplo crítico é o sócio identificado pelo *hash* `a3f5c8`..., que conecta duas empresas da Lista Suja a uma exportadora de grande porte do setor de carne bovina. Cruzando dados financeiros, observou- se que 55% das exportadoras em risco (distância ≤ 2) possuem capital social inferior a R$ 10.000.

A correlação entre baixo capital social e alta centralidade de intermediação é um indicador clássico de *shell companies* [15]. No grafo gerado, observou-se que as pontes entre a exportação e a Lista Suja são frequentemente entidades de fachada que servem como anteparos jurídicos para evitar o bloqueio de bens em ações civis públicas. A aplicação adi- cional do algoritmo de detecção de comunidades de Louvain [25] permitiu observar que essas empresas não estão isoladas, mas orbitam em comunidades densamente conectadas a grupos familiares específicos, o que sugere uma divisão planejada de tarefas entre as unidades produtivas (onde o risco trabalhista é concentrado) e as unidades de escoamento comercial (onde o capital é blindado).

Tal dinâmica alinha-se à literatura de lavagem de dinheiro [23], onde shell companies de baixo capital atuam como anteparos. Como nota Morselli [24], a centralidade de inter- mediação em redes criminosas concentra-se em nós de baixa visibilidade, permitindo que grandes exportadoras mantenham sua reputação intacta

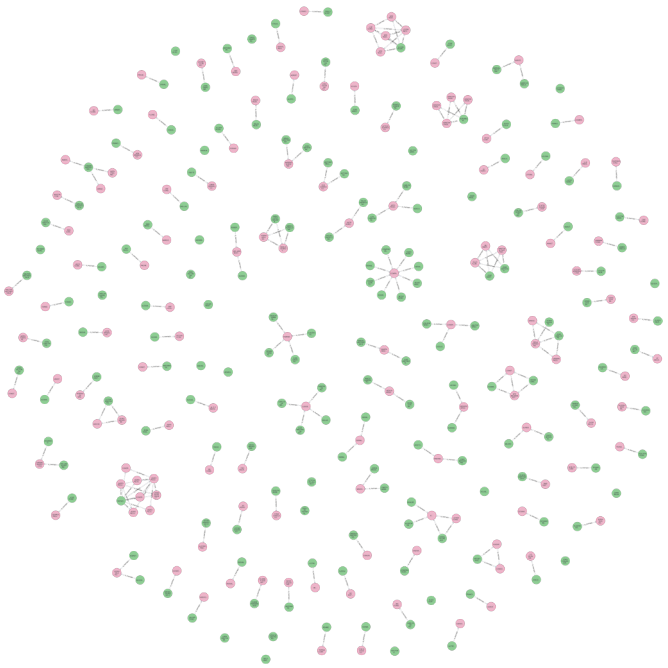


Figura 2. Detecção de comunidades via Algoritmo de Louvain: Agrupamentoseconômicos que compartilham sócios-ponte entre o setor de exportação eempresas sancionadas.

C. AplicaçãoeAnálisedoÍndicedeContágio(IC)

A Tabela III apresenta o ranqueamento de cinco exportadoras com base no IC calculado pela equação (1), com $K = 10^5$ e distância máxima $D = 3$.

Tabela III. Exemplo de Aplicação do Índice de Contágio Operacional (IC)

Empresa	**Capital**	**Dist.**	**Vínc.**	**IC**
ExportadoraA	5.000	1	1	0.88

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

ExportadoraB	8.000	2	2	0.71
ExportadoraF	1.200.000	1	1	0.35
ExportadoraE	500.000	1	1	0.31
ExportadoraG	8.000	3	1	0.25

A análise da Tabela III demonstra o comportamento do IC:

- A Exportadora A e a Exportadora F têm a mesma distância mínima (1) e o mesmo número de vínculos (1). A diferença no IC (0,88 vs 0,35) é devida exclusivamente ao fator de capital social, com a empresa de capital muito baixo (R$ 5k) sendo considerada de risco muito maior.
- A Exportadora B (distância 2) tem um IC (0,71) maior que a Exportadora F (distância 1, capital alto). Isso ocorre porque, apesar de mais distante, seu capital extremamente baixo e o fato de ter dois caminhos distintos para a lista suja (representado pelo somatório $\Sigma\ w_i/(d_i+1)$) elevam seu índice.
- A Exportadora G demonstra que uma distância grande (3) reduz drasticamente o IC (0,25), mesmo com capital baixo.

Esta análise mostra o IC como uma medida composta que hierarquiza o risco de forma plausível. Como mecanismo de *early warning*, o IC permite que órgãos de fiscalização e departamentos de compliance priorizem investigações sobre empresas com alta probabilidade de estarem indiretamente envolvidas com práticas de trabalho escravo, alinhando-se à visão de Kent [22] de que o produto final da inteligência deve ser acionável e capaz de subsidiar a tomada de decisão. Uma validação externa robusta, no entanto, exigiria correlacionar o IC com dados de processos trabalhistas ou novas inclusões na Lista Suja em anos posteriores, o que é proposto como trabalho futuro.

O IC, conforme demonstrado, oferece uma hierarquização do risco. Para que transcenda o âmbito acadêmico e se torne uma ferramenta de inteligência estratégica, propõe-se um framework de aplicação em três camadas, direcionado a diferentes atores:

- **Camada 1 - Alerta Regulatório (Ministério Público do Trabalho do Brasil - MPT):** O MPT poderia utilizar o IC como filtro inicial para direcionar investigações. Exporta- doras com IC superior a um limiar pré-definido (ex: 0,7) seriam priorizadas para auditorias *in loco*, mesmo que não figurem em denúncias formais. A análise societária que compõe o IC forneceria ao procurador os elementos para requerer a desconsideração da personalidade jurídica (art. 50 do Código Civil) com base em indícios objetivos de confusão patrimonial (uso de *shell companies* com capital irrisório).
- **Camada 2 - Due Diligence Corporativa (Departamentos de Compliance):** Empresas compradoras (varejistas, indústrias) podem incorporar o IC em seus processos de homologação de fornecedores. Um IC elevado em um potencial fornecedor, mesmo que indireto (distância 2 ou 3), acionaria um alerta para aprofundamento da *due diligence*. O modelo pode ser expandido para incluir não apenas o capital social, mas também o CNAE da atividade e o histórico de infrações ambientais, criando um score de risco mais robusto.
- **Camada 3 - Transparência Pública e Mercado de Capitais (Investidores):** A partir dos dados pseudonimizados, seria possível publicar relatórios setoriais de risco de contágio. Investidores institucionais, cada vez mais atentos a critérios ESG (Environmental, Social and Governance), poderiam utilizar essas informações para pressionar empresas listadas em bolsa a auditarem profundamente suas cadeias, sob pena de desinvestimento.A simples *existência* de um índice público e auditável, mesmo que baseado em dados abertos, cria um incentivo de mercado para a autorregulação.

V. Conclusão

Este trabalho demonstrou que a modelagem em grafos via Neo4j permite conectar o passivo da "Lista Suja" ao fluxo de exportação brasileiro, revelando que 55% das exportado- ras em risco societário operam com capital irrisório, padrão associado ao uso de *shell companies*. O Índice de Contágio (IC) proposto consolida-se como ferramenta de *early warning* para *compliance* e inteligência estratégica. Trabalhos futuros devem integrar dados de Notas Fiscais Eletrônicas (NF-e) e dimensões temporais para mapear vínculos contratuais e a evolução dinâmica das redes de exploração.

A. Limitações e Trabalhos Futuros

Os resultados, embora promissores, devem ser interpretados à luz das limitações do escopo atual, que por sua vez delineiam uma agenda de pesquisa futura, O modelo atual captura apenas vínculos societários (quem é dono de quem). A principal limitação é a não inclusão de vínculos contratuais (quem vende para quem). Uma empresa exportadora pode comprar insumos de um fornecedor que utiliza trabalho escravo, sem que haja qualquer relação societária entre eles. Além disso, a Lista Suja reflete infrações passadas, muitas vezes de anos anteriores. O grafo societário, por outro lado, é dinâmico. Um sócio pode ter se desligado da empresa infratora antes de ela ser autuada. Por fim, o IC, neste estágio, é uma métrica de risco correlacional, não uma predição validada. Não sabemos se uma empresa com alto IC hoje tem maior probabilidade de ser autuada amanhã. Como trabalhos futuros, sugere-se a integração de dados de Nota Fiscal Eletrônica (NF-e) para mapear a cadeia de fornecimento real, criando um grafo bipartido (empresas- produtos) e calculando um "IC de Fornecimento". Em relação a atraso temporal, sugere-se a incoeporação da dimensão temporal ao grafo (grafos de propriedade temporal - *temporal property graphs*), permitindo análises do tipo "o sócio X estava na empresa Y quando a infração ocorreu?"e rastreando a migração de sócios problemáticos entre empresas. Por fim, para validação preditiva, sugere-se a aplicação prática do IC por órgãos de controle governanmanetais que atuam no combate ao trabalho escravo para validação experimental do indicador.

A integração de Notas Fiscais Eletrônicas (NF-e) permitiria a transição de um grafo de *Equidade* para um grafo de Transação. Enquanto o modelo atual identifica o controle societário, a NF-e revelaria o "Contágio por Insumo", onde empresas sem vínculos de sócios estão unidas por dependência econômica de fornecedores infratores (Tier 2 e Tier 3), endereçando diretamente o problema da subcontratação fragmentada.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e computacional do Laboratório LATITUDE, da Universidade de Brasília, a Secretaria Nacional de Assistência Social – SNAS/MDS, a Procuradoria Geral da Fazenda Nacional – PGFN, ao Projeto SISTER City – Sistemas Inteligentes Seguros e em Tempo Efetivo Real para Cidades Inteligentes ao projeto "Sistema de Controle e Unificação de Projetos para o Governo Distrito Fe- deral – SISPRO-DF", ao projeto "Pesquisa, Desenvolvimento e Aplicação de Protótipo do Ambiente de Simulação Didático para Veículos Ciberseguros, Autônomos e Conectados (SD- CyberAuto)". Projeto "Pesquisa, Desenvolvimento e Aplicação – Metodologia para Apoio à Obtenção de Requisitos Éticos e de Privacidade" (Auxílio 514/2023) e a Fundação de Apoio do Distrito Federal - FAP/DF.

Referências

[1] A. Crane, "Modern Slavery as a Management Practice," *Academy ofManagement Review*, vol. 38, no. 1, 2013.

[2] L. G. Bittencourt, "Dirty List and Contemporary Slave Labor [ListaSuja e Trabalho Escravo Contemporâneo]," *Rev. Direitos, Trab. e Polít.Social*, 2024.

[3] L. Figueira, "Contemporary slavery in Brazil [Escravidão contemporâ-neano Brasil]," *Rev. Direitos, Trab. e Polít. Social*, 2018.

[4] F. Gerry, "Graph Theory for Investigating Corruption," *IEEE TransAI*,2020.

[5] C. Searcy, "Monitoring Framework for Modern Slavery," *J. Purch.Supply Manag.*, 2024.

[6] M. Needham and A. E. Hodler, *Graph Algorithms: Practical ExamplesinApache Spark and Neo4j*. Sebastopol, CA: O'Reilly Media, 2019.

[7] Neo4j,"GraphDataScienceDocumentation,"2024.

[8] J.A.SousaTorres,D.A.daSilva,R.deOliveiraAlbuquerque,G.D. A. Nze, A. L. S. Orozco, and L. J. G. Villalba, "Ontology Developmentfor Asset Concealment Investigation: A Methodological Approach andCase Study in Asset Recovery," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 21, p.9654,2024.

[9] BRASIL,"LawNo.13,709,ofAugust14,2018.GeneralPersonalDataProtectionLaw(LGPD)[Leinº13.709,de14deagostode2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD)]," Brasília, DF:Presidênciada República, 2018.

[10] J. Allain, *The Law and Slavery: Prohibiting Contemporary Forms ofSlavery*. Leiden: Brill, 2013.

[11] N. Phillips and F. Mieres, *The Political Economy of State-BusinessRelationsin Global Supply Chains*. Cambridge: Polity Press, 2022.

[12] R. S. Burt, "Structural Holes and Good Ideas," *American Journal ofSociology*, vol. 110, no. 2, pp. 349–399, 2004.

[13] A. Cavoukian, "Privacy by Design: The 7 Foundational Principles,"Informationand Privacy Commissioner, Ontario, Canada, 2009.

[14] R.O.Albuquerque,L.J.G.Villalba,andA.L.S.Orozco,"DataPrivacyand Ethics in Public Auditing," *International Journal of InformationManagement*, 2021.

[15] M. Pfeiffer, "Detecting Shell Companies in Corporate Networks using-GraphNeural Networks," *Journal of Financial Crime*, 2020.

[16] R. D. Steele, "The New Craft of Intelligence: Making the Most of Open-Private Sector Knowledge," 1995.

[17] M.M.Lowenthal,*Intelligence:FromSecretstoPolicy*,7thed.Washing-ton, DC: CQ Press, 2016.

[18] B. Gilad, *Early Warning: Using Competitive Intelligence to AnticipateMarketShifts,ControlRisk,andCreatePowerfulStrategies*.NewYork:AMACOM, 2004.

[19] S.WassermanandK.Faust,*SocialNetworkAnalysis:MethodsandApplications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1994.

[20] M. S. Granovetter, "The Strength of Weak Ties," *American Journal ofSociology*, vol. 78, no. 6, pp. 1360–1380, 1973.

[21] D.J.WattsandS.H.Strogatz,"Collectivedynamicsof'small-world'networks," *Nature*, vol. 393, pp. 440–442, 1998.

[22] S.Kent,*StrategicIntelligenceforAmericanWorldPolicy*.Princeton,NJ:Princeton University Press, 1949.

[23] B. Unger and D. van der Linde, *Research Handbook on Money Laun-dering*. Cheltenham: Edward Elgar, 2013.

[24] C.Morselli,*InsideCriminalNetworks*.NewYork:Springer,2009.

[25] V. D. Blondel, J.-L. Guillaume, R. Lambiotte, and E. Lefebvre, "Fastunfolding of communities in large networks," *Journal of StatisticalMechanics:TheoryandExperiment*,vol.2008,no.10,p.P10008,2008.

[26] J. D. Duarte, E. J. da Costa, J. P. J. da Costa, and others, "AI-drivenmodern slavery detection for supply chain: A cross-jurisdictional legaltext analysis," *Machine Learning with Applications*, vol. 100827, 2025.

[27] H. S. Rocha, E. J. Da Costa, J. D. Duarte, and J. P. J. Da Costa, "A newdataset and neural benchmark for multi-label classification of modernslavery litigation," *IEEE Access*, 2025.

[28] N.A.Marques,B.M.A.Augustinho,D.A.daSilva,G.D.A.Nze, F. L. L. de Mendonça, and R. de O. Albuquerque, "Governmentdata collection method using OSINT techniques and natural languageprocessing [Método de coleta de dados governamentais com uso detécnicas de OSINT e processamento de linguagem natural]," *RevistaIbérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, pp. 342–356, 2025.

Classificação de Imagética Motora para Controle de Órtese de Mão com EEG de Baixa Densidade e Aprendizado Profundo

Motor Imagery Classification for Hand Orthosis Control Using Low-Density EEG and Deep Learning

Matheus Henrique Kovalski, Alejandro Rafael Garcia Ramirez
Department of Applied Computing
UNIVALI – Universidade do Vale do Itajaı, SC, Itajaı, Brasil

Email: mhkovalsky.w@gmail.com, ramirez@univali.br

***Resumo* — Órteses assistivas são fundamentais na reabilitação motora, mas sua adoção clínica é limitada pelo alto custo e pela complexidade da instrumentação. Este trabalho apresenta e avalia um pipeline de Interface Cérebro-Computador (BCI) não invasiva, baseado em imagética motora (IM) para o controle de uma órtese de mão produzida por impressão 3D. O sistema processa sinais de eletroencefalografia (EEG) em tempo real, convertendo predições em comandos motores e utilizando um limiar de confiança para mitigar ativações espúrias. A avaliação foi conduzida com a base de dados pública PhysioNet, comparando cinco arquiteturas de Deep Learning: CNN1D, CNN2D, EEGNet, DeepConvNet e ShallowFBCSPNet, sob dois cenários de aquisição (64 e 3 canais). Na configuração de 64 canais, DeepConvNet e ShallowFBCSPNet superaram as demais; contudo, no cenário de 3 canais, a CNN2D e a ShallowFBCSPNet demonstraram melhor desempenho. Diferente de abordagens tradicionais que dependem de alta densidade de eletrodos e focam apenas na análise de sinais, este trabalho comprova a viabilidade de controlar um dispositivo físico de reabilitação com apenas três canais, reduzindo a complexidade instrumental e favorecendo a portabilidade para atividades de vida diária.**

***Palavras Chave* – Interface Cérebro–Computador; Imagética Motora; EEG; Aprendizado Profundo; Órtese Robótica; Tecnologia Assistiva.**

***Abstract* — Assistive orthoses are essential tools in motor rehabilitation; however, their clinical adoption remains limited by high costs, low portability, and the complexity of the required instrumentation. This paper evaluates a non-invasive Brain-Computer Interface (BCI) pipeline based on motor imagery (MI) for controlling a 3D-printed hand orthosis. The control module processes the predicted class in real-time, converting signals into actuation commands while implementing a minimum confidence threshold to mitigate spurious activations. The system was evaluated using the PhysioNet EEG Motor Movement/Imagery public dataset, comparing five Deep Learning architectures: CNN1D, CNN2D, EEGNet, DeepConvNet, and ShallowFBCSPNet. Two acquisition scenarios were analyzed: a 64-channel configuration and a reduced 3-channel setup. In the 64-channel scenario, DeepConvNet and ShallowFBCSPNet outperformed the other models. In the reduced electrode setup, CNN2D and ShallowFBCSPNet achieved the best performance. These results demonstrate the feasibility of motor imagery classification using only three channels, significantly reducing instrumental complexity and favoring integration with low-channel hardware and physical actuation systems. Unlike traditional approaches that rely on high-density EEG and focus solely on signal analysis, this work integrates a streamlined decoding system into a functional 3D-printed orthosis, enhancing portability for activities of daily living.**

Keywords – Brain-Computer Interface; Motor Imagery; EEG; Deep Learning; Robotic Orthotics; Assistive Technology.

I. Introdução

Déficits motores decorrentes de problemas neurológicos, como o acidente vascular encefálico (AVC), podem comprometer significativamente a autonomia e a qualidade de vida dos indivíduos. Nesse contexto, interfaces cérebro-computador baseadas em eletroencefalografia têm sido exploradas como ferramentas assistivas e de reabilitação, ao possibilitarem o controle de dispositivos por meio da imaginação de movimentos [1].

O estudo em [8] demonstrou que a atividade neural é fortemente relacionada às intenções de movimento do sujeito em diferentes condições (movimento tentado, realidade virtual e estimulação elétrica funcional-FES). No estudo foram identificadas respostas neurais específicas associadas a movimentos articulares distintos, com eletrodos codificando sinais consistentes para aberturas de mão, flexão/extensão do cotovelo e punho, e abdução/adução do úmero.

Modelos de aprendizado profundo têm sido amplamente aplicados à classificação de sinais de imagética motora em bases públicas, como o conjunto de dados EEG Motor Movement/Imagery Dataset [2], que oferece registros de mais de 1500 gravações de EEG obtidas de 109 voluntários, obtidos em uma configuração que utiliza 64 canais. Contudo, aplicações práticas demandam soluções com menor número de canais, maior portabilidade e simplificação operacional, contribuindo a reduzir também o custo [3].

Este estudo descreve e avalia um pipeline de interface cérebro-computador não invasiva com três eletrodos, integrando

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

etapas de pré-processamento, classificação baseada em redes neurais e controle embarcado de uma órtese de mão acionada por um servomotor. O objetivo é investigar a viabilidade de uma solução de baixo custo e reduzida complexidade instrumental para aplicações assistivas na reabilitação motora.

II. Revisão bibliografica

A pesquisa por estudos relacionados foi conduzida por meio do Portal de Periódicos da CAPES, com acesso institucional fornecido pela UNIVALI, abrangendo diversas bases de dados, incluindo IEEE, arXiv, ScienceDirect e ACM Digital Library. Adicionalmente, foram realizadas consultas no Google Scholar com o objetivo de ampliar o alcance da busca e identificar referências acadêmicas complementares.

A busca foi realizada considerando publicações no período de 2017 a 2025. Posteriormente, foi incluído um estudo publicado em 2014, em razão de sua relevância e proximidade temática com a proposta deste trabalho.

A. String de busca

A string utilizada para a identificação dos trabalhos relacionados foi: "BCI AND orthosis", "BCI AND EEG", "EEG AND orthosis" e "BCI AND rehabilitation".

A seleção dos trabalhos foi baseada em um conjunto de critérios, incluindo: foco em interfaces cérebro–computador aplicadas à reabilitação motora; utilização de tecnologias como eletroencefalografia (EEG), e dispositivos órteses; descrição clara da metodologia de implementação; apresentação de resultados experimentais, como métricas de desempenho (por exemplo, acurácia ou eficiência).

Foram aplicados também os seguintes critérios de exclusão: estudos puramente teóricos; trabalhos sem validação experimental; e artigos que não utilizam EEG.

B. Resultados

O estudo descrito em [5] teve como objetivo avaliar o desempenho de uma órtese de mão acionada por uma interface cérebro-computador (BCI) baseada em eletroencefalografia (EEG), considerando sua possível aplicação futura na reabilitação de indivíduos com fraqueza manual após acidente vascular cerebral. Para isso, foi desenvolvido um sistema composto por uma órtese de mão eletricamente atuada e controlada por sinais EEG, o qual foi testado em seis participantes de controle. Após a etapa de treinamento e calibração, os voluntários realizaram tarefas de preensão e relaxamento de uma das mãos, seguindo pistas apresentadas em computador, de modo a induzir o fechamento e a abertura da órtese posicionada na mão contralateral.

O desempenho do sistema em tempo real foi avaliado por métricas operacionais e cinemáticas. Os resultados indicaram média de 1,15 ± 0,85 falsos alarmes por minuto e 0,22 ± 0,36 omissões por minuto. Além disso, a análise dos sinais obtidos por eletrogoniômetros acoplados às duas mãos revelou correlação média de 0,58 ± 0,13 entre os movimentos voluntários e os movimentos mediados pela BCI, sendo estatisticamente significativa em todos os casos, exceto um. Com base nesses achados, os autores concluíram que a órtese de mão controlada por BCI é viável e, portanto, merece investigação futura em indivíduos com fraqueza de mão decorrente de AVC.

O estudo em [6] propõe uma interface cérebro-computador (BCI) baseada na correlação entre sinais eletroencefalográficos (EEG) e eletromiográficos (EMG), com o objetivo de controlar uma órtese de mão robótica voltada à reabilitação funcional de pacientes com déficit motor. A inovação principal está no uso do método CBPT (Correlation Between Band-limited Power Time-courses), que supera as limitações da coerência EEG–EMG tradicional em aplicações com tentativas únicas (single-trial) e em tempo real.

No estudo participaram 16 indivíduos saudáveis e 8 pacientes hemiplégicos, que realizaram tarefas de preensão da mão durante sessões estruturadas em janelas de tempo fixas. O ensaio consistiu em períodos de preparação, exibição de pistas visuais, feedback da órtese e intervalos aleatórios entre tentativas (ITI). A acurácia de classificação foi 92,81% (±2,09%) no grupo de controle e 84,53% (±4,58%) no grupo experimental. O valor da latência foi similar em ambos os grupos (2,1s no grupo de controle e 2,4s no grupo experimental. Esse trabalho contribui significativamente na área de neuroengenharia aplicada, mostrando que acoplamentos EEG–EMG temporais podem ser usados de forma confiável para promover reabilitação funcional assistida, com maior precisão e resposta adaptativa.

O estudo em [7] propõe uma abordagem inovadora para a classificação de tarefas de imagética motora (MI) utilizando sinais de eletroencefalograma (EEG), baseada na Transformada de Espalhamento por Wavelets (WST) combinada com Redes Neurais Convolucionais (CNN), formando a arquitetura denominada WST-CNN. Essa abordagem permite a extração de características discriminativas dos sinais mesmo em cenários com dados limitados. A camada inicial da WST-CNN é composta por operadores WST não treináveis, com inicializações fixas, proporcionando maior estabilidade ao modelo. Além disso, a WST apresenta robustez a perturbações locais, especialmente pela invariância a translações e resiliência a deformações temporais, o que contribui para a confiabilidade do sistema.

A análise foi realizada em dois conjuntos de dados distintos: o BCI Competition IV-2a e o DBCIE. Este último contém registros de EEG obtidos de 23 participantes saudáveis durante a execução de três tarefas de imagética motora: movimento do braço esquerdo (LA), do braço direito (RA) e simultâneo de ambos os braços (BA), utilizando a configuração Montage 3, com 32 canais. Já o conjunto BCI IV-2a é composto por dados de nove indivíduos realizando quatro tarefas: mão esquerda (LH), mão direita (RH), pés (FT) e língua (T).

A validação foi realizada por meio de validação cruzada estratificada 5-fold. Os resultados obtidos demonstram alto desempenho nos dois conjuntos de dados. Para o BCI IV-2a: acurácia de 92,25%, sensibilidade de 92,25%, especificidade de 97,41% e F1-score de 92,40%. Para o DBCIE: acurácia de 89,01%, sensibilidade de 89,01%, especificidade de 94,50% e F1-score de 89,07%

III. Materiais e métodos

Um computador pessoal atua como unidade central de processamento, sendo responsável por executar as etapas de pré-processamento, extração de características e classificação. A partir dos sinais brutos provenientes da base de dados, o siste-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

ma identifica padrões de imagética motora associados a comandos de flexão ou extensão da mão.

Após a inferência, o computador envia comandos a uma unidade de controle embarcada que interpreta o resultado da classificação e converte-o em sinais adequados para controle da órtese projetada, Figura 1.

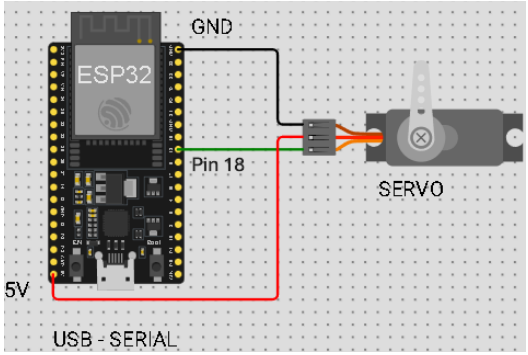


Figura 1. Hardware da órtese

O hardware é composto por um microcontrolador ESP32, responsável pelo controle do atuador da órtese via servomotor, Figura 2.

Figura 2. Protótipo da órtese de mão.

O microcontrolador recebe a classe predita pelo classificador e a converte em comandos discretos de movimento. Para mitigar ativações espúrias, adota-se um limiar mínimo de confiança, mas caso a predição não o atenda, preserva-se o estado atual do atuador.

A. *Pipeline BCI e modelos avaliados*

O pipeline da BCI contempla três classes de saída: repouso, imagética motora da mão esquerda e da mão direita. Conforme a literatura, dos 109 sujeitos, foram excluídas as informações dos participantes 38, 88, 89, 92, 100 e 104 por inconsistências nas anotações. O pré-processamento abrange filtragem *notch* a 60 Hz, filtragem passa-faixa, remoção de tendência e aplicação de referência média comum. Posteriormente, os sinais são segmentados em épocas e normalizados por canal, Figura 3.

O pipeline de treinamento e validação do modelo de classificação encontra-se na Figura 4, que ilustra o fluxo adotado para ajuste dos classificadores, desde o pré-processamento até a avaliação do desempenho segundo métricas quantitativas.

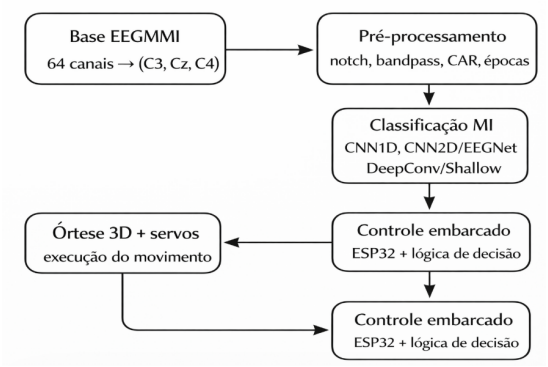


Figura 3. Visão geral do sistema proposto.

No processo de treinamento são empregadas estratégias de validação como *hold-out* e validação cruzada (*k-fold*=5), com o objetivo de garantir robustez e generalização dos modelos desenvolvidos. Os critérios de avaliação do sistema abrangem acurácia, sensibilidade, tempo de processamento e viabilidade de operação em tempo real, em consonância com os requisitos de aplicações em reabilitação e assistência biomédica.

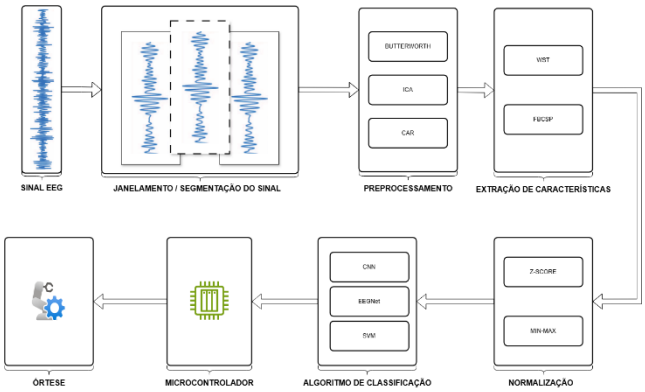


Figura 4. Pipeline de treinamento do sistema

Neste trabalho cinco arquiteturas foram exploradas: CNN1D, CNN2D, EEGNet, DeepConvNet e ShallowFBCSPNet.

Para avaliar a viabilidade em configurações com poucos canais, o protocolo foi replicado no cenário reduzido, com eletrodos posicionados na região sensório-motora [2]. A proporção entre os dados usados no treinamento e na classificação foi de 80% e 20%, respectivamente.

A Figura 5 ilustra a localização desses eletrodos no sistema internacional 10–20 [4].

IV. Resultados

No cenário com 64 canais do conjunto EEGMMI, todos os modelos foram treinados com a mesma rotina de pré-processamento e divisão treino–validação, permitindo comparação direta entre as arquiteturas. Além das curvas de perda e acurácia por época, foram calculadas matrizes de confusão no conjunto de validação, de forma a avaliar o comportamento por classe (repouso, mão esquerda e mão direita) e não apenas a acurácia global.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

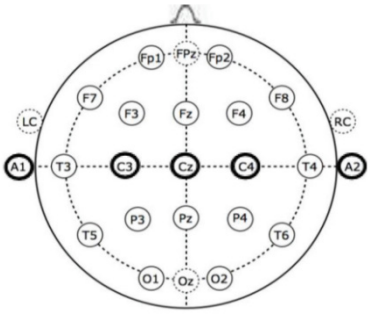


Figura 5. Posicionamento dos eletrodos C3, Cz e C4 no sistema internacional 10–20.

É importante destacar que a classe de repouso possui aproximadamente o dobro de exemplos em relação a cada classe de imagética motora, pois a cada execução de tarefa existe um intervalo de repouso correspondente. Esse desbalanceamento faz com que, em todas as matrizes, o bloco associado ao repouso seja naturalmente mais populoso e que modelos pouco expressivos tendam a "apostar" mais na classe majoritária.

A Tabela 1 apresenta os melhores resultados de validação por arquitetura nos cenários com 64 e 3 eletrodos.

Tabela 1. Desempenho da acurácia dos algoritmos

Modelo	64 eletrodos	3 eletrodos
CNN1D	64,7%	51,4%
CNN2D	83,9%	71,3%
EEGNet	81,3%	67,2%
DeepConvNet	85,0%	68,7%
ShallowFBCSPNet	85,1%	71,1%

No cenário de 64 canais, observa-se melhor desempenho em ShallowFBCSPNet (85,1%) e DeepConvNet (85,0%), seguidos por CNN2D (83,9%) e EEGNet (81,3%). A CNN1D obteve o menor desempenho (64,7%), Figura 6.

Também, os algoritmos ShallowFBCSPNet, Figura 7, e DeepConvNet, exploram melhor a redundância espacial e espectral dos 64 eletrodos, mantendo bom equilíbrio entre acertos em repouso e nas duas classes de imagética motora mesmo em um cenário desbalanceado.

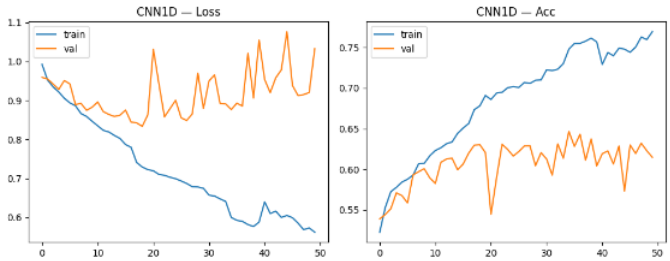


Figura 6. Curvas de perda e acurácia (treino e validação) da CNN1D no cenário com 64 eletrodos.

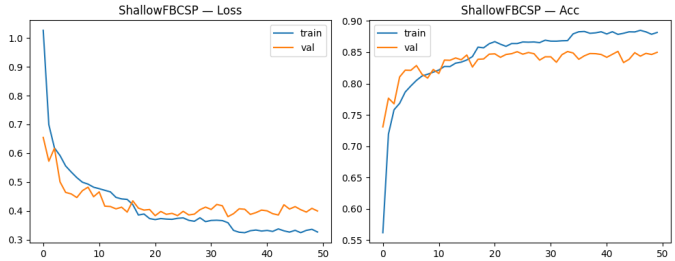


Figura 7. Curvas de perda e acurácia (treino e validação) da ShallowFBCSPNet no cenário com 64 eletrodos.

No cenário com menor número de eletrodos (C3, Cz e C4), há queda sistemática da acurácia, coerente com a menor informação espacial disponível para discriminar classes. No entanto, foi possível manter acurácias próximas de 70% com CNN2D (71,3%), Figura 8, e ShallowFBCSPNet (71,1%), indicando viabilidade para instrumentação compacta. Cabe salientar que os eletrodos selecionados cobrem o córtex motor, o que justifica a eficácia mesmo com baixa densidade. Em termos de decisão para integração embarcada, ambas poderiam ser selecionadas como modelo final no arranjo de três eletrodos por apresentarem o melhor desempenho nesse cenário. A rede CNN1D apresentou o menor desempenho nesse cenário, sendo igual a 51,4%, Figura 9.

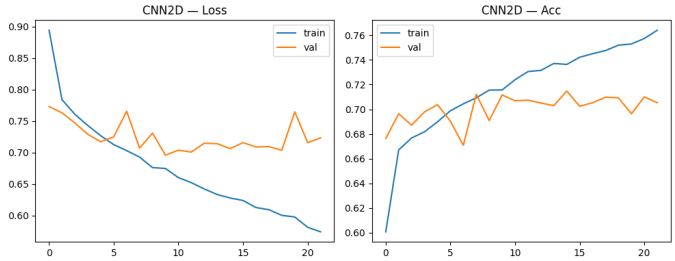


Figura 8. Curvas de perda e acurácia (treino e validação) da CNN2D no cenário com 3 eletrodos.

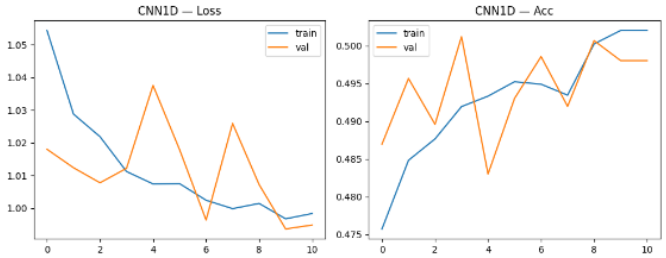


Figura 9. Curvas de perda e acurácia (treino e validação) da CNN1D no cenário com 3 eletrodos.

Os resultados da classificação da CNN2D, realizada com todos os sujeitos do dataset, gerou a matriz de confusão ilustrada na Figura 10.

Analisando a matriz, o classificador apresentou acurácia global de 74,0% e acurácia balanceada de 71,0%. O melhor desempenho foi observado para a classe Repouso (F1-score = 0,80), enquanto as classes de imagética motora (Esquerda e Di-

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

reita) apresentaram menor recall devido à confusão entre essas categorias. O coeficiente Kappa de Cohen (0,58) indica um nível moderado de concordância além do acaso.

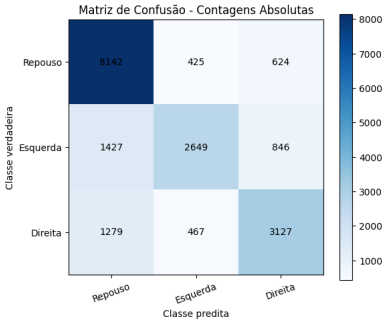


Figura 10. Matriz de confusão da CNN2D no cenário com 3 eletrodos.

V. Discussão e limitações

Os resultados obtidos indicam que arquiteturas baseadas em aprendizado profundo são capazes de identificar padrões de imagética motora mesmo em configurações de EEG de baixa densidade. No cenário com 64 canais, modelos como DeepConvNet e ShallowFBCSPNet apresentaram os melhores desempenhos, o que é consistente com estudos prévios que apontam a capacidade dessas arquiteturas de explorar informações espaciais e espectrais distribuídas no escalpo. A maior quantidade de canais favorece a captura de padrões corticais associados às regiões sensório-motoras, contribuindo para uma separação mais clara entre as classes analisadas.

No cenário reduzido, utilizando apenas três eletrodos posicionados na região sensório-motora (C3, Cz e C4), observou-se uma queda sistemática na acurácia dos classificadores. Esse comportamento é esperado, uma vez que a redução do número de canais implica menor resolução espacial e menor redundância de informação nos sinais de EEG. Ainda assim, arquiteturas como CNN2D e ShallowFBCSPNet mantiveram acurácias próximas de 70%, o que sugere que configurações compactas podem ser viáveis em aplicações assistivas, especialmente quando se busca maior portabilidade e menor complexidade instrumental.

Comparando-se com estudos da literatura que utilizam configurações densas de EEG, frequentemente com mais de 30 ou 60 eletrodos, os resultados obtidos neste trabalho apresentam desempenho inferior em termos de acurácia absoluta. Entretanto, muitos desses sistemas exigem infraestrutura complexa, maior tempo de preparação e menor portabilidade, o que dificulta sua aplicação em cenários de uso cotidiano ou domiciliar. Nesse sentido, a abordagem proposta busca equilibrar desempenho e viabilidade prática, priorizando soluções que possam ser integradas a sistemas embarcados e dispositivos assistivos de baixo custo.

Outro aspecto relevante diz respeito à integração entre o pipeline de classificação e o sistema físico de atuação. Diferentemente de muitos estudos que se concentram exclusivamente na análise algorítmica de sinais EEG, este trabalho considera também a etapa de controle embarcado de uma órtese de mão impressa em 3D. Essa integração permite avaliar a aplicabilidade do sistema em um contexto mais próximo de aplicações reais, ainda que os experimentos tenham sido conduzidos com dados offline provenientes de um conjunto público.

Apesar dos resultados promissores, algumas limitações devem ser consideradas. Primeiramente, os experimentos foram realizados utilizando o conjunto de dados público PhysioNet EEG Motor Movement/Imagery, o que implica que a aquisição dos sinais não foi realizada diretamente no hardware proposto. Assim, a avaliação do sistema ocorre em um cenário offline, sem considerar plenamente fatores presentes em aplicações em tempo real, como ruídos adicionais, variabilidade interindividual e artefatos fisiológicos.

Outra limitação refere-se ao fato de que os dados utilizados foram coletados de indivíduos saudáveis, e não de pacientes com comprometimento motor. Em contextos clínicos, padrões de atividade cortical podem apresentar maior variabilidade, o que pode impactar o desempenho dos modelos de classificação. Além disso, a redução do número de canais, embora benéfica em termos de portabilidade, pode limitar a capacidade de generalização dos modelos para diferentes usuários ou tarefas motoras mais complexas.

Por fim, embora o trabalho demonstre a viabilidade da classificação de imagética motora com apenas três eletrodos, ainda são necessárias investigações adicionais para avaliar o desempenho do sistema em ambientes reais de uso, incluindo testes online, calibração individualizada dos modelos e validação experimental com usuários humanos interagindo diretamente com a órtese.

Conclusão

Este trabalho apresentou e avaliou um pipeline de interface cérebro-computador (BCI) não invasivo para o controle de uma órtese de mão, integrando processamento de sinais de eletroencefalografia, classificação baseada em aprendizado profundo e controle embarcado em um microcontrolador ESP32. O sistema proposto foi analisado em dois cenários experimentais, comparando uma configuração completa com 64 canais de EEG e uma configuração reduzida com três eletrodos posicionados na região sensório-motora (C3, Cz e C4).

No cenário reduzido com três eletrodos (C3, Cz e C4), foi conduzido um *smoke test* e, nesse experimento, o modelo CNN2D alcançou uma acurácia global de 74,0% e uma acurácia balanceada de 71,0%. O melhor desempenho foi observado para a classe Repouso (F1-score = 0,80), enquanto as classes de imagética motora (Esquerda e Direita) apresentaram valores de *recall* inferiores, principalmente devido à confusão entre essas duas categorias. O coeficiente Kappa de Cohen (0,58) indica um nível moderado de concordância além do acaso.

Embora sistemas BCI baseados em montagens de alta densidade frequentemente apresentem maior resolução espacial, os resultados obtidos demonstram que uma configuração mínima de eletrodos ainda pode oferecer desempenho consistente para tarefas de imagética motora, reforçando o potencial de soluções mais portáteis e de menor custo para aplicações assistivas e reabilitadoras.

Os resultados obtidos sugerem que arquiteturas BCI de baixa densidade podem representar uma alternativa viável para

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

aplicações assistivas portáteis, reduzindo significativamente as barreiras de custo e usabilidade em contextos clínicos e domiciliares. No cenário reduzido, arquiteturas como CNN2D e ShallowFBCSPNet apresentaram desempenho superior em relação aos demais modelos avaliados, alcançando acurácias próximas de 70%.

Como principal contribuição, o trabalho demonstra a viabilidade de integrar classificação de imagética motora baseada em aprendizado profundo a um sistema físico de atuação. A integração proposta permite avaliar o desempenho do sistema em um contexto mais próximo de aplicações reais, superando abordagens puramente algorítmicas

Como perspectivas futuras, propõem-se a implementação de aquisição online com hardware de EEG de baixa densidade, o desenvolvimento de técnicas de calibração individualizada para adaptação entre usuários, a incorporação de métodos adicionais de mitigação de artefatos e a realização de experimentos com participantes humanos em ambientes controlados, visando avaliar o desempenho do sistema em condições mais próximas de aplicações reais.

Agradecimentos

Agradecemos ao Ministério de Ciência e Tecnologia da Inovação (MCTI) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro, através da Emenda Federal Individual 966745/2024.

Referências Bibliográficas

[1] A. Ramos-Murguialday et al. "Brain-machine interface in neurorehabilitation of patients with chronic stroke." Annals of Neurology, vol. 74, no. 1, pp. 106–118, 2013. DOI: 10.1002/ana.23879

[2] A. L. Goldberger et al. "PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: Components of a new research resource for complex physiologic signals." Circulation, vol. 101, no. 23, pp. e215–e220, 2000. DOI: 10.1161/01.CIR.101.23.e215

[3] Y. Zhang et al. "A wearable brain–computer interface with fewer EEG channels for online motor imagery detection." Journal of Neural Engineering, vol. 21, no. 2, 2024. DOI: 10.1109/TNSRE.2024.3502135

[4] American Electroencephalographic Society. "Guidelines for standard electrode position nomenclature." Journal of Clinical Neurophysiology, vol. 8, no. 2, pp. 200–202, 1991.

[5] C. E. King et al. "Performance assessment of a brain–computer interface driven hand orthosis." Annals of Biomedical Engineering, vol. 42, no. 10, pp. 2095–2105, 2014. DOI: 10.1007/s10439-014-1066-9

[6] A. Chowdhury et al. "An EEG–EMG correlation-based brain–computer interface for hand orthosis supported neuro-rehabilitation." Journal of Neuroscience Methods, vol. 312, pp. 1–11, 2019. DOI: 10.1016/j.jneumeth.2018.11.010

[7] R. Buragohain et al. "Classification of motor imagery tasks using EEG based on wavelet scattering transform and convolutional neural network." IEEE Sensors Letters, vol. 8, no. 1, 2024. DOI: 10.1109/LSENS.2024.3488356

[8] A. B. Ajiboye and F. R. Willett. "Restoration of reaching and grasping movements through brain-controlled muscle stimulation in a person with tetraplegia: A proof-of-concept demonstration." The Lancet, vol. 389, no. 10081, pp. 1821–1830, 2017. DOI: 10.1016/S0140-6736(17)30601-3

Desafíos y etapas en el diseño y clasificación de un conjunto de datos de caliza utilizando métodos inteligentes

Actividades experimentales en la industria de la piedra caliza.

Challenges and stages in the design and classification of a limestone dataset using intelligent methods

Experimental activities in the limestone industry

Marco Tereso, Ricardo Vardasca, Fernando Bento, António Pratas
ISLA de Santarém, Instituto Politécnico
Santarém, Portugal
marco.tereso@islasantarem.pt, ricardo.vardasca@islasantarem.pt, fernando.bento@islasantarem.pt, antonio.pratas@islasantarem.pt

Luís Rato, Teresa Gonçalves
VISTA Lab, Centro Algoritmi
Universidade de Évora
Évora, Portugal
lmr@uevora.pt, tcg@uevora.pt

***Resumen* — La Inteligencia Artificial (IA) y sus áreas derivadas se integran cada vez más en las tareas diarias, trayendo consigo una gama de herramientas destinadas a facilitar y mejorar los procesos cotidianos. La IA tiene diversas áreas de aplicabilidad, y en todas ellas, la calidad de los datos de soporte es crucial. Este estudio aborda esencialmente estrategias para crear y preparar conjuntos de datos de imágenes para modelos de clasificación automática. El conjunto de datos original consta de 2260 imágenes de piedra caliza distribuidas en cuatro clases; es desequilibrado, compuesto por imágenes de diferentes tamaños, y también contiene una zona de borde considerada una zona de desinterés. Para validar el conjunto de datos utilizado y sus transformaciones, se presentan los resultados de la clasificación de imágenes utilizando modelos de Máquinas de Vectores de Soporte (SVM) y Random Forest, ambos con excelentes resultados, siendo el último ligeramente superior. Este estudio es parte integral de un sólido proyecto de investigación que busca aplicar estrategias de detección de defectos a la piedra caliza.**

***Palabras Clave* – Aprendizaje automático; recorte central; enmascaramiento de ROI; Random Forest, SVM.**

***Abstract* — Artificial Intelligence (AI) and its derived areas are increasingly integrated into daily tasks, bringing with it a range of tools intended to facilitate and improve everyday processes. AI has various areas of applicability, and in all of them, the quality of the data supporting it is crucial. This study essentially addresses strategies in the creation and preparation of an image dataset for automatic classification models. The original dataset consists of 2,260 limestone images distributed across four classes, is unbalanced, composed of images of varying sizes, and also contains a border area that is considered a zone of disinterest. For validation of the dataset used and its transformations, results of image classification are presented, using Support Vector Machine (SVM) and Random Forest models, both with excellent results, with the latter slightly outperforming the former. This study is an integral part of a rather robust investigation, which seeks to apply defect detection strategies in limestone.**

Keywords – ML; center cropping; ROI Masking; Random Forest, SVM.

Introducción

En una era de transformación digital, donde los mercados buscan ser cada vez más competitivos y eficientes, es importante garantizar la calidad del producto para atraer clientes e inversores. La temprana informatización de los procesos laborales permite a las empresas recopilar y utilizar datos para analizarlos y buscar potenciar las fortalezas y reducir las debilidades. Los datos son un activo muy valioso para las empresas [1], pero para extraer el máximo conocimiento de ellos, es fundamental que el conjunto de datos sea lo más robusto posible. Según Gebru et al. [2], los datos son cruciales e influyen fundamentalmente en el comportamiento del modelo. A su vez, Roque et al. [3] mencionan que la selección de datos es tan crucial que puede inflar artificialmente el rendimiento de los modelos débiles.

Este estudio busca enumerar buenas prácticas en la construcción de un conjunto de datos de imágenes, con referencia a un caso práctico aplicado a la caliza. La utilización del conjunto de datos apoyará acciones futuras en la clasificación de las clases de piedra, así como en la identificación de sus defectos, con la implementación de dos subtipos de la IA, Machine Learning (ML) y Deep Learning (DL), importantes para el reconocimiento de patrone [4].

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

ISBN: 978-989-36481-2-4

II. Estudio de caso

Se creó un conjunto de datos compuesto por un total de 2260 imágenes de piedra caliza, proporcionadas por una empresa que procesa rocas ornamentales; estas se pueden clasificar como [CADOICO, SBM (Salgueira Branco Mar), SBR (Salgueira Branco Real) y VMF (Vidraço Moleanos Farpedra)]. La Tabla I muestra la distribución del número de imágenes por clase.

TABLA I. Distribución de imágenes del conjunto de datos por clase

Clase	Número total de ejemplos	% del conjunto de datos
CADOICO	495	22%
SBM	837	37%
SBR	306	13.5%
VMF	622	≈27.5%
TOTAL	2260	100%

La tabla I presenta un cierto desequilibrio entre las clases, siendo que la menor cantidad de ejemplos de la clase SBR puede ser condicionante en la obtención de mejores resultados.

A. *Desafíos de nuestro conjunto de datos*

Con el respaldo de los datos de la Tabla 1, es evidente que el conjunto de datos no está balanceado, ya que la clase SBM presenta la mayor representación, con el 37 % de las imágenes, y la clase minoritaria SBR solo el 13,5 % del conjunto total. Este factor sugiere que, eventualmente, podría ser necesario aplicar técnicas para minimizar cualquier confusión de clasificación entre las clases. Estas técnicas pueden incluir la distribución de pesos durante el entrenamiento del modelo, y el uso de técnicas de aumento de datos también es una buena práctica.

Abdelhamid y Desai [5], en un extenso estudio (9000 experimentos), concluyen que el ajuste de los pesos de las clases es una de las estrategias más efectivas, aunque con variabilidad según el conjunto de datos. A su vez, Chen y Feng [6] asignan pesos a cada clase en función de la dificultad a nivel de categoría, solucionando el sesgo del modelo hacia las clases mayoritarias.

Un estudio de De La Fuente et al. [7] Con imágenes de endoscopia médica, la aplicación de una estrategia de aumento de datos mediante VAE (Enfoques de Autocodificador Variacional) permitió una mejora del 18 % en la clasificación de las clases minoritarias y del 6 % en el resultado general. Kumar et al. [8], por su parte, aplicaron una estrategia híbrida de aumento de datos en encuestas con imágenes de paneles solares, obteniendo mejores resultados con la estrategia de aumento de datos que sin ella.

B. *Problemas registrados en estudios previos*

Estudios previos han detectado problemas de confusión entre las clases SBR y VMF, y se aplicaron ambas técnicas: asignación de pesos diferentes y aumento de datos. En general, ambas mejoraron los resultados globales y permitieron la optimización del modelo. En este caso específico, la asignación de pesos arrojó resultados superiores a las técnicas de aumento de datos, lo que contribuyó a una mejora significativa en la clasificación de imágenes de la clase SBR.

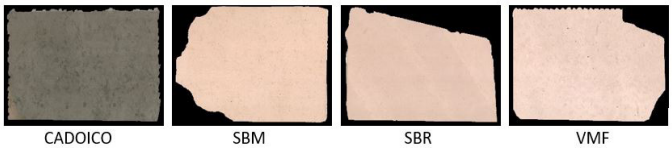


Figura 1. Ejemplos de imágenes de piedras de cada una de las clases.

Las imágenes ilustradas en la Figura 1 se obtienen mediante un escáner que las digitaliza y las guarda en un servidor. La Figura 1 ilustra un ejemplo de cada clase de imagen en el conjunto de datos, demostrando que el formato es dispar, no rectilíneo, y que existe una zona de desinterés, en este caso los bordes negros.

La Figura 1 se puede observar que SBR y VMF son clases con tonalidades similares, lo que ayuda a explicar experimentos previos en los que el modelo confundió ambas clases.

Dado que el tamaño de las imágenes varía considerablemente, así como el tamaño de la zona de interés, y que no existe relación entre la clase y las dimensiones de la imagen, es importante que el conjunto de datos se trate de tal manera que el modelo no considere que pueda existir una relación directa entre los elementos.

C. *Técnicas de preprocesamiento*

Dado que el área de interés de la imagen varía en forma y tamaño de píxel, así como en su posición, es importante aplicar estrategias de preprocesamiento que permitan enfocar el modelo en dicha área. Se emplearon dos estrategias: seleccionar el área de interés desde el centro de la imagen (recorte central), técnica ilustrada en la Figura 2; y definir el límite del área de interés (umbral) mediante la creación de una máscara de Región de Interés (ROI) y considerando únicamente el área correspondiente de la imagen (enmascaramiento de ROI), como se ilustra en la Figura 3.

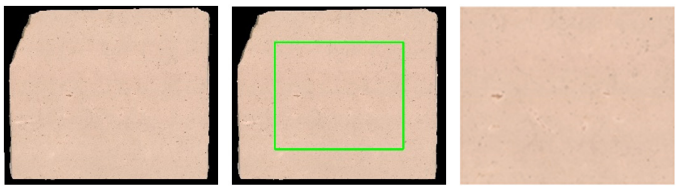


Figura 2. imagen original (izquierda); imagen con la región central seleccionada (centro); imagen procesada (derecha).

Shorten y Khoshgoftaar [9] presentan el recorte central en su estudio como técnica de preprocesamiento para estandarizar las dimensiones y eliminar los bordes no informativos. A su vez, Taylor y Nitschke [10] demuestran que el recorte central mejora la generalización en conjuntos de datos con objetos centrados. En este estudio, se utilizó el recorte central para crear una zona de interés considerando, de la imagen original, solo el 60 % de la altura y el 60 % del ancho desde el centro, como se ilustra en la imagen central de la Figura 2. Consideramos que, en la mayoría de las imágenes de nuestro conjunto de datos, este límite representaba efectivamente la zona de interés.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Figura 3. imagen original (izquierda); Creación de una máscara de ROI (enmascaramiento de ROI) (centro); imagen procesada (derecha).

A su vez, la estrategia ilustrada en la Figura 3 consiste en considerar únicamente el área de interés de la imagen, es decir, aislar la piedra del fondo (lo que se conoce como máscara de segmentación de primer plano (*foreground segmentation mask*)). Girshick et al. [11] introducen el concepto de extracción de ROI basada en regiones propuestas, una estrategia también adoptada por Kaiming He et al. [12], que presenta una estructura que combina la detección de objetos con la segmentación a nivel de píxel. Long et al. [13] también apoya la creación de máscaras píxel a píxel para aislar objetos del fondo.

Se creó un modelo de clasificación que podía utilizar ambas estrategias individualmente, permitiendo modificar el parámetro de entrada y seleccionar el método de preprocesamiento deseado. La técnica de recorte central (*center cropping*) se implementó con central_crop de Tensorflow y la biblioteca OpenCV para aplicar la técnica de enmascaramiento de ROI. De los resultados obtenidos, los mejores resultados se obtuvieron utilizando la estrategia de enmascaramiento de ROI. Conociendo los desafíos de nuestro conjunto de datos, las imágenes ilustradas en la Figura 4 nos permiten identificar problemas en el uso de la estrategia de selección del área de interés desde el centro de la imagen, lo que puede explicar por qué los mejores resultados se obtuvieron con la estrategia ROI Masking.

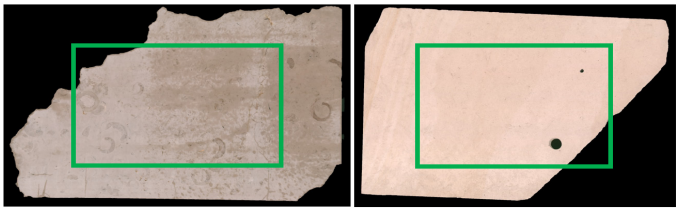


Figura 4. Desafíos que podrían comprometer la estrategia de cultivo central (center cropping)

Como se menciona en la bibliografía citada, diferentes problemas pueden tener diferentes resultados; nuestro objetivo fue encontrar estrategias que pudieran traernos mejoras en la fase de preprocesamiento de imágenes, antes del entrenamiento del modelo.

D. Análisis de características mediante histogramas

Tras la etapa de preprocesamiento y un conjunto de entrenamientos de modelos cuyos resultados fueron muy inferiores a los esperados, se crearon histogramas de las imágenes de las clases para comprender la relación entre sus valores y determinar si los valores de sus características se superponían excesivamente de forma natural. Si bien se trataba de una clase completamente distinta (CADOICO), en términos de tonalidad respecto a las demás (SBM, SBR y VMF), fue posible predecir que, aparentemente, los mayores desafíos se relacionan con la distinción entre estas tres últimas clases.

Se llevó a cabo un proceso manual para identificar las características a analizar, totalizando 47 características, 36 (3 sistemas de color * 3 canales de color * 4 medidas estadísticas) de las cuales estaban relacionadas con características de color y 11 con textura. Las características consideradas a nivel de color fueron la mediana, el RIQ, el rango interpercentil 99-1 y el RIQ medio, considerando los espacios de color RGB (*Red, Green, Blue*), HSV (*Hue, Saturation, Value*) y LAB (*Luminance, Achromatic, Color)* y cada uno de sus tres canales de color. En cuanto a la textura, a nivel estadístico, se consideraron la desviación estándar, el rango y la media; en relación con el operador Sobel, la media, la desviación estándar y el RIQ de la magnitud; y en cuanto a la Matriz de Coocurrencia de Niveles de Gris (GLCM), se analizaron el contraste, la disimilitud, la homogeneidad, la energía y la correlación. Algunas de estas características se seleccionaron con base en trabajos recientes, entre los que destacamos la investigación de Jiani Su et al. [14] sobre la clasificación de lacas de madera.

De todos los histogramas creados, se seleccionaron aquellos que mejor ayudaron a comprender el problema. Las Figuras 5, 6 y 7 ilustran seis histogramas, construidos con base en las características consideradas y detalladas previamente.

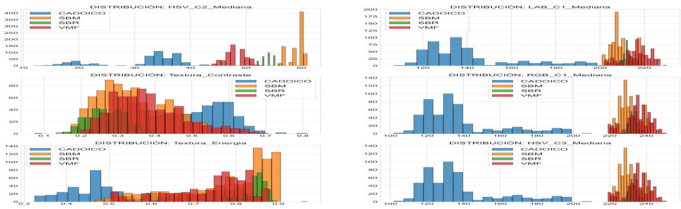


Figura 5. Histogramas de Distribución Mediana del canal 2 HSV (izquierda); Distribución Mediana del canal 1 LAB (derecha).

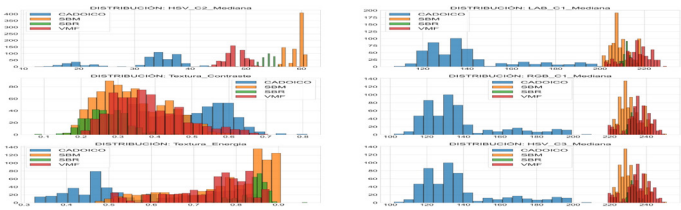


Figura 6. Histogramas de Distribución, textura, contraste (izquierda); Distribución Mediana del canal 1 RGB (derecha).

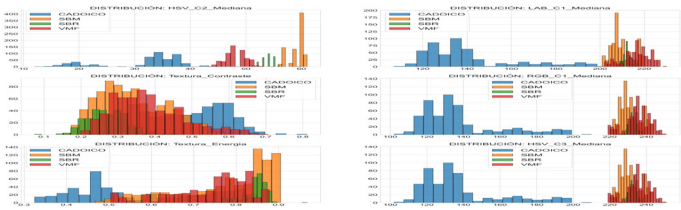


Figura 7. Histogramas de Distribución textura energía (izquierda); Distribución Mediana del canal 3 HSV (derecha).

ISBN: 978-989-36481-2-4

Con base en el análisis de los histogramas, se puede concluir que las características de textura por sí solas no arrojarán buenos resultados. Una conclusión particularmente interesante para la etapa de clasificación es que el canal 2 HSV, es decir, la característica de saturación, destaca en la distribución de las cuatro clases, lo que ilustra una buena separación entre ellas (Figura 5, histograma de la izquierda). En los demás histogramas, existe una convergencia entre las tres clases más similares, lo que sugiere cierta confusión entre ellas. El uso de histogramas permite comprender qué características arrojarán mejores resultados, aunque combinarlas puede ofrecer mayores ventajas.

E. Proceso de formación y resultados obtenidos

Se creó un *pipeline* para recibir las imágenes preprocesadas, con una distribución 70-15-15. Esto significa que el 70 % de las imágenes se utilizó para entrenamiento, el 15 % para validación y el 15 % para pruebas. La Tabla II ilustra la distribución de las imágenes en el conjunto de datos.

TABLA II. DISTRIBUCIÓN DE MUESTRAS DEL CONJUNTO DE DATOS

Clase	Total	entrenamiento	validación	pruebas
CADOICO	495	345	75	75
SBM	837	585	126	126
SBR	306	214	46	46
VMF	622	434	94	94
TOTAL	**2.260**	**1.578**	**341**	**341**

La Tabla III presenta los resultados obtenidos utilizando el clasificador Random Forest y SVM. Se utilizaron las métricas de precisión, recall, puntuación f1 y exactitud. Las Figuras 8 y 9, presentan la Matriz de Confusión, resultante de la misma clasificación. Estos resultados, son resultado del procesamiento de las imágenes del conjunto de datos de prueba.

Cabe mencionar que los resultados obtenidos se deben al número de muestras definido en la Tabla II, utilizando la secuencia de muestreo (pipeline) ya definida.

Como se puede constatar del análisis de la Figura 8, el modelo Random Forest obtuvo total exactitud en la clasificación de las imágenes de las clases CADOICO, SBR y VMF. Todas las imágenes que consideró que eran de la clase SBM las acertó, fallando solo en una de las imágenes, clasificándola como SBR.

Los resultados superan bastante las expectativas, teniendo en cuenta que el conjunto de datos está desbalanceado esencialmente en la clase SBR, y el tono del color de las clases SBM, SBR y VMF es cercano. Veamos ahora la matriz de confusión de la Figura 9, que ilustra los resultados obtenidos utilizando el modelo SVM.

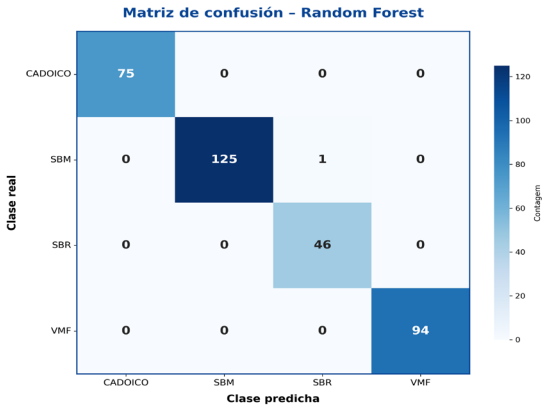


Figura 8. Matriz de confusión de los resultados del modelo Random Forest

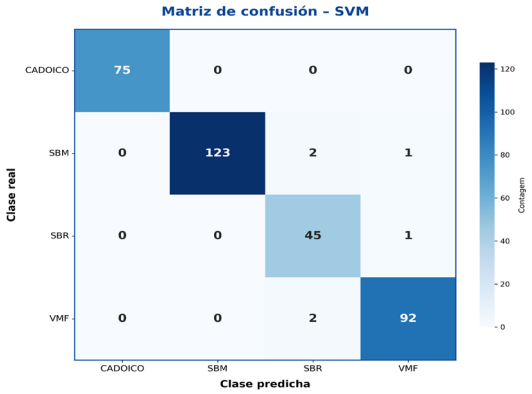


Figura 9. Matriz de confusión de los resultados del modelo SVM

La Matriz de confusión ilustrada a través de la Figura 9, con los resultados de la ejecución del modelo de SVM, se constata que el modelo acertó todas las imágenes de la clase CADOICO al igual que el Random Forest, pero obtuvo peores resultados en las demás clases. A pesar de tener un buen desempeño, los resultados ilustrados por la Matriz de confusión de la Figura 8, con uso del modelo Random Forest, fueron superiores.

TABLA III. RESULTADOS DE LOS MODELOS DE RANDOM FOREST Y SVM UTILIZANDO EL CONJUNTO DE DATOS DE PRUEBAS

Random Forest

Clase	precision	recall	F1-score
CADOICO	1.000	1.000	1.000
SBM	1.000	0.992	0.996
SBR	0.979	1.000	0.989
VMF	1.000	1.000	1.000
Exactitud	**0.997**		

SVM

Clase	precision	recall	F1-score
CADOICO	1.000	1.000	1.000
SBM	1.000	0.976	0.988
SBR	0.918	0.978	0.947
VMF	0.979	0.979	0.979
Exactitud	**0.982**		

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

Podemos concluir que el modelo Random Forest obtuvo mejores resultados que el modelo SVM, aunque ligeramente. Se puede concluir que ambos obtuvieron excelentes resultados. El modelo de clasificación Random Forest solo cometió un error de marcado, confundiendo SBR con SBM. A su vez, el modelo SVM confundió algunos elementos de SBR, SBM y VMF. La clase CADOICO, como se esperaba, no se confundió con las demás.

La ligera superioridad del Random Forest sobre el SVM en este estudio es consistente con las tendencias observadas en la literatura especializada. Un meta-análisis exhaustivo realizado por Sheykhmousa et al. [15]Random Forest (RF (2020), que examinó 251 artículos sobre clasificación de imágenes por teledetección, demostró que el rendimiento relativo entre RF y SVM está fuertemente influenciado por características como el tipo de dato, resolución espacial y número de características. Específicamente, en escenarios con datos desbalanceados, presencia de ruido y alta variabilidad intra-clase — características presentes también en nuestro conjunto de datos de imágenes de piedra, el Random Forest tiende a presentar mayor robustez y mejor capacidad de generalización.

Se creó un gráfico de análisis para evaluar la importancia de las características en el uso del modelo Random Forest. Se muestran las 15 características con mayor importancia para la clasificación. En la Figura 10, se observa que las primeras 4 características representan aproximadamente el 40 % de la importancia total de las 47 características analizadas, lo que demuestra su importancia para la clasificación.

Este análisis también se ve reforzado por los histogramas de las Figuras 5, 6 y 7, analizados previamente. Los modelos de color muestran una enorme importancia, destacando HSV y LAB. Esto nos permite concluir que nuestro conjunto de datos no presenta clasificaciones tan buenas con características de textura.

El gráfico de la Figura 10 muestra las 15 características con mayor importancia, consideradas por el modelo Random Forest como el que obtuvo los mejores resultados.

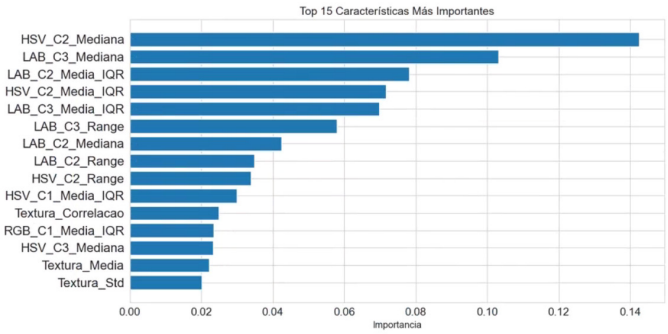


Figura 10. Representación de las características más importantes y su representación porcentual.

III. Conclusiones y trabajos futuros

Este trabajo forma parte integral de un estudio en curso y aborda esencialmente los problemas identificados a lo largo del tiempo en el conjunto de datos y algunos de los experimentos realizados, basándose en la literatura, enumerando las decisiones tomadas que condujeron al éxito de los resultados obtenidos. Es importante mencionar que la base de todo este estudio son decenas de sesiones de entrenamiento fallidas que se llevaron a cabo para extraer lecciones y mejorar el proceso de clasificación, así como las estrategias utilizadas y probadas para lograr mejores resultados.

Conocer las deficiencias en el conjunto de datos es fundamental para obtener los mejores resultados. Identificar los problemas de clasificación y buscar sus causas también es crucial. La estrategia de representar las características en el histograma nos permitió comprender que algunas de las características utilizadas en trabajos anteriores eran la principal limitación. Gracias a este análisis, obtuvimos mejoras significativas al considerar el modelo de color HSV, lo cual resultó ser muy importante, especialmente al analizar el canal de saturación. En este caso, podemos considerar que las características de color eclipsaron las de textura. Los pasos descritos aquí forman parte integral de un estudio más profundo destinado a identificar defectos en la piedra a partir de la imagen. Identificar el tipo de piedra que se analiza es crucial para los pasos posteriores, ya que algunos defectos son más comunes en ciertas clases de piedra, mientras que otros pueden no considerarse defectos según la clase de piedra analizada. Los siguientes pasos consistirán esencialmente en reconocer las áreas defectuosas en las imágenes, teniendo en cuenta la clase analizada, y clasificarlas.

Referencias Bibliográfica

[1] A. Z. Faroukhi, I. El Alaoui, Y. Gahi, and A. Amine, “Big data monetization throughout Big Data Value Chain: a comprehensive review,” J. Big Data 2020 71, vol. 7, no. 1, pp. 3-, Jan. 2020, doi: 10.1186/s40537-019-0281-5.

[2] T. Gebru et al., “Datasheets for datasets,” Commun. ACM, vol. 64, no. 12, pp. 86–92, Dec. 2021, doi: 10.1145/3458723/ASSETS/HTML/UF1.JPG.

[3] L. Roque, V. Cerqueira, C. Soares, and L. Torgo, “Cherry-Picking in Time Series Forecasting: How to Select Datasets to Make Your Model Shine,” Proc. AAAI Conf. Artif. Intell., vol. 39, no. 19, pp. 20192–20199, Apr. 2025, doi: 10.1609/AAAI.V39I19.34224.

[4] C. Gomes “Inteligência Artificial em Imagem Médica: Amiga ou Adversária?” Tese Mestrado Universidade de Coimbra, 2020.

[5] M. Abdelhamid and A. Desai, “Balancing the Scales: A Comprehensive Study on Tackling Class Imbalance in Binary Classification”.

[6] Q. Chen, S. Feng, T. H.-E. A. “Cyclical weighting: A new training strategy for long-tailed recognition,” Elsevier, 2025

[7] N. de la Fuente, M. Majó, I. Luzko, H. Córdova, G. Fernández-Esparrach, and J. Bernal, “Enhancing Image Classification in Small and Unbalanced Datasets Through Synthetic Data Augmentation,” Lect. Notes Comput. Sci. (including Subser. Lect. Notes Artif. Intell. Lect. Notes Bioinformatics), vol. 15196 LNCS, pp. 11–21, 2024, doi: 10.1007/978-3-031-73083-2_2.

[8] R. Kumar, Y. W. Kim, and Y. C. Byun, “Hybrid Framework Combining Diffusion-Based Image Augmentation and Feature Level SMOTE for Addressing Extreme Class Imbalance,” IEEE Access, vol. 13, pp. 154623–154646, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3600622.

[9] C. Shorten and T. M. Khoshgoftaar, “A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning,” J. Big Data 2019 61, vol. 6, no. 1, pp. 60-, Jul. 2019, doi: 10.1186/s40537-019-0197-0.

[10] L. Taylor and G. Nitschke, “Improving Deep Learning with Generic Data Augmentation,” Proc. 2018 IEEE Symp. Ser. Comput. Intell. SSCI 2018, pp. 1542–1547, Jul. 2018, doi: 10.1109/SSCI.2018.8628742.

[11] R. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik, “Rich Feature Hierarchies for Accurate Object Detection and Semantic Segmentation.” pp. 580–587, 2014.

[12] K. He, G. Gkioxari, P. Dollar, and R. Girshick, “Mask R-CNN.” In Proceedings of the IEEE international conference on computer vision (pp. 2961-2969), 2017.

[13] J. Long, E. Shelhamer, and T. Darrell, "Fully Convolutional Networks for Semantic Segmentation." In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition pp. 3431–3440, 2015.
[14] J. Su, J. Zhu, H. Zhu, Y. Zhang, and G. Yang, "Research on information extraction and classification of color and texture visual features of artificial board wood grain veneer based on machine vision," Measurement, vol. 256, p. 118091, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.118091.
[15] M. Sheykhmousa et al., "Support Vector Machine Versus Random Forest for Remote Sensing Image Classification: A Meta-Analysis and Systematic Review," IEEE J. Sel. Top. Appl. EARTH Obs. Remote Sens., vol. 13, p. 2020, doi: 10.1109/JSTARS.2020.3026724.

ISBN: 978-989-36481-2-4

Efetividade Operacional do Monitoramento de Radiofrequência na Detecção de VANTs

Estudo Comparativo Brasil – Malásia

Operational Effectiveness of Radio Frequency Monitoring in UAV Detection

A Comparative Brazil – Malaysia Study

Fausto Henrique Oliveira Pinto Nadiceo Cecílio Dalledone, Daniel Alves da Silva, Fábio Lúcio Lopes de Mendonça, Georges Daniel Amvame Nze, Marilia Cristina Sassim Jesus, Mauri Sudário Ferreira Dantas
Programa de Mestrado Profissional em Engenharia Elétrica (PPEE)
Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília (UnB)
Brasília, Brasil
fausto.ceciliodalledone@gmail.com, daniel.alves@unb.br, fabio.mendonca@redes.unb.br
georges@unb.br, marilia.jesus@redes.unb.br, maurisudario@icloud.com

***Re**sumo* — **Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ampliaram sua presença em aplicações civis, comerciais e institucionais, tornando relevante a supervisão do espectro de radiofrequência (RF) em áreas sensíveis. Este artigo apresenta estudo exploratório comparativo, de base observacional, entre dois cenários: Kuala Lumpur (Malásia), onde uma ativação do transceptor em ambiente adjacente ao aeroporto foi seguida de abordagem institucional em curto intervalo, e Brasília (Brasil), onde não houve resposta institucional externamente observável após ativações repetidas sob parâmetros técnicos comparáveis. Complementarmente, aplica-se a modelagem de Perda em Espaço Livre (FSPL) como baseline físico idealizado de plausibilidade da recepção do sinal. Os achados sugerem que a existência de arcabouço regulatório, isoladamente, não assegura efetividade operacional observável, a qual depende da articulação entre norma, sensoriamento e prontidão institucional de resposta.**

***Palavras-Chave* – veículos aéreos não tripulados, monitoramento de radiofrequência, fiscalização do espectro, sistemas ciberfísicos, áreas sensíveis.**

***Abstract* — Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) have expanded their presence in civil, commercial, and institutional applications, making radio frequency (RF) spectrum supervision increasingly relevant in sensitive areas. This paper presents an exploratory, observational comparative study between two scenarios: Kuala Lumpur (Malaysia), where a transceiver activation in an airport-adjacent environment was followed by institutional intervention within a short time interval, and Brasília (Brazil), where no externally observable institutional response occurred after repeated activations under comparable technical parameters. Additionally, Free Space Path Loss (FSPL) modeling is applied as an idealized physical baseline for signal reception plausibility. The findings suggest that the existence of a regulatory framework alone does not ensure observable operational effectiveness, which depends on the articulation among regulation, sensing capability, and institutional response readiness.**

Keywords – unmanned aerial vehicles, radio frequency monitoring, spectrum enforcement, cyber-physical systems, sensitive areas.

I. Introdução

A difusão de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) em ambientes urbanos, comerciais e institucionais ampliou a relevância do monitoramento do espectro de radiofrequência (RF) como instrumento de percepção situacional e apoio à fiscalização. No Brasil e em outras jurisdições, a expansão do uso civil dessas plataformas ocorreu em paralelo à consolidação de regras operacionais, exigências de acesso ao espaço aéreo e procedimentos de conformidade técnica dos equipamentos. Ainda assim, a existência dessas normas não resolve, por si só, a supervisão prática de operações potencialmente irregulares em áreas sensíveis [1]–[2].

Do ponto de vista técnico, diferentes abordagens podem ser empregadas para detectar VANTs, incluindo sensores ópticos, acústicos, radar e análise de sinais de RF. Entre essas alternativas, o monitoramento passivo do espectro possui interesse particular por atuar diretamente sobre enlaces de controle, telemetria e outras emissões associadas à operação da plataforma, oferecendo potencial de detecção precoce sem depender estritamente de linha de visada visual [3]–[6]. Em paralelo, estudos recentes mostram que sistemas baseados em análise espectral, aprendizado de máquina e rádio definido por software (SDR) vêm ampliando a capacidade de detectar e classificar sinais associados a VANTs em cenários complexos [7]–[13].

Em contextos reais, especialmente nas proximidades de aeroportos e outras infraestruturas críticas, o problema não se esgota na viabilidade técnica da detecção, envolvendo também a relação entre arcabouço regulatório, capacidade de sensoriamento, interpretação do evento e prontidão institucional de resposta. Assim, possuir regras formais para operação de VANTs não equivale automaticamente a demonstrar efetividade opera-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

cional observável diante da ativação de sinais compatíveis com a presença dessas plataformas em ambiente sensível.

Além da dimensão operacional, o tema é relevante para a segurança ciberfísica. VANTs contemporâneos operam como sistemas ciberfísicos dependentes de enlaces de comunicação, sensores embarcados, software de controle e mecanismos de navegação, o que amplia sua superfície de exposição e seu potencial de uso indevido em reconhecimento, coleta de dados, interferência e apoio à intrusão [14]–[17]. Nesse quadro, a observação do espectro de RF pode ser compreendida não apenas como mecanismo de fiscalização, mas também como camada inicial de alerta em arquiteturas de proteção de áreas restritas.

É nesse ponto que se insere o problema investigado neste artigo: a existência de um arcabouço regulatório é suficiente para assegurar efetividade operacional observável na fiscalização do espectro de RF associado a VANTs em áreas sensíveis? Para enfrentá-lo, o trabalho adota um estudo exploratório comparativo, de base observacional, entre dois cenários empíricos distintos: Kuala Lumpur (Malásia), onde uma ativação do transceptor em ambiente adjacente ao aeroporto foi seguida de abordagem institucional em curto intervalo de tempo, e Brasília (Brasil), onde não houve resposta institucional externamente observável após ativações repetidas sob parâmetros técnicos comparáveis.

A investigação não se apresenta como auditoria direta de sistemas oficiais de monitoramento, nem como experimento controlado com acesso à infraestrutura estatal de detecção. Seu objetivo é contrastar, com apoio de evidência observacional e modelagem física idealizada, a diferença entre regulação formal, plausibilidade técnica de recepção e efetividade operacional externamente perceptível. Para isso, a modelagem de Perda em Espaço Livre (Free Space Path Loss – FSPL) é empregada como baseline físico de plausibilidade da recepção em 2,4 GHz e 5,8 GHz, sem pretensão de reproduzir integralmente a complexidade do canal urbano real.

As principais contribuições deste trabalho consistem em apresentar contraste observacional entre dois contextos regulatórios e operacionais de supervisão do espectro em áreas sensíveis, empregar a modelagem FSPL como baseline técnico reprodutível de plausibilidade física da recepção do sinal em 2,4 GHz e 5,8 GHz, discutir a distinção entre regulação formal, plausibilidade física de detecção e resposta operacional observável, e enquadrar o monitoramento passivo de RF como camada inicial de alerta em arquiteturas de defesa ciberfísica.

Com esse enquadramento, o artigo não pretende afirmar superioridade normativa nem generalizar capacidades institucionais a partir de dois episódios observacionais. Seu propósito é tornar visível a diferença entre possuir regras e convertê-las, em ambiente sensível, em meios efetivos de percepção e resposta.

II. Contexto Regulatório

No Brasil, a governança das operações com VANTs envolve, de forma complementar, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), responsável pelas regras operacionais; o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), encarregado do acesso ao espaço aéreo e dos procedimentos associados à Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas (SARPAS); e a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), responsável pela certificação e homologação de equipamentos de telecomunicações, com procedimento recente específico para VANTs [18]–[21]. Esse arranjo mostra que a regulação do tema não se limita ao voo, alcançando também a regularidade do equipamento e o uso do espectro.

Na Malásia, a Civil Aviation Authority of Malaysia (CAAM) concentra a regulação aeronáutica das operações com sistemas de aeronaves não tripuladas (UAS) e disponibiliza orientações e autorizações para diferentes perfis de risco, enquanto a Malaysian Communications and Multimedia Commission (MCMC) atua na esfera de comunicações e espectro [22]–[23].

Em ambos os casos, observa-se alinhamento com a lógica de harmonização internacional promovida pela Organização da Aviação Civil Internacional (ICAO), no plano regulatório, e pela União Internacional de Telecomunicações (ITU), no plano da coordenação do espectro [24]. Contudo, a existência de marcos institucionais semelhantes não implica, automaticamente, equivalência de cobertura operacional, densidade de sensoriamento ou velocidade de resposta institucional.

III. Trabalhos Relacionados

A literatura recente mostra avanço consistente nas abordagens de detecção e classificação de VANTs por RF [5], [6], [11], [25]. Basak et al. [7], Medaiyese et al. [8] e Yang et al. [9] exploram, por diferentes estratégias, a detecção, identificação e classificação de sinais associados a VANTs, inclusive em presença de sinais concorrentes, como Wi-Fi e Bluetooth, reforçando o potencial de inferência sobre o comportamento operacional.

Em linha semelhante, Zahid et al. [10] mostram que técnicas de RF fingerprinting associadas a aprendizado profundo podem alcançar elevada acurácia na classificação passiva de sinais de drones. Em perspectiva mais ampla, revisões recentes indicam que a detecção de VANTs é tratada como problema multissensorial, combinando métodos ópticos, acústicos, radar e RF, com destaque para o papel do sensoriamento baseado em SDR em cenários de menor custo [3]–[6], [26].

Entretanto, a maior parte desses trabalhos concentra-se na viabilidade técnica de detectar, classificar ou rastrear emissões associadas a drones. Permanece menos explorada a dimensão da efetividade operacional da supervisão espectral em contexto regulatório real, isto é, a distância entre a existência formal de regras e a capacidade observável de perceber e responder a ativações de RF em áreas sensíveis. É nessa lacuna que se insere o presente estudo.

IV. Metodologia

Esta pesquisa adota delineamento exploratório, qualitativo e comparativo, de base observacional, voltado a examinar, em contexto empírico, a relação entre ativação deliberada de emissões de RF, resposta institucional externamente observável e efetividade operacional em áreas sensíveis. O estudo não constitui auditoria direta de infraestrutura estatal de monitoramento nem experimento controlado com acesso a sensores, logs ou protocolos oficiais. Seu foco recai sobre episódios empíricos nos quais transmissões compatíveis com a operação de uma plataforma comercial de VANT foram ativadas em contextos aeroportuários sensíveis, observando-se a existência, a rapidez e a visibilidade externa de eventual resposta institucional.

ISBN: 978-989-36481-2-4

A unidade analítica adotada foi o episódio de ativação de emissões associadas ao sistema aéreo não tripulado. A variável central de interesse não foi a existência abstrata de regulação, mas a prontidão operacional observável diante da emissão deliberada do sinal. Em consequência, a resposta institucional externamente perceptível foi utilizada como proxy empírica prudente de efetividade operacional, entendida, neste estudo, como manifestação prática e visível de eventual reação institucional ao evento observado. Essa escolha metodológica permite comparar os cenários a partir de um critério comum de observação, sem pretensão de inferir, de forma causal e exclusiva, qual sensor, órgão ou mecanismo institucional motivou eventual abordagem.

Para fins de enquadramento técnico, considerou-se uma plataforma comercial DJI Phantom 4 Pro, inserida no ecossistema dual-band típico de enlaces em 2,4 GHz e 5,8 GHz. Como parâmetros de referência, adotaram-se essas faixas de frequência, potência de transmissão de 20 dBm (100 mW) e apoio de instrumentação portátil para observação espectral em campo, RF Explorer. Como os episódios empíricos antecedem a formalização acadêmica do protocolo, parâmetros instrumentais como ganho exato de antena, sensibilidade efetiva do receptor e largura de banda operacional não puderam ser integralmente reconstituídos. Por essa razão, a comparação foi estruturada a partir das variáveis recuperáveis com maior confiabilidade analítica: contexto espacial, momento de ativação, persistência temporal da emissão, faixa de frequência, ordem de grandeza da potência e presença ou ausência de resposta observável.

A. Kuala Lumpur, Malásia

O cenário malaio esteve associado à permanência profissional do operador em Kuala Lumpur para cobertura aérea de evento internacional realizado no Sepang International Circuit, complexo situado em área adjacente ao Aeroporto Internacional de Kuala Lumpur. Distinguem-se, para fins analíticos, dois momentos. O primeiro, que constitui o núcleo comparativo do caso malaio, ocorreu em 27 de novembro de 2016, por volta das 22h, em hotel adjacente ao complexo aeroportuário, quando uma única ativação do transceptor, durante teste e calibração iniciais, foi seguida de abordagem por agentes uniformizados em intervalo inferior a cinco minutos, sem tempo hábil para decolagem. Embora o estudo não permita atribuir essa abordagem exclusivamente ao monitoramento RF, o episódio é interpretado como evidência observacional de resposta institucional rápida em ambiente sensível. O segundo momento compreende os dias 28 a 30 de novembro de 2016, no Sepang International Circuit, quando houve múltiplas ativações e voos curtos de baixa altitude em área autorizada, sob acompanhamento de autoridades e com restrição explícita de não operar em direção ao aeroporto. Esses voos não constituem a evidência principal de resposta rápida utilizada na comparação com o Brasil, servindo apenas como contexto operacional complementar.

B. Brasília, Brasil

No cenário brasileiro, as observações ocorreram em abril de 2025, nas proximidades do Aeroporto Internacional de Brasília, a partir de ativações deliberadas e repetidas ao longo do perímetro analisado. Em distâncias entre 100 m e 400 m, rádio e aeronave permaneceram energizados em solo, mantidos em mãos, sem decolagem. Em torno de 800 m, foram realizadas algumas decolagens curtas e de baixa altitude, com o objetivo de verificar a ocorrência de alerta ou abordagem institucional. Também ocorreram ativações adicionais em deslocamentos de aproximação e afastamento, alcançando até 2000 m. No conjunto, registraram-se mais de 15 ativações e mais de 3 horas acumuladas de transmissão, sem abordagem institucional direta externamente observável nas condições testadas. Essa ausência não demonstra, por si só, inexistência absoluta de monitoramento; em termos metodológicos, indica que não houve resposta institucional externamente perceptível na janela empírica considerada. Entre os fatores alternativos compatíveis com esse resultado estão cobertura sensorial insuficiente, geometria desfavorável de recepção, interferência em bandas compartilhadas, ausência de correlação entre eventual detecção e protocolo de resposta ou dinâmica organizacional que não tenha produzido abordagem visível ao operador.

C. Critérios de comparação e fronteiras inferenciais

A comparação entre os cenários foi estruturada a partir de três eixos: (i) contexto regulatório e institucional; (ii) plausibilidade técnica da recepção do sinal, discutida com apoio da modelagem FSPL; e (iii) resposta institucional observável após ativação deliberada das emissões. O objetivo não foi estabelecer equivalência experimental plena entre os episódios, mas contrastar, em chave analítica, a diferença entre possuir marco regulatório formal e convertê-lo em prontidão operacional observável. Em consequência, os achados devem ser lidos como evidência exploratória, e não como prova conclusiva de desempenho sistêmico nacional.

A lógica interpretativa do estudo distingue três níveis: detectabilidade técnica plausível, observabilidade empírica do evento e efetividade operacional observada. A primeira diz respeito ao que é fisicamente compatível com monitoramento em condições ideais; a segunda, ao que pôde ser percebido no campo; e a terceira, ao que se manifestou, ou não, como resposta institucional no contexto analisado. Essa distinção evita tomar toda ausência de abordagem como prova de inexistência de monitoramento, ou toda abordagem como evidência conclusiva de detecção exclusivamente por RF. A observação espectral limitou-se à dimensão externa das emissões, sem acesso ao conteúdo das comunicações nem decodificação de tráfego privado, e sem finalidade de interferir em operações aeronáuticas ou contornar mecanismos de segurança.

V. Modelagem FSPL

A perda em espaço livre foi calculada conforme a Recomendação ITU-R P.525 [27]:

$$FSPL = 20\log_{10(d)} + 20\log_{10(f)} + 20\log_{10\left(\frac{4\pi}{c}\right)} \quad (1)$$

Em que “d” representa a distância em metros, “f” a frequência em hertz e “c” a velocidade da luz.

A potência recebida em espaço livre foi estimada a partir da formulação de Friis [28]:

$$P_{r(d)} = P_t - FSPL(d) \quad (2)$$

Considerando . O objetivo da modelagem não é demonstrar, por si só, detectabilidade operacional completa em ambiente urbano, mas estabelecer um baseline físico idealizado de plausib-

ISBN: 978-989-36481-2-4

ilidade da recepção do sinal para comparação com a evidência observacional.

Assim, a FSPL é empregada neste trabalho como referência físico-analítica mínima. O modelo não incorpora multipercurso, obstruções urbanas, orientação de antenas, largura de banda, ruído local, limiar efetivo do receptor nem procedimentos institucionais de correlação e resposta. Ainda assim, oferece base quantitativa útil para discutir se os níveis de potência estimados são, em princípio, compatíveis com a recepção do sinal nas distâncias analisadas. Em consequência, a modelagem deve ser lida como apoio comparativo à análise, e não como demonstração autônoma de detectabilidade operacional em ambiente urbano real.

VI. Dimensão Cibernética da Ameaça Associada a VANTs

Embora tratados sobretudo como plataformas aéreas, os VANTs devem ser compreendidos como sistemas ciberfísicos, pois sua operação depende da integração entre software, enlaces de comunicação, sensores, navegação e payload [14], [16]–[17]. Essa característica amplia o risco para além do voo indevido, alcançando vetores de coleta, transmissão, interferência e exploração de dados. Nesse ecossistema, destacam-se o enlace de controle, tipicamente associado às faixas de 2,4 GHz e 5,8 GHz, os mecanismos de telemetria e navegação, dependentes de sistemas globais de navegação por satélite e suscetíveis a interferência e spoofing [12]–[13], [29], e o payload embarcado, que pode incluir vídeo, imagem, áudio e outros sensores.

Em áreas sensíveis, essa interdependência reforça o monitoramento passivo de RF como camada inicial de alerta, pois anomalias de comunicação podem anteceder comportamentos operacionais relevantes. Sob a ótica ofensiva, drones não autorizados podem ser empregados em reconhecimento de perímetros, coleta de informações operacionais, apoio à intrusão, entrega de pequenos dispositivos e perturbação de serviços, combinando vulnerabilidades de comunicação, navegação, software e operação, com impactos sobre privacidade, segurança e continuidade de processos sensíveis [14], [17]. Nesses contextos, a utilidade operacional do monitoramento do espectro depende não apenas da captação do sinal, mas também da coordenação institucional, da governança da informação e da integração do alerta a fluxos de decisão e resposta [30].

VII. Arquitetura Proposta de Monitoramento

À luz da literatura e do contraste observacional discutido, propõe-se uma arquitetura conceitual de monitoramento contínuo do espectro RF em áreas restritas, organizada como cadeia funcional de aquisição, processamento, correlação e resposta. Sensores passivos baseados em receptores de banda larga ou SDR realizam varredura das faixas de interesse, com destaque para 2,4 GHz e 5,8 GHz; rotinas de processamento extraem eventos relevantes, estimam níveis de potência, duração, ocupação espectral e padrões temporais; mecanismos analíticos correlacionam ocorrências, reduzem ambiguidades e priorizam alertas conforme o contexto operacional [5], [6]. O estágio final corresponde à resposta institucional, incluindo registro padronizado, acionamento de segurança, integração com outras camadas sensoriais e preservação de trilha de auditoria. Nessa lógica, o monitoramento RF é compreendido como componente de apoio à decisão, e não como sensor único. A Fig. 1 sintetiza essa arquitetura conceitual.

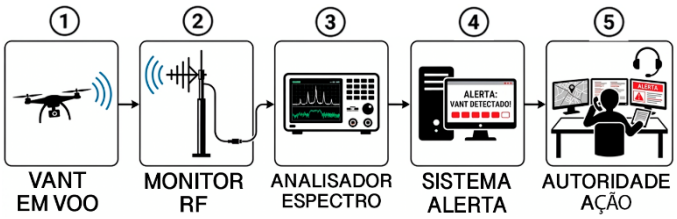


Figura 1. Arquitetura conceitual para monitoramento de RF

VIII. Resultados

Os episódios observados evidenciam contraste operacional entre os dois cenários analisados. No caso malaio, o núcleo comparativo corresponde à ativação única do transceptor, em 27 de novembro de 2016, em ambiente adjacente ao complexo aeroportuário de Kuala Lumpur, seguida de abordagem por agentes uniformizados em menos de cinco minutos, sem tempo hábil para decolagem. O resultado é compatível com prontidão institucional célere em ambiente sensível, embora não permita atribuir a abordagem, de forma causal e exclusiva, a um único mecanismo de detecção.

No cenário brasileiro, registraram-se, em abril de 2025, ativações deliberadas e repetidas nas proximidades do Aeroporto Internacional de Brasília, totalizando mais de 15 ativações e mais de 3 horas de transmissão, sem abordagem institucional direta externamente perceptível nas condições testadas. Em termos empíricos, o resultado indica ausência de resposta prática visível na janela observacional considerada, sem autorizar concluir inexistência absoluta de monitoramento.

A Tabela I apresenta os valores estimados de FSPL e potência recebida em 2,4 GHz e 5,8 GHz para \(P_t = 20\,\mathrm{dBm}\). Em condição ideal de espaço livre, os níveis estimados permanecem compatíveis com a recepção do sinal, sobretudo em 2,4 GHz. Essa modelagem reforça a plausibilidade física mínima da recepção, mas não deve ser confundida com demonstração autônoma de detectabilidade operacional plena, pois a FSPL não incorpora multipercurso, obstruções urbanas, interferência em bandas compartilhadas, orientação de antenas, ruído local, limiar efetivo do receptor nem procedimentos institucionais de correlação e resposta [27]–[28].

TABELA I. FSPL e Potência Recebida (PR) em 2,4 GHz e 5,8 GHz Para P = 20 dBm

Distância (m)	FSPL 2,4	PR 2,4	FSPL 5,8	PR 5,8
400	92.09	-72.09	99.76	-79.76
800	98.11	-78.11	105.78	-85.78
1200	101.64	-81.64	109.30	-89.30
1600	104.13	-84.13	111.80	-91.80
2000	106.07	-86.07	113.74	-93.74

Em termos interpretativos, a principal contribuição dos resultados não está em afirmar superioridade normativa abstrata

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

de uma jurisdição sobre outra, mas em tornar empiricamente visível a diferença entre possuir arcabouço regulatório formal e convertê-lo em resposta operacional externamente observável. No caso brasileiro, continuam plausíveis explicações alternativas para a ausência de intervenção visível, como cobertura sensorial insuficiente, geometria desfavorável de recepção, saturação ou interferência em faixas compartilhadas, ausência de correlação entre eventual detecção e protocolo de resposta, ou percepção institucional sem abordagem externamente perceptível. Essas hipóteses não anulam o contraste empírico encontrado; apenas reforçam a necessidade de prudência interpretativa.

Sob a ótica da segurança ciberfísica, o contraste permanece relevante. Se plataformas comerciais não autorizadas podem ser empregadas em reconhecimento, coleta de dados, observação de perímetro, apoio à intrusão ou exposição informacional, então a ausência de alerta institucional precoce tende a ampliar a janela de vulnerabilidade de infraestruturas sensíveis [15], [17], [31]. Do ponto de vista físico, a formulação de FSPL também sugere crescimento logarítmico da atenuação com a distância, e não ruptura abrupta da perceptibilidade do sinal; por isso, os 2000 m adotados no estudo devem ser lidos como referência conservadora dentro do modelo ideal empregado, e não como limite físico rígido da recepção [27]–[28].

IX. Limitações e Trabalhos Futuros

As limitações deste estudo decorrem de sua natureza exploratória, comparativa e observacional. O trabalho não constitui experimento controlado com acesso a sistemas oficiais, nem auditoria direta da infraestrutura estatal de monitoramento do espectro ou do espaço aéreo; por isso, seus resultados devem ser lidos como evidência empírica inicial de prontidão operacional observável, e não como mensuração exaustiva da capacidade institucional de cada país. A base empírica também se apoia em número reduzido de cenários e em episódios assimétricos quanto ao contexto de ativação. Embora frequência, ordem de grandeza da potência e persistência de emissão tenham sido mantidas como referência comparativa, nem todos os parâmetros instrumentais puderam ser reconstituídos com precisão equivalente. Além disso, o estudo não permite isolar o mecanismo específico da abordagem no episódio malaio, nem concluir que a ausência de intervenção visível no cenário brasileiro corresponda à inexistência absoluta de detecção. Há, ainda, limitação temporal e contextual: o episódio malaio nuclear ocorreu em teste prévio à operação autorizada no evento, enquanto, no Brasil, as ativações ocorreram em contexto deliberadamente observacional. Essa diferença não invalida a comparação, mas exige leitura analítica, e não equivalência experimental plena.

Como desdobramentos futuros, recomenda-se replicar o protocolo em múltiplos locais, sob diferentes densidades urbanas, níveis de ruído espectral e graus de proximidade com infraestruturas sensíveis, bem como incorporar caracterização mais precisa da instrumentação de observação. Também é desejável integrar monitoramento RF com sensores visuais, registros contextuais e procedimentos institucionais de resposta, a fim de reduzir ambiguidades e ampliar a capacidade de atribuição operacional. Por fim, estudos futuros podem aprofundar a correlação entre detectabilidade técnica, governança regulatória e fluxos concretos de decisão institucional em arquiteturas de defesa ciberfísica.

X. Conclusão

Este artigo examinou, em perspectiva exploratória e comparativa, se a existência formal de arcabouço regulatório é suficiente para assegurar efetividade operacional observável na supervisão de emissões associadas a VANTs em áreas sensíveis. A partir de dois cenários empíricos, nas proximidades dos aeroportos internacionais de Kuala Lumpur e de Brasília, os achados sugerem que não. Embora ambos os contextos apresentem estruturas regulatórias formais, o contraste observacional indica que a mera presença de normas não assegura, por si só, resposta institucional perceptível. A modelagem FSPL complementou essa leitura ao oferecer um baseline físico de plausibilidade da recepção do sinal em 2,4 GHz e 5,8 GHz, mas, por seu caráter idealizado, não substitui a realidade operacional do canal urbano nem prova, isoladamente, detectabilidade institucional garantida [27]–[28].

Do ponto de vista científico, o contributo central do trabalho está em distinguir regulação formal, plausibilidade física de recepção e efetividade operacional observável. Sob a ótica da segurança ciberfísica, essa distinção é relevante porque plataformas não autorizadas podem ser empregadas em reconhecimento, coleta de dados e apoio à intrusão, de modo que o monitoramento passivo de RF pode atuar como camada inicial de alerta e apoio à consciência situacional [15], [17]. O estudo não pretende demonstrar causalidade fechada nem generalizar, de forma estatística, a capacidade institucional de países inteiros a partir de dois episódios observacionais. Seu resultado é mais delimitado: os episódios analisados sugerem que a efetividade operacional da supervisão do espectro em áreas sensíveis depende menos da existência abstrata de um marco regulatório e mais de sua conversão prática em meios de percepção e resposta institucional em tempo compatível com o risco.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio técnico e computacional do Laboratório LATITUDE, da Universidade de Brasília, a Secretaria Nacional de Assistência Social – SNAS/MDS, a Procuradoria Geral da Fazenda Nacional – PGFN, ao Projeto SISTER City – Sistemas Inteligentes Seguros e em Tempo Efetivo Real para Cidades Inteligentes ao projeto "Sistema de Controle e Unificação de Projetos para o Governo Distrito Federal – SISPRO-DF", ao projeto "Pesquisa, Desenvolvimento e Aplicação de Protótipo do Ambiente de Simulação Didático para Veículos Ciberseguros, Autônomos e Conectados (SD-CyberAuto)". Projeto "Pesquisa, Desenvolvimento e Aplicação – Metodologia para Apoio à Obtenção de Requisitos Éticos e de Privacidade" (Auxílio 514/2023) e a Fundação de Apoio do Distrito Federal - FAP/DF.

Referências Bibliográficas

[1] Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), ``Regras vigentes para operação de drones.'' [Online]. Available: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones/regras-de-todos-os-orgaos-brasileiros-sobre-operacao-de-drones. Updated: Jul. 3, 2025. Accessed: Mar. 26, 2026.

[2] M. F. Neto and F. de P. B. Furlaneto, ``Estudo sobre a responsabilidade decorrente do uso de `veículo aéreo não tripulado' (drone) no Brasil,'' Research, Society and Development, vol. 11, no. 4, p. e47811427834, 2022, doi:10.33448/rsd-v11i4.27834.

[3] F.-L. Chiper, A. Martian, C. Vladeanu, I. Marghescu, R. Craciunescu and O. Fratu, ``Drone Detection and Defense Systems: Survey and a Software-Defined Radio-Based Solution,'' Sensors, vol. 22, no. 4, p. 1453, 2022, doi:10.3390/s22041453.

[4] U. Seidaliyeva, L. Ilipbayeva, K. Taissariyeva, N. Smailov and E. T. Matson, ``Advances and Challenges in Drone Detection and Classification Techniques: A State-of-the-Art Review,'' Sensors, vol. 24, no. 1, p. 125, 2024, doi:10.3390/s24010125.

[5] X. Yan, T. Fu, H. Lin, F. Xuan, Y. Huang, Y. Cao, H. Hu and P. Liu, ``UAV Detection and Tracking in Urban Environments Using Passive Sensors: A Survey,'' Applied Sciences, vol. 13, no. 20, p. 11320, 2023, doi:10.3390/app132011320.

[6] I. Bisio, C. Garibotto, H. Haleem, F. Lavagetto and A. Sciarrone, ``RF/WiFi-based UAV surveillance systems: A systematic literature review,'' Internet of Things, vol. 26, Art. no. 101201, 2024, doi:10.1016/j.iot.2024.101201.

[7] S. Basak, S. Rajendran, S. Pollin and B. Scheers, ``Combined RF-Based Drone Detection and Classification,'' IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, vol. 8, no. 1, pp. 111–120, Mar. 2022, doi:10.1109/TCCN.2021.3099114.

[8] O. O. Medaiyese, M. Ezuma, A. P. Lauf and A. A. Adeniran, ``Hierarchical Learning Framework for UAV Detection and Identification,'' IEEE Journal of Radio Frequency Identification, vol. 6, pp. 176–188, 2022, doi:10.1109/JRFID.2022.3157653.

[9] S. Yang, Y. Luo, W. Miao, C. Ge, W. Sun and C. Luo, ``RF Signal-Based UAV Detection and Mode Classification: A Joint Feature Engineering Generator and Multi-Channel Deep Neural Network Approach,'' Entropy, vol. 23, no. 12, p. 1678, 2021, doi:10.3390/e23121678.

[10] M. U. Zahid, M. D. Nisar, A. Fazil, J. Ryu and M. H. Shah, ``Composite Ensemble Learning Framework for Passive Drone Radio Frequency Fingerprinting in Sixth-Generation Networks,'' Sensors, vol. 24, no. 17, p. 5618, 2024, doi:10.3390/s24175618.

[11] M. Ezuma, F. Erden, C. K. Anjinappa, O. Ozdemir and I. Guvenc, ``Detection and Classification of UAVs Using RF Fingerprints in the Presence of Wi-Fi and Bluetooth Interference,'' IEEE Open Journal of the Communications Society, vol. 1, pp. 60–76, 2020, doi:10.1109/OJCOMS.2019.2955889.

[12] F. Granelli et al., ``A Survey on Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) Communications: State-of-the-art, Existing Standards and Future Directions,'' IEEE Open Journal of the Communications Society, early access, 2026, doi:10.1109/OJCOMS.2026.3675046.

[13] M. A. Jasim, H. Shakhatreh, N. Siasi, A. H. Sawalmeh, A. Aldalbahi and A. Al-Fuqaha, ``A Survey on Spectrum Management for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs),'' IEEE Access, vol. 10, pp. 11443–11514, 2022, doi:10.1109/ACCESS.2021.3138048.

[14] Y. Mekdad, A. Aris, L. Babun, A. El Fergougui, M. Conti, R. Lazzeretti and A. S. Uluagac, ``A Survey on Security and Privacy Issues of UAVs,'' Computer Networks, vol. 224, p. 109626, 2023, doi:10.1016/j.comnet.2023.109626.

[15] B. Branco, J. S. S. Silva and M. Correia, ``Cyber Attacks on Commercial Drones: A Review,'' IEEE Access, vol. 13, pp. 9566–9577, 2025, doi:10.1109/ACCESS.2025.3527698.

[16] H. Wang, H. Zhao, J. Zhang, D. Ma, J. Li and J. Wei, ``Survey on Unmanned Aerial Vehicle Networks: A Cyber Physical System Perspective,'' IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 22, no. 2, pp. 1027–1070, 2020, doi:10.1109/COMST.2019.2962207.

[17] N. Bai, X. Hu and S. Wang, ``A survey on unmanned aerial systems cybersecurity,'' Journal of Systems Architecture, vol. 156, Art. no. 103282, 2024.

[18] Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), ``Drones.'' [Online]. Available: https://www.gov.br/anac/pt-br/assuntos/drones. Accessed: Mar. 26, 2026.

[19] Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), ``DRONE (UAS).'' [Online]. Available: https://www.decea.mil.br/drone/. Accessed: Mar. 26, 2026.

[20] Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), ``SARPAS NG.'' [Online]. Available: https://sarpas.decea.mil.br/. Accessed: Mar. 26, 2026.

[21] Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL), ``Anatel adota novo procedimento para certificação de drones,'' Feb. 1, 2024. [Online]. Available: https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-adota-novo-procedimento-para-certificacao-de-drones. Accessed: Mar. 26, 2026.

[23] Civil Aviation Authority of Malaysia (CAAM), ``Unmanned Aircraft System (UAS).'' [Online]. Available: https://www.caam.gov.my/public/unmanned-aircraft-system-uas/. Accessed: Mar. 26, 2026.

[24] Civil Aviation Authority of Malaysia (CAAM), ``Safety Information 11/2022: Unmanned Aircraft System (UAS) Operations Flown Without Approval from CAAM,'' Aug. 11, 2022. [Online]. Available: https://www.caam.gov.my/wp-content/uploads/2022/08/SI-11_2022-Unmanned-Aircraft-System-UAS-Operations-Flown-Without-Approval-From-CAAM.pdf. Accessed: Mar. 26, 2026.

[25] International Civil Aviation Organization (ICAO), ``ICAO Model UAS Regulations,'' 2020. [Online]. Available: https://www.icao.int/UA/icao-model-uas-regulations. Accessed: Mar. 26, 2026.

[26] S.-G. Kim, Y.-H. Noh, I.-P. Hong and J.-G. Yook, ``Stepwise RF Measurement Method for the Analysis of Drone's Communication Signals,'' The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, vol. 32, no. 4, pp. 370–376, Apr. 2021, doi:10.5515/KJKIEES.2021.32.4.370.

[27] S. Park, H. T. Kim, S. Lee, H. Joo and H. Kim, ``Survey on Anti-Drone Systems: Components, Designs, and Challenges,'' IEEE Access, vol. 9, pp. 42635–42659, 2021, doi:10.1109/ACCESS.2021.3065926.

[28] ITU-R, ``Calculation of free-space attenuation,'' Recommendation ITU-R P.525-5, Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union, Nov. 2024. [Online]. Available: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-5-202411-I!!PDF-E.pdf

[29] H. T. Friis, ``A Note on a Simple Transmission Formula,'' Proceedings of the IRE, vol. 34, no. 5, pp. 254–256, May 1946.

[30] T. E. Humphreys, B. M. Ledvina, M. L. Psiaki, B. W. O'Hanlon and P. M. Kintner, ``Assessing the Spoofing Threat: Development of a Portable GPS Civilian Spoofer,'' in Proc. ION GNSS, 2008, pp. 2314–2325.

[31] M. S. F. Dantas, É. S. Gualberto, G. D. A. Nze, F. L. L. Mendonça and D. A. da Silva, ``Desafios no Compartilhamento Internacional de Informações sobre Ataques Cibernéticos: Uma Análise Comparativa entre Brasil, Estados Unidos e Europa,'' Proc. CIAWI, 2024.

[32] P. Bieber and T. Dubot, ``Drone Intrusions in U-Space: Risk Analysis and Modeling of Cyber-Physical Attacks,'' in Proc. 2024 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security (TechDefense), 2024, pp. 334–339, doi:10.1109/TechDefense63521.2024.10863471.

Modelo de coproducción de conocimiento de apoyo a la gestión del conocimiento

Knowledge co-production model to support knowledge management

Víctor Hugo Medina García
Facultad de Ingeniería, Dep. Ingeniería de Sistemas
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia
vmedina@udistrital.edu.co

Tatiana González Urrego
Facultad de Ingeniería, Dep. Ingeniería Industrial
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia
tgonzalezu@udistrital.edu.co

Karen Adriana Ramirez Amortegui
Facultad de Ingeniería, Dep. Ingeniería Industrial
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Bogotá, Colombia
karamireza@udistrital.edu.co

Resumen — **El estudio se centró en la coproducción de conocimiento y la integración de diferentes grupos en el proceso de generación de conocimiento para resolver problemas complejos de manera efectiva. El objetivo fue descubrir cómo la interacción entre múltiples perspectivas ayuda a resolver problemas y alcanzar objetivos comunes. La investigación también trato cómo este enfoque apoya el aprendizaje en equipo a lo largo del tiempo. La investigación consideró la participación de actores, agentes facilitadores e indicadores como parte del modelo de coproducción de conocimiento. Estos facilitadores promovieron la generación, transferencia y adaptación de conocimiento dentro y fuera de la organización. El trabajo en equipo y la sinergia entre los participantes fueron fundamentales para optimizar el proceso de toma de decisiones y mejorar la capacidad de adaptación a diferentes contextos. Los resultados mostraron una mayor eficiencia en la resolución de problemas, una mayor satisfacción de las partes interesadas y una mejor innovación organizacional. Se concluyó que la coproducción de conocimiento es un enfoque apropiado para fortalecer el aprendizaje continuo y la adaptabilidad en entornos cambiantes.**

***Palabras Clave* – coproducción, conocimiento, colaboración, aprendizaje continuo.**

Abstract — **The study focused on the co-production of knowledge and the integration of different groups in the knowledge generation process to effectively solve complex problems. The goal was to discover how interaction between multiple perspectives helps to solve problems and achieve common goals. The research also investigated how this approach supports team learning over time. The methodology used included the participation of actors, facilitators and indicators. These facilitators promoted the generation, transfer and adaptation of knowledge within and outside the organization. Teamwork and synergy among participants were fundamental to optimize the decision-making process and improve the capacity to adapt to different contexts. The results showed greater efficiency in problem solving, higher stakeholder satisfaction and improved organizational innovation. It was concluded that knowledge co-production is an appropriate approach to strengthen continuous learning and adaptability in changing environments.**

Keywords – co-production, knowledge, collaboration, continuous learning.

I. Introducción

El concepto de coproducción de conocimiento se ha convertido en una herramienta esencial para abordar los complejos desafíos de la gestión del conocimiento. Este enfoque reconoce la necesidad de integrar diversas perspectivas y experiencias de una variedad de partes interesadas, incluidas comunidades académicas, profesionales y de usuarios finales, para producir conocimientos más aplicables y eficaces. A pesar de los avances en la investigación sobre gestión del conocimiento, a menudo se ha centrado exclusivamente en las contribuciones institucionales y académicas y ha descuidado los conocimientos de la práctica y la colaboración intersectorial. Esta limitación ha reducido la relevancia de los conocimientos en entornos complejos, reduciendo así la necesidad de enfoques más integrados.

Investigaciones anteriores han destacado el valor de involucrar a diversas partes interesadas en la producción de conocimiento, pero no siempre se ha descrito claramente cómo se pueden estructurar y aplicar las colaboraciones de manera efectiva en contextos prácticos. La literatura existente señala una falta de mecanismos claros para la integración del conocimiento en la ciencia, lo que representa una brecha en la gestión del conocimiento que requiere más investigación.

El objetivo de este trabajo fue analizar y proponer un modelo estructurado de coproducción de conocimiento que permi-

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

tiese la colaboración efectiva entre múltiples actores y evaluar su aplicabilidad en la gestión del conocimiento para resolver problemas del mundo real de manera más completa y eficiente.

II. Bases Teóricas

La coproducción de conocimientos se refiere al proceso de generación conjunta de conocimientos entre investigadores y diversas partes interesadas, como responsables políticos, profesionales y miembros de la comunidad [1]. Este enfoque pretende optimizar la relevancia, la utilidad y el impacto de los resultados de la investigación mediante la participación de aquellos que, en última instancia, utilizarán el conocimiento. En el contexto de la investigación sanitaria, la coproducción se ha reconocido como un componente crucial de la investigación de aplicación, ya que transforma el proceso de investigación desde el principio, ampliando el alcance y aumentando la probabilidad de asimilación. El marco de la cocreación se basa en que las partes identificadas cocrean la evidencia y el resultado, y por lo tanto el conocimiento obtenido [1].

Sin embargo, sigue habiendo una falta de consenso sobre el significado y el uso precisos del término «cocreación de nuevo conocimiento» [2]. Aunque la coproducción de conocimientos ofrece importantes oportunidades, como la mejora de la relevancia y el impacto de la investigación, también presenta diversos retos. Los beneficios de adoptar principios de codiseño en la atención sanitaria fueron esbozados por varios autores [3], y se propusieron modelos para identificar a las partes interesadas clave que deben participar en la coproducción de la atención sanitaria a nivel nacional.

Este estudio empleó un enfoque de investigación cualitativa para explorar el concepto de coproducción del conocimiento y sus implicaciones para la gestión del conocimiento. Para abordar el objetivo de la investigación, el estudio utilizó un diseño de investigación cualitativa, que permitió una comprensión más profunda de las diversas perspectivas y experiencias relacionadas con la coproducción de conocimientos. En lugar de basarse únicamente en el proceso de investigación académica tradicional, este estudio adoptó un enfoque cualitativo que implicaba la participación activa de diversas partes interesadas, incluidos investigadores, profesionales y miembros de la comunidad, en el proceso de investigación [4].

La coproducción de conocimiento cuenta con herramientas fundamentales para la captación de conocimientos. Vanessa Levesque, señala que la transferencia de información generalmente se suele dar por medio del enfoque de muelle de carga, en donde la investigación es realizada por un grupo selecto de personas y los resultados que se consigan serán compartidos a las demás partes sin aportes adicionales de externos; esta situación da lugar a inconvenientes con los resultados al no tener en cuenta a los demás participantes, y que por lo tanto son poco fiables.

Es entonces que la coproducción cumple un rol esencial, tomando en cuenta las ideas de cada participante, permitiendo llegar a soluciones más eficientes y concertadas [5].

La investigación está siendo revolucionada por medio de la coproducción, explorando nuevas perspectivas y generando nuevas formas de conocimiento. Como se señala, "el conocimiento científico se produce en un proceso integral que involucra tanto el método científico como el contexto social" [6].

La gestión del conocimiento, se refiere al proceso de gestionar continuamente el conocimiento para identificar, explotar, analizar, revisar y controlar los recursos de conocimiento, apoyados en tecnologías de la información y la comunicación que permitan el desarrollo del capital intelectual para el logro de objetivos [7].

III. Métodos

Para el desarrollo del modelo de gestión del conocimiento para la coproducción del conocimiento, se utilizó un enfoque metodológico basado en la aplicación del método científico y la modelación sistémica. Este enfoque permitió estructurar la generación, captura y distribución del conocimiento de manera dinámica y flexible, facilitando su implementación en entornos colaborativos.

El proceso metodológico se estructuró en las siguientes fases:

A. Recopilación y Análisis de Información

Se realizó una revisión documental sobre modelos de gestión del conocimiento y coproducción del conocimiento. Se recopilaron artículos científicos, informes técnicos y referencias bibliográficas relevantes para establecer los fundamentos teóricos y prácticos del modelo.

B. Modelación del Sistema

A partir del análisis de la información, se diseñó una estructura basada en un sistema circular, en el que los nodos representan los puntos de generación y almacenamiento de conocimiento, mientras que los arcos representan las interrelaciones que facilitan su transferencia. Se identificaron facilitadores estratégicos que permiten el flujo eficiente de conocimiento y su transformación de individual a colectivo.

C. Definición de Indicadores de Evaluación

Se establecieron métricas para medir el comportamiento del modelo y su efectividad en la coproducción del conocimiento. Estos indicadores incluyeron variables como la generación de soluciones, el aprendizaje colectivo y la eficiencia en la transferencia del conocimiento.

D. Validación del Modelo

La implementación del modelo se validó a través de simulaciones y análisis de escenarios, permitiendo evaluar su desempeño en diferentes condiciones. Para ello, se utilizaron herramientas de análisis cualitativo y cuantitativo que facilitaron la identificación de mejoras y ajustes en la estructura propuesta.

El enfoque adoptado permitió garantizar que el modelo propuesto fuera adaptable a diferentes entornos organizacionales, optimizando la generación y aplicación del conocimiento de manera colaborativa.

IV. Modelo de Gestión del Conocimiento para la Coproducción del Conocimiento

El modelo de gestión del conocimiento desarrollado permitió evaluar la eficacia de la coproducción del conocimiento en entornos dinámicos y colaborativos. A través de su estructura flexible y descentralizada, se ha facilitó la integración del conocimiento individual en un marco colectivo, optimizando la generación de soluciones innovadoras. La interacción entre

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

nodos, facilitadores e indicadores, demostró ser un mecanismo clave para agilizar la transferencia de conocimiento y mejorar la toma de decisiones. A continuación, se presentan los principales resultados obtenidos a partir de la implementación del modelo.

A. El Modelo

El modelo de gestión del conocimiento (GC) propuesto (Fig. 1) se basó en una estructura dinámica y flexible que permite la creación, captura, y distribución del conocimiento. Este enfoque se estructura según la analogía de un sistema circular donde los nodos representan los puntos de generación y almacenamiento de conocimiento, y las interrelaciones entre ellos son los arcos que permiten la transferencia de este conocimiento de manera ágil y eficiente.

El modelo propuesto está alineado con la generación de conocimiento personal y colectiva, teniendo en cuenta que la coproducción se basa en la generación de soluciones y aprendizaje a través de los conocimientos individuales que forman sinergia unos con otros para llegar a un conocimiento colectivo. La organización en la estructura facilita el acceso descentralizado a la información, en donde los facilitadores cumplen un rol estratégico para impulsar el flujo del conocimiento. Por su parte, los indicadores miden los comportamientos grupales y el desempeño del modelo para medir su efectividad en la resolución de problemas, promoviendo la innovación.

El modelo se describe en más detalle a través de sus componentes y su estructura organizacional:

B. Componentes del Modelo

El modelo de gestión del conocimiento en red se compone de dos partes principales: una componente estática y una componente dinámica.

1) *Componente Estática: E*l término componente estático hace referencia a los componentes estructurales del modelo, que comprenden:

- Núcleos/Nodos: Son los elementos o recursos de la organización en los que se produce, guarda y transmite el conocimiento. Estos nodos pueden ubicarse en diversas áreas o procesos de la organización y desempeñan roles fundamentales en el procesamiento y gestión del conocimiento, los cuales corresponden principalmente a: *Interpretación, Aprendizaje, información interna y el conocimiento*.
- Facilitadores: Facilitan la transferencia y gestión eficaz del conocimiento entre distintos puntos de la red, generando una infraestructura de conectividad, es decir que son los mecanismos que permiten realizar acciones sobre los recursos de conocimiento.

2) *Componente Dinámica:* La componente dinámica se vincula con los elementos de navegación y manejo del conocimiento a través del tiempo. Esta sección del modelo pone el foco en:

Esquemas flexibles: El modelo progresa a medida que los operadores implementan cambios fundamentados en nuevos conocimientos, tácticas y habilidades que impacten a la organización o al individuo de manera personal, reforzando de esta manera la gestión del conocimiento.

El modelo planteado cuenta con dos enfoques que tienen en cuenta el tipo de entorno que se gestione. En los nodos grises o recursos de conocimiento, encontramos: la interpretación, el aprendizaje, la información interna y el conocimiento generado de forma personal e interna; estos componentes son fundamentales en la generación de coproducción de conocimiento individual, pues este conformará y proveerá un conocimiento colectivo por medio de la sinergia operacional en la corporación, y por tanto, cumple un rol indispensable. Los nodos mencionados, están interconectados, formando agrupaciones de

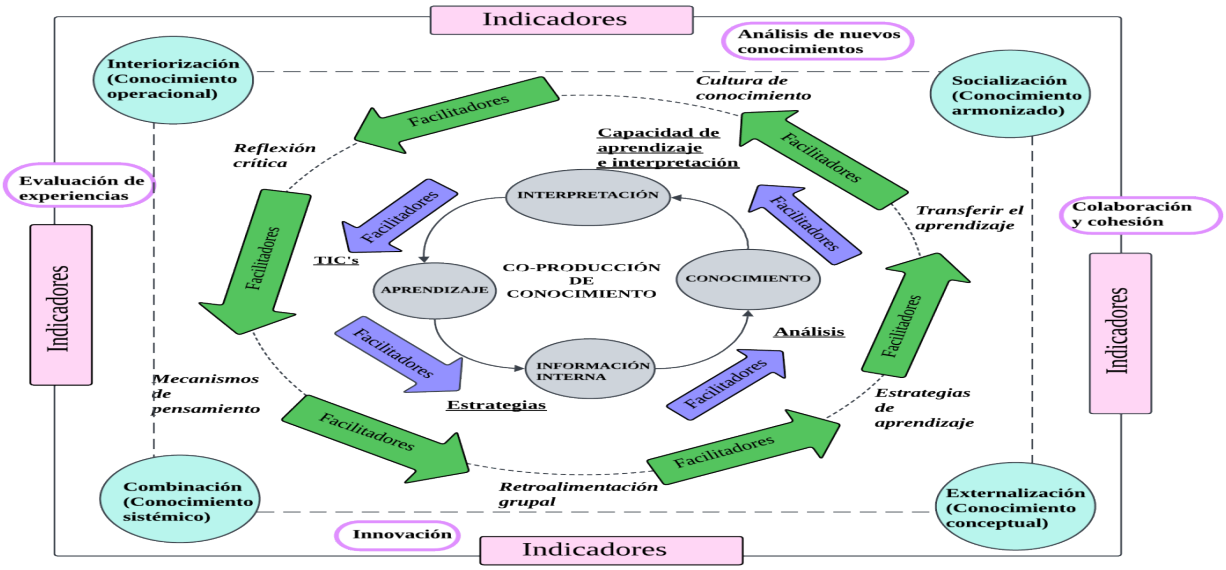


Figura 1. Modelo de gestión del conocimiento para la coproducción de conocimiento. Fuente: Creación propia.

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

conocimiento que permiten el flujo de información entre ellos, ya sea a través de enlaces físicos o virtuales; estos se encuentran en una serie circular, en donde cada una de ellas se integra en conjunto con las demás para lograr un objetivo especificado que es contribuir al individuo habilidades y entendimientos de un tema, para posteriormente ser analizado y conformar un concepto o representación que permita resolver un problema o crear una perspectiva individual. Lo anterior se logra por medio de los facilitadores, representados en flechas moradas, y que traen consigo la capacidad de aprendizaje e interpretación, las TIC'S, estrategias y análisis, herramientas que son elementales para conseguir competencias.

Los facilitadores en color verde cumplen la función de ser los elementos clave que impulsan las acciones de la gestión del conocimiento en la organización, y por lo tanto son mecanismos que facilitan la transmisión de información individual a la organización: Cultura de conocimiento, reflexión crítica, mecanismos de pensamiento, retroalimentación grupal, estrategias de aprendizaje, transmisión de conocimiento. A posteriori, los conocimientos individuales albergados en conjunto y en sinergia con el conocimiento colectivo a través de acciones internas y externas se concretan y condensan en 4 nodos en color celeste, que representan los diferentes tipos de conocimiento en una organización: interiorización (conocimiento operacional), combinación (conocimiento sistémico), externalización (conocimiento conceptual), y socialización (conocimiento armonizado).

Todo el sistema termina en los indicadores de comportamiento en color rosa, que cumplen el objetivo de medir y evaluar el desempeño del modelo, y que pueden ser de tipo cualitativo o cuantitativo dependiendo la necesidad y la condición a evaluar: análisis de nuevos conocimientos, evaluación de experiencias, innovación, colaboración y cohesión.

C. Estructura del Modelo Organizacional

La estructura general en red del modelo organizacional de gestión del conocimiento se concibe de acuerdo con los siguientes componentes principales:

1) *Nodos o recursos de conocimiento:* Comprende los reursos de conocimiento de la organización, tales como: Interpretación, Aprendizaje, información interna y el conocimiento.

2) *Agentes Facilitadores (Acciones):* Los agentes facilitadores son las acciones y estrategias clave que permiten la coproducción de conocimiento y su aplicación eficaz dentro de la organización. Estos agentes impulsan el flujo y aprovechamiento del conocimiento a través de una interacción dinámica entre actores internos y externos. Se clasifican en:

– Facilitadores Internos:

- Equipos de diversas disciplinas: Grupos de individuos con distintas áreas de experiencia que cooperan para solucionar problemas complejos, creando nuevos conocimientos a partir de sus variadas visiones.
- Sistemas tecnológicos de colaboración: Tecnologías que promueven la interrelación y el compartir conocimientos entre participantes dispersos geográficamente, como sistemas de gestión del conocimiento o plataformas digitales de cocreación.
- Comunidades internas de práctica: Grupos laborales compuestos por personas que tienen intereses o costumbres compartidas dentro de la organización.

– Facilitadores Externos:

- Redes de cooperación con participantes foráneos: La implicación de clientes, proveedores, instituciones educativas y comunidades en el proceso de cocreación facilita que la organización obtenga conocimientos y puntos de vista que no se encuentran accesibles internamente.
- Ambiente normativo y cultural: La legislación en vigor y la cultura de conocimiento abierto en una zona o sector pueden promover el intercambio de información y la asimilación de nuevos conocimientos.
- Eventos y reuniones de colaboración: Involucrarse en ámbitos de intercambio con otras entidades e industrias para intercambiar y construir conocimientos que favorezcan a todos los participantes implicados.

3) *Indicadores (Comportamiento):* Los indicadores permiten medir el comportamiento y desempeño del modelo de coproducción de conocimiento en términos de su impacto y efectividad. Estos indicadores ayudan a evaluar si el conocimiento generado y compartido está siendo aplicado de manera efectiva para cumplir con los objetivos organizacionales.

- Colaboración y cohesión: Evaluar la calidad de las interacciones entre los actores que participan en la coproducción de conocimiento, permitiendo medir la cooperación y la sinergia entre los equipos y participantes.
- Satisfacción de los actores: Recoger retroalimentación cualitativa de los actores involucrados en el proceso de coproducción para medir su percepción sobre la utilidad y aplicabilidad del conocimiento creado.
- Innovación y creatividad: Evaluar el grado en que las soluciones y conocimientos coproducidos han dado lugar a innovaciones dentro de la organización.

V. Comprobación/Discusión del Modelo de Gestión del Conocimiento para la Coproducción del Conocimiento

A. Evaluación Inicial del Modelo de Gestión del Conocimiento

El proceso de validación del modelo se realizó a través de un análisis teórico fundamentado en la revisión de literatura especializada y marcos conceptuales significativos acerca de la coproducción del conocimiento. Esta valoración se llevó a cabo sin hacer uso de investigaciones empíricas en compañías, sino que se basó en los principios y perspectivas teóricas presentes en la gestión del conocimiento, la cooperación entre instituciones y los modelos de transmisión de conocimiento.

Los hallazgos preliminares del análisis teórico mostraron que el trabajo en equipo entre los participantes es un elemento crucial en la obtención y creación de conocimiento. La principal táctica detectada para la transmisión del conocimiento, fundamentada en la teoría analizada, fue la interacción directa entre los participantes, subrayando la relevancia del aprendizaje experiencial y la retroalimentación constante como instrumentos

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

fundamentales (Fig. 2):

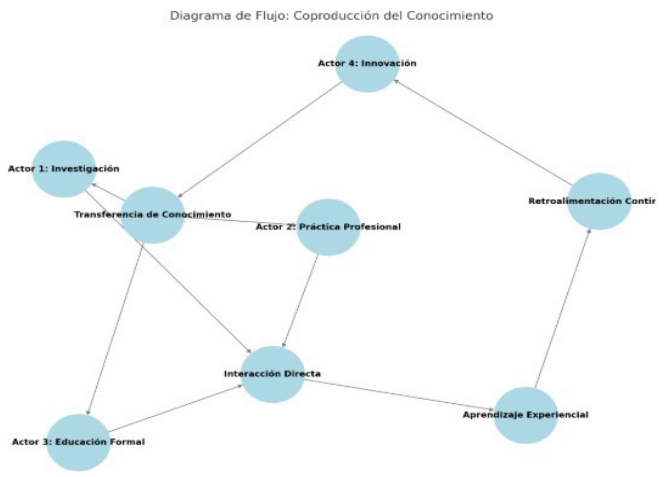


Figura 2. Mecanismos teóricos y transferencia de conocimiento. Fuente: Creación propia.

Además, la investigación teórica señaló que la puesta en marcha del modelo promueve la sistematización del conocimiento compartido (Fig. 3), simplificando su estructuración y uso futuro en procesos de innovación y optimización de la práctica profesional, tal como se puede apreciar en los modelos actuales de gestión del conocimiento.

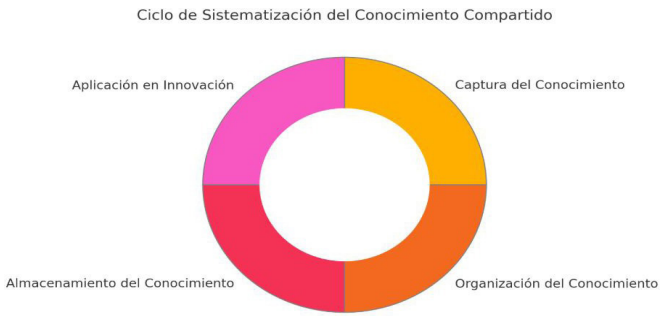


Figura 3. Sistematización teórica del conocimiento compartido.

B. *Análisis Factorial de la situación inicial*

Para entender la percepción y el efecto teórico del modelo en los participantes implicados, se realizó un análisis factorial fundamentado en los componentes esenciales obtenidos de la literatura. Este estudio posibilitó reconocer cinco elementos fundamentales que inciden en la gestión del conocimiento en el contexto teórico de la coproducción:

- Cooperación entre instituciones colaborativas.
- Acceso y disponibilidad de recursos digitales.
- Formación y educación permanente.
- Cultura corporativa enfocada en la innovación.
- Implementabilidad del conocimiento producido.

Estos elementos se agruparon en dimensiones concretas para valorar su influencia en la implementación teórica del modelo y su sostenibilidad a largo plazo, fundamentados en investigaciones anteriores y esquemas conceptuales formulados en la literatura (Fig. 4).

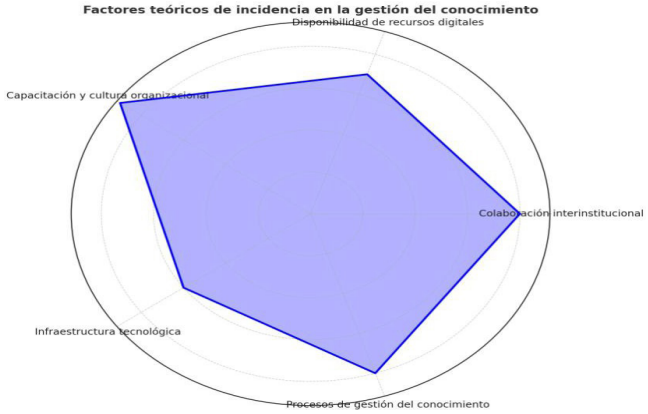


Figura 4. Factores teóricos de incidencia en la gestión del conocimiento

Los hallazgos del estudio señalan que la formación y la cultura de la organización son el elemento más crucial para la puesta en marcha del modelo, dado que una mentalidad organizacional centrada en la educación continua y la innovación promueve la creación y uso del conocimiento. Igualmente, la cooperación entre instituciones y los procesos de gestión del conocimiento juegan un papel vital al facilitar la integración y el intercambio eficaz de información.

En cambio, el acceso y disponibilidad de recursos digitales aporta de manera significativa al proceso, aunque su influencia se potencia cuando se fusiona con estrategias de cooperación entre instituciones. Finalmente, aunque la infraestructura tecnológica es un elemento relevante, su impacto es restringido si no está en sintonía con la cultura de la organización y la capacitación del personal.

Por ende, el estudio demuestra que la conexión entre la cooperación entre instituciones y la disponibilidad de recursos digitales es esencial para la gestión del conocimiento, pues promueve la unificación de datos, el aprendizaje dentro de la organización y la viabilidad del modelo a largo plazo.

C. *Evaluación del Impacto del Modelo*

Para medir el efecto teórico del modelo en la creación y difusión del conocimiento, se definieron métricas de rendimiento que se corresponden con los propósitos del proceso de coproducción, fundamentadas en la bibliografía especializada (Tabla 1).

TABLA I. PROPÓSITOS DEL PROCESO DE COPRODUCCIÓN.

Dimensión	Objetivos
Creación del conocimiento	Fomentar la generación de nuevo conocimiento basado en experiencias compartidas.
Transferencia del conocimiento	Garantizar la difusión efectiva del conocimiento generado.
Aplicabilidad	Asegurar la implementación de los conocimientos adquiridos en prácticas concretas.
Cultura organizacional	Promover un entorno que valore la colaboración y el aprendizaje continuo.

El estudio teórico comparativo entre situaciones con y sin la implementación del modelo mostró avances notables en la generación y uso del conocimiento en los marcos conceptuales

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

analizados. Específicamente, la variable de aplicabilidad del conocimiento evidenció un incremento significativo, lo que corrobora la eficacia del modelo en la creación de valor añadido de acuerdo con la literatura examinada (Fig. 5).

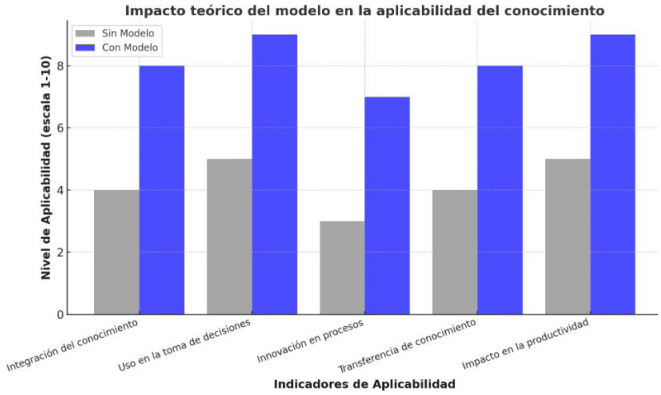


Figura 5. Impacto teórico del modelo en la aplicabilidad del conocimiento.

Los hallazgos logrados en la validación teórica del modelo corroboran su eficacia en la optimización de la gestión del conocimiento para la difusión del mismo. Resalta la relevancia de la cooperación entre instituciones, la disponibilidad de recursos digitales y una cultura corporativa positiva como elementos cruciales en su triunfo, de acuerdo con los marcos teóricos vigentes.

El estudio comparativo (Fig. 5) muestra un avance notable en la utilidad del conocimiento con la puesta en marcha del modelo. Específicamente, se nota un incremento significativo en la incorporación del conocimiento en acciones tangibles, pasando de un nivel moderado (4 puntos) a uno elevado (8 puntos). Igualmente, la aplicación del conocimiento en la toma de decisiones mejora significativamente, mostrando un aumento de 5 a 9 puntos.

Estos hallazgos indican que la organización de los procesos potencia la eficacia en la aplicación del conocimiento en las organizaciones.

Además, el modelo fomenta la innovación en procesos, incrementando su influencia de 3 a 7 puntos, lo que señala que la gestión estructurada del conocimiento promueve la adaptación y generación de nuevas metodologías. Además, se potencia la transmisión de conocimiento, fomentando un intercambio más efectivo de información en las organizaciones (de 4 a 8 puntos). Finalmente, se nota un efecto beneficioso en la productividad, con un incremento de 5 a 9 puntos, lo que subraya el valor añadido que produce la adecuada implementación del conocimiento en el ejercicio.

No obstante, se detectaron aspectos a mejorar, especialmente en la incorporación de estrategias que aseguren una mayor sistematización del conocimiento producido y su uso en diferentes contextos, pese a los progresos notados,

la formación de procesos que faciliten una transmisión del conocimiento más organizada aún está en desarrollo en futuras investigaciones.

VI. Conclusiones

El modelo de gestión del conocimiento para la coproducción del conocimiento desarrollado en esta investigación ha facilitado la evaluación de su influencia en la incorporación, transmisión y uso del conocimiento en contextos organizacionales de colaboración. El modelo, con su estructura dinámica y descentralizada, promueve la interacción entre diferentes actores, fomentando la creación de conocimiento compartido a partir de la mezcla de vivencias personales.

Los hallazgos mostraron que la aplicación del modelo aporta de manera significativa a la utilidad del conocimiento en la práctica. Se nota una mejora en la incorporación del conocimiento en los procesos de la organización, manifestándose en un incremento en la eficacia en la toma de decisiones, un incremento en la productividad y un robustecimiento de la creatividad.

La validación teórica también subraya la relevancia de elementos fundamentales como la cooperación entre instituciones, la disponibilidad de recursos digitales y una cultura organizacional que promueva la gestión del conocimiento, factores que impulsan la creación y uso eficaz de nuevos conocimientos en las organizaciones.

Sin embargo, la investigación destaca la importancia de perfeccionar la sistematización del conocimiento producido, con el objetivo de garantizar su uso en diversos contextos y asegurar su utilidad a largo plazo. En este contexto, los próximos estudios deberán centrarse en la creación de estrategias que faciliten la consolidación de los procesos de transmisión del conocimiento y potencien su influencia en diferentes áreas.

Para concluir, el modelo sugerido representa una aportación significativa al área de la gestión del conocimiento, ofreciendo un esquema conceptual y metodológico que puede ser utilizado y ajustado en diversos entornos organizativos con el objetivo de potenciar la innovación, la productividad y la toma de decisiones estratégicas.

Referencias

[1] S. Jasanoff, ed., States of Knowledge: The Co-Production of Science and Social Order. Routledge, 2004.

[2] Pearce, L. A., Min, J. E., Piske, M., Zhou, H., Homayra, F., Slaunwhite, A., Irvine, M., McGowan, G., & Nosyk, B. Opioid agonist treatment and risk of mortality during opioid overdose public health emergency: population based retrospective cohort study. BMJ (Clinical research ed.), 368, m772. 2020. https://doi.org/10.1136/bmj.m772

[3] T. C. Fang, "Asignación de recursos de red utilizando un sistema experto con razonamiento de lógica difusa", tesis doctoral, Universidad de California en Berkeley, California, EE.UU. 1987.

[4] Philpapers.org. Retrieved September 26, 2024, from https://philpapers.org/rec/JASSOK

[5] J. A. Ward, J. A. Morgan, J. R. White, and T. V. Royer, Streambed Restoration to Remove Fine Sediment Alters Reach-Scale Transient Storage in a Low-Gradient Fifth-Order River, Indiana, USA. 2018, Hydrological Processes. DOI: 10.1002/hyp.11518.

[6] L. Duan, J. T. Loh, y W. F. Chen. "Análisis basado en M-P-F de miembros tubulares abollados". Revista de Ingeniería Estructural, Vol. 21, No. 8, pp 34-44. 1990.

[7] V. H. Medina García, L. L. Rodríguez Bernal, and L. M. Medina Estrada, "Model Engineering Research Supported by Knowledge Management", in Journal of Engineering and Applied Sciences, Vol. 13: 7045-7050, Ed. Medwell Journals, 2018.

Chegou a hora do Marketing AI

Aplica*ção da* Inteligência Artificial no Marketing

The time of Marketing AI is arrived

Application of Artificial Intelligence in Marketing

Fábio João Simões Mendes
Polytechnic Institute of Coimbra, Coimbra Business School,
Quinta Agrícola - Bencanta, 3045-231 Coimbra, Portugal.

Marco Filipe Martins Rodrigues
Polytechnic Institute of Coimbra, Coimbra Business School,
Quinta Agrícola - Bencanta, 3045-231 Coimbra, Portugal.

Anabela Maria Bello de Figueiredo Marcos
Polytechnic Institute of Coimbra, Coimbra Business School,
Quinta Agrícola - Bencanta, 3045-231 Coimbra, Portugal

***Resumo* — A crescente quantidade de dados gerada por consumidores e empresas fez com que a Inteligência Artificial se tenha vindo a tornar uma grande aliada do marketing, ao longo dos últimos anos, dando-lhe uma capacidade mais elevada de análise, personalização e automação. Este artigo pretende, assim, trazer alguma luz no que toca à perceção do próprio conceito de Inteligência Artificial e explorar a forma como esta pode auxiliar os *marketeers*, colocando especial foco no processo de automação. Existindo uma linha muito ténue entre a recolha de dados e a privacidade dos utilizadores torna-se da maior importância discorrer acerca dos desafios éticos e das possibilidades para o futuro. O objetivo deste artigo é então a apresentação de uma visão geral das possibilidades do uso da Inteligência Artificial no Marketing.**

***Palabras Clave* – Ineligência Artificial; Marketing; Marketing AI; Automatizacão.**

***Abstract* — The growing amount of data generated by consumers and businesses has meant that Artificial Intelligence has become a great ally of marketing, over the last few years, giving it a higher capacity for analysis, personalization, and automation. This article aims then to bring light on the perception of the concept of Artificial Intelligence and explore how it can help marketers, with special focus on the automation process. With a fine line between data collection and user privacy it becomes of the utmost importance to also discuss the ethical challenges and possibilities for the future. The aim of this article is therefore the presentation of an overview of the emerging possibilities and limitations of the use of Artificial Intelligence in Marketing.**

Keywords – Artificial Intelligence; Marketing; AI Marketing; Automation.

I. Introduçao

Ao longo dos últimos anos, o uso da Inteligência Artificial (IA) tem-se expandido às mais diversas áreas, desde a saúde à educação, passando pela indústria do entretenimento, sendo que, mais recentemente, tem visto a sua aplicabilidade aumentada na área dos negócios, com o seu uso na gestão e marketing.

Imagine poder saber o quanto e como é que uma pessoa gostaria de um determinado produto, ou qual a predisposição de um potencial consumidor para adquirir um bem ou serviço, ou até mesmo qual o valor que este estaria disposto a pagar pelo mesmo. A IA poderá ser parte da resolução para a tomada de decisões nestes dilemas?

A quantidade cada vez maior de dados, acerca do comportamento dos consumidores, passíveis de interpretação e de uso, através de IA, faz com que esta possa ser uma ferramenta aliada dos *marketeers*, na medida em que catapulta o processo de pesquisa, recolha e interpretação de dados a outro nível. Neste sentido, o marketing poderá tirar partido de análises mais completas, numa primeira fase, acerca das necessidades do consumidor, das suas perceções acerca dos produtos, ou até mesmo do comportamento do mercado em si, e, numa segunda fase, usar a IA para a recolha e interpretação dos resultados das campanhas e dos efeitos das estratégias adotadas nas mesmas. A aproximação entre estes dois domínios poderá então alcançar um efeito de sinergia, sendo o marketing um beneficiário natural do desenvolvimento deste tipo de tecnologia [1].

Por outro lado, a automatização de atividades, antes desenvolvidas por humanos, levanta a questão: se esta, apesar do seu potencial como ferramenta auxiliar, poderá ser também uma ameaça às carreiras dos profissionais de marketing, pelo que a aplicação da IA ao marketing gera então questões práticas, na medida em que se deve perceber realmente o que esta ferramenta representa com o seu uso sustentável, quais os seus alcances e as possíveis aplicações ao meio marketing [2].

II. Metodologia

O presente artigo aborda o tema através da revisão da literatura. Para o efeito, recorreu-se à pesquisa nas seguintes bases de dados de artigos científicos: Google Scholar, B-on, Springer e Research Gate. Recorreu-se ainda a outras fontes como dissertações de mestrado e livros editados. Para o efeito consideraram-se apenas publicações recentes para uma maior acuidade da informação recolhida.

II. Revisão de Literatura

A entrada impressionante da IA no mundo dos negócios está a transformar a forma como a industrialização se desenvolve

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

e, por consequência, a economia ao seu redor, tornando-a uma das tecnologias mais populares e o centro das atenções. No entanto, será também, de entre as tecnologias, uma das que ainda não atingiu o seu potencial máximo, exigindo, por isso, uma continuidade na pesquisa e investigação para uma compreensão mais aprofundada desta ferramenta, melhorando as diferentes aplicações viáveis e explorando novas possibilidades de utilização [3].

A. *Definição de Inteligência Artificial*

A perceção atual do público em geral acerca da IA é fortemente influenciada pelas imagens criadas pela indústria cinematográfica, onde são apresentados sistemas inteligentes que superam em larga escala a inteligência humana. No sentido de trazer alguma luz e uma adequada compreensão acerca da IA, importa então começar por definir o seu conceito [4].

Se, por um lado, a IA pode ser definida, de forma extremamente lata, ao ponto de praticamente toda a *data science* poder ser aglomerada no seu conceito, por outro, também pode ser definida, de forma demasiado restritiva, em que todas as inovações no seu âmbito teriam o seu conceito próprio e nada seria considerado IA. Para os efeitos do presente estudo, adotamos a definição de que a IA são "máquinas que mimetizam a inteligência humana em tarefas como a aprendizagem, planeamento e resolução de problemas através da criação de conhecimento de nível superior de forma autónoma" [5].

B. *Tipos de Inteligência Artificial*

Neste sentido admite-se que existem então três tipos de IA:

- *Strong AI* — também designada por *Artificial general Intelligence* (AGI), esta é a mais capacitada das IA's na medida em que o seu alcance e capacidade intelectual é equiparável à do ser humano. É um sistema tão poderoso e flexível como a inteligência humana, não estando adaptada apenas a um problema ou tarefa específica, conseguindo inclusive adaptar-se a novos contextos, para além daqueles para que os quais foi treinada. Atualmente, a *Strong AI* ainda não foi alcançada, existindo apenas nos filmes [6];
- *Weak AI* — também conhecida por *Narrow AI*, é de entre os tipos relatados aquela que é mais utilizada no presente, sendo que a maioria da IA operacional existente pertence a esta categoria. *Weak AI* é adaptada a um único problema ou tarefa específica, sendo que para desempenhar uma nova tarefa tem de ser novamente treinada ou modificada. Alguns dos exemplos de uso comum mais conhecidos são o que chamamos assistentes virtuais, como a Siri, Alexa ou Google Assistant. No entanto, existem muitas soluções de *Weak AI* disseminadas pelas mais diversas indústrias, desde a saúde até à defesa, passando evidentemente pelo marketing [4, 7];
- *Hybrid AI* — é uma abordagem que combina várias técnicas de IA, incluindo a *Weak AI*, para desenvolver problemas mais amplos e complexos. Esta abordagem consiste no uso de diferentes módulos, de *Weak AI* por exemplo, integrados no mesmo sistema, aumentando assim a capacidade de adaptação do sistema, capacitando-o para respostas mais versáteis e para multitarefas [4, 6]. Por exemplo, um sistema de *Hybrid AI* direcionado para *e-commerce* pode usar uma combinação entre *machine learning* e processamento de linguagem para analisar o histórico de compras e *feedbacks* dados pelos clientes, extrair informações relevantes e identificar padrões, elaborando posteriormente previsões precisas sobre a predisposição que determinado cliente pode ter para comprar um bem ou serviço.

C. *Uso de Inteligência Artificial no marketing*

O uso da IA no marketing, ou Marketing AI como consta no título deste estudo, é então o uso e desenvolvimento de agentes de inteligência artificial que, a partir das informações que possuem acerca de consumidores, concorrentes e posicionamento da empresa no mercado, sugerem e/ou realizam ações de marketing para proporcionarem a melhor experiência ao consumidor e alcançar os melhores resultados [8, 9, 10]. Neste sentido, desde serviços relacionados com *costumer experience*, operacionalização e automação de marketing, passando por processos de tomada da decisão em negócios, a IA já afeta todos os temas funcionais do marketing [11, 12].

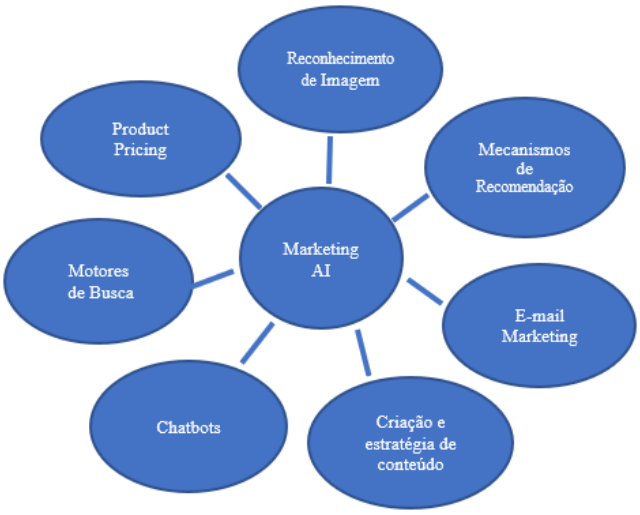


Figura 1. Alguns exemplos de formas como a IA pode ser implementada no marketing [9]

Uma breve análise a alguns estudos realizados revela como esta é encarada como uma área promissora e como tem tido um crescimento exponencial nos últimos anos. Senão, vejamos:

- De acordo com a *International Data Corporation* (IDC), estima-se que o mercado da IA, incluindo *software*, *hardware* e serviços, apresentará uma taxa de crescimento anual composta de 25% no período de 2022-2026, atingindo os US$ 191 biliões de dólares em 2026 [13].
- Segundo o relatório da *Mckinsey Analytics* para o estado da IA, no ano de 2021, 56% das empresas representadas usam IA em pelo menos uma função empresarial. Sublinhe-se ainda que as funções empresariais que têm maior adoção da IA são as de desenvolvimento de produtos e serviços e mais precisamente de marketing e vendas [14].

2026 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026
17th – 20th June 2026, University of Satiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain
ISBN: 978-989-36481-2-4

O uso de IA está a incorporar três grandes tendências no marketing, respetivamente: a personalização, previsão e automação [8].

- No que diz respeito à personalização, esta baseia-se na utilização de informação, *expertise* desenvolvida ou resultados de campanhas anteriores, que são então ajustados consoante diferentes segmentos de clientes.
- A previsão desenvolve-se através do uso de modelos para futuros cenários, recorrendo à pesquisa de padrões em dados recolhidos previamente. Estes modelos associados a *machine learnig* continuam a recolha de dados e aprendizagem, sugerindo novas soluções.
- Por fim, a automação, área sobre a qual incidiremos na próxima secção deste estudo, refere-se ao processo de tomada de decisão através do uso de IA, ou o apoio desta tomada de decisão através do fornecimento de *insights* e recomendações [8].

D. *Introdução ao conceito de automação de marketing*

O conceito de automação de marketing tem demonstrado ao longo dos anos a sua potencialidade e notoriedade no mundo digital, sendo esta uma estratégia cada vez mais popular no mundo dos negócios, onde as empresas implementam a inteligência artificial interligada com o marketing para tentarem otimizar os seus processos de venda, aumentando a eficiência e a precisão das suas publicidades com o objetivo de se conectarem de forma rápida e prática com os seus clientes e prever os seus comportamentos [3, 15]. Este tipo de marketing é a tendência alvo do marketing atual, com grande impacto nos clientes, diferenciando-se como uma nova forma de abordagem ao *design thinking* das campanhas publicitárias. Proporcionando uma experiência diversificada, esta tecnologia ajuda as empresas a identificar e a segmentar de forma mais coerente o seu público-alvo, através de uma publicação no momento certo e na plataforma mais adequada [3, 16].

A automação do marketing poderá ser uma das formas mais eficazes de aumentar a mensagem para a comunidade e ao mesmo tempo reduzir custos nas áreas de marketing e vendas, que utilizam maioritariamente meios mais dispendiosos. As empresas podem assim automatizar diversas tarefas que se repetem ao longo do dia, tais como, envio de emails, publicação de posts nas redes sociais, sites entre outros, proporcionando mais liberdade aos profissionais do marketing para realizarem outras tarefas de maior valor agregado [17]. Este processo envolve uma ampla variedade de ferramentas e tecnologias que terão de ser adotadas, os especialistas da área mencionam que no mínimo terão de ser utilizados sistemas informáticos de manuseamento de *leads* e de automação de emails, bem como um programa de gestão de redes sociais entre outras formas que estão à mercê da forma como a empresa pretende abordar o cliente, tendo sempre em conta que esta não é a solução ideal para o aumento da procura pela entidade [17].

A Amazon, atualmente uma das maiores empresas mundiais, é um exemplo de sucesso muito devido à implementação deste tipo de tecnologia, que, através do correio digital e de publicações personalizadas, com o intuito de se envolver melhor com os clientes, aumentou rapidamente o seu portefólio de compradores e consequentemente as suas receitas [17].

E. *Exemplos de automação no marketing digital*

Existem diversas ferramentas de auxílio para a automação de marketing disponíveis no mercado, tais como os *softwares* de gestão de *leads*, email marketing, análise de dados, e gestão de redes sociais, desenvolvidos por diversos profissionais da área da informática, que facilmente se adaptam a qualquer rede de empresa.

1) *Gestão de leads*

Uma dessas ferramentas é o gestor de *leads*, que é a ferramenta primordial para a implementação da automação de marketing. Este permite que as entidades consigam gerir os *leads* com mais eficiência, desde a sua recolha inicial, ao seu desenvolvimento e monitorização contínua. Resumidamente, um *lead* é um potencial cliente que poderá vir a demonstrar interesse pelo produto ou serviço que estamos a tentar vender.

Este processo de gestão de *leads* irá recolher toda a informação necessária do contacto do potencial cliente, tal como o nome, o número telefónico, email, entre outros, que são recolhidos através das diversas estratégias de marketing e campanhas publicitárias que a empresa desenvolveu. Após esta fase de arrecadação de dados, estes *leads* serão qualificados no sistema para determinar o grau de interesse que o potencial comprador demonstra pelo nosso produto ou serviço, sendo isto só possível através de uma ferramenta de contagem, que regista todas as nossas visitas nos sites, contactos relacionados com o produto, pesquisas efetuadas, *downloads,* entre outros. O programa irá fazer uma triagem após este aglomerado de informação e vai definir o tipo de cliente com o qual se depara, qualificando e definindo assim os vários tipos de compradores, pois, após saber o tipo de cliente dentro de uma enorme diversidade, irá definir etapas bem estruturadas para guiar todos estes *leads* para o tão esperado processo de compra, ou seja, irá moldar o marketing a cada sujeito [18].

Durante todo este processo de *lead,* será importante realçar a oferta do produto, através de opiniões de clientes que obtiveram o produto, sujeitos a usufruir e demonstrar o serviço ou o produto, tudo de uma forma apelativa e cativante. Será de sublinhar a preciosidade do tempo nesta tarefa de interação com o cliente, pois uma boa nutrição de informação ao comprador e acompanhamento ao minuto de forma consistente e personalizada irá encaminhar para a decisão de compra o sujeito interessado [18].

2) *Email marketing*

O email marketing é outra forma de promover o nosso serviço ou produto de forma eficaz, através de uma interação direta com o público-alvo, onde, através do correio eletrónico, são geradas mensagens automáticas de convites para eventos, promoções ou divulgações de produtos. Este tipo de marketing só será possível através de uma ferramenta que construa uma lista de contactos, efetuada pelo gestor de *leads*, sendo que para esta recolha de dados será necessária a permissão do destinatário. A recolha de dados é ampla o suficiente para segmentar a informação por localização demográfica e histórico de compras, dependendo, por exemplo, do tipo de sistema utilizado, sem excluir a importância do horário de envio do email con-

ISBN: 978-989-36481-2-4

soante a hora do dia, em que o público-alvo será notificado para aumentar as probabilidades de abertura da mensagem. Todo este processo é monitorizado pelo sistema informático adotado, efetuando o cálculo de todas as percentagens de abertura de emails e de quantas vezes os mesmo foram abertos, que será imprescindível para a tomada de decisão e gestão do marketing [19,20].

Para termos uma noção mais realista da adesão ao marketing por via email, um estudo da eMarketer revela que cerca de 18,9% dos emails enviados são abertos, o que se traduz, através de cálculos superficiais, que, em 10.000 emails enviados, 1890 seriam abertos.

3) Chatbot

O *chatbot* é um tipo de assistente virtual que pode ser compreendido como um programa de *software* que conduz conversações com um utilizador através de áudio ou texto. Num contexto de marketing, os *chatbot* podem ser usados pelas empresas com vista a simularem a conversação humana, através de *natural language processing* ((NLP), com a finalidade assim de serem *user friendly* e melhorarem a experiência do consumidor, tendo como contrapartida para a empresa uma substancial redução de custos pela menor necessidade de colaboradores [21]. Este tipo de programas tem-se tornado uma das maiores áreas de interesse dos *marketeers*, na medida em que uma quantidade do tráfego dentro das redes sociais ocorre em serviços de mensagens privadas, como o *WhatsApp* ou *Facebook Messenger*. Sendo uma grande oportunidade de captar clientes e criar relação com os mesmos, os *marketeers* encaram esta ferramenta como uma plataforma para o fornecimento de atendimento personalizado ao cliente em larga escala e uma forma de guiar o utilizador através da sua jornada de consumo até à finalização da compra [20].

No momento, existem dois principais tipos de c*hatbot*. Por um lado, sistemas baseados em regras pré-definidas. Por outro, sistemas alimentados por *machine learning*, sendo que a grande diferença entre estes sistemas se baseia na capacidade e/ou qualidade de personalização do diálogo. Os sistemas com base em regras pré-definidas respondem ao utilizador através de respostas também elas pré-definidas encaminhando o utilizador na conversação. Os sistemas alimentados por *machine learning* utilizam a IA para interpretar sentimentos e até mesmo intenções do utilizador, visando reduzir o tempo de resolução de problemas ou até mesmo retomar conversas anteriores reduzindo o tempo até à compra [22].

F. Desafios da inteligência artificial no marketing

Com um desenvolvimento prematuro e uma implementação cada vez mais alargada da inteligência artificial no marketing, é crucial avaliar os impactos relacionados com a ética e privacidade dos dados do cliente.

O principal desafio, a que todas as entidades devem atender, será o de garantir a segurança máxima aquando da tomada de decisões relacionadas com este tipo de marketing, sendo que todas as tomadas de decisões internas, com base nos dados recolhidos pelas ferramentas, terão de ser imparciais e não discriminatórias, pois, apesar de o *software* otimizar todas as possibilidades de satisfação do cliente para que ele se fidelize com o produto em questão, ao mesmo tempo, por não haver uma arbitragem de raciocínio humano lógico, poderá haver previsões imprecisas de como o programa aborda o cliente, o que poderá afetar de forma negativa toda a confiança do cliente depositada na marca [2]. Uma situação destas, num *software* de uma dimensão tão ampla, será comparável a encontrar uma agulha num palheiro, sendo que, para evitar este tipo de conjuntura, a inteligência artificial terá de ser dotada com diversos dados representativos do que pretendemos transmitir, e, fundamentalmente, é necessário que existam monitorizações periódicas à forma como se irá atuar perante o cliente e medidas corretivas para as falhas potenciais do sistema [23].

O tema mais discutido, não só pelas empresas, é em relação à privacidade dos dados dos clientes, que tem vindo a dar que falar no seio da comunidade, onde muitas pessoas acabam por se sentirem inseguras quanto à forma como a informação é preservada. A recolha de um grande volume de dados consiste em informação de ouro para as entidades, sendo que a estrutura interna da empresa terá de desenvolver políticas restritas de tratamento da privacidade e segurança de dados, e, acima de tudo, a aprovação dessa partilha de dados pela ótica do cliente, transmitindo a máxima transparência possível [2,23].

IV. Conclusões

Da revisão da literatura realizada, torna-se evidente que a capacidade para o marketing englobar a IA nos seus processos é grande, sendo que esta pode ser usada para analisar dados, identificar padrões e auxiliar na tomada de decisões. Dentro do conceito de IA, a automação tem sido um dos grandes focos, na medida que permite que as empresas otimizem os seus processos de vendas e atendimento ao cliente, enquanto aumentam a sua eficiência e reduzem custos.

No que toca ao futuro desta ferramenta, que reforça acentuadamente a conquista de clientes de todas as formas possíveis, há que garantir que os sistemas de informação estejam atualizados e que sejam objetivos, tendo em conta que a personalização excessiva poderá ser uma barreira prejudicial a esta tecnologia. De salientar que, num futuro próximo, quanto mais avançados estes sistemas de trabalho de marketing estiverem, maiores serão as exigências dos profissionais de marketing, tendo estes de impulsionar as suas habilidades humanas para competirem de forma justa no mercado.

Finalmente, constata-se ainda que existe espaço para uma pesquisa aprofundada sobre a temática, de forma a dotar os *marketeers* de instrumentos e de conhecimento para a implementação desta tecnologia e os capacitar para a entrada em equipas multidisciplinares onde a IA e o marketing se cruzam.

Referências bibliográficas

[1] Jarek, K., and Mazurek, G. (2019). Marketing and Artificial Intelligence. *Central European Business Review*, 8(2), 46-55. https://doi.org/10.18267/j.cebr.213

[2] Van Esch, P., and Black, J. S. (2021). Artificial Intelligence (AI): Revolutionizing Digital Marketing. Australasian Marketing Journal (Amj), 29(3), 199–203. https://doi.org/10.1177/18393349211037684

[3] Kotler, P., Kartajaya, H., and Setiawan, I. (2021). *Marketing 5.0*: Technology for Humanity. John Wiley & Sons.

[4] Wirth, N. (2018). Hello marketing, what can artificial intelligence help you with?. *International Journal of Market Research*, 60(5), 435-438. https://doi.org/10.1177/1470785318776841

ISBN: 978-989-36481-2-4

[5] De Bruyn, A., Viswanathan, V., Beh, Y. S., Brock, J. K., and Von Wangenheim, F. (2020). Artificial Intelligence and Marketing: Pitfalls and Opportunities. *Journal of Interactive Marketing*, 51, 91-105. https://doi.org/10.1016/j.intmar.2020.04.007

[6] Tomás, D. (2020). *Inteligência Artificial: o Próximo Passo para uma Revolução no marketing Digital* [Tese de mestrado]. ISCTE Instituto Universitário de Lisboa.

[7] Verganti, R., Vendraminelli, L., and Iansiti, M. (2020). Innovation and Design in the Age of Artificial Intelligence. *Journal of Product Innovation Management*, 37(3), 212-227. https://doi.org/10.1111/jpim.12523

[8] Overgoor, G., Chica, M., Rand, W., and Weishampel, A. (2019). Letting the Computers Take Over: Using AI to Solve Marketing Problems. *California Management Review*, 61(4), 156-185. https://doi.org/10.1177/0008125619859318.

[9] Jain, P., and Aggarwal, K. (2020). Transforming Marketing with Artificial Intelligence. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 7(7), 3964-3976.

[10] Theodoridis, P.K., and Gkikas, D.C. (2019). *How Artificial Intelligence Affects Digital Marketing*. Springer Proceedings in Business and Economics, 1319–1327. https://doi.org/10.1007/978-3-030-12453-3_151

[11] Chintalapati, S., and Pandey, S.K. (2021). Artificial intelligence in marketing: A systematic literature review. *International Journal of Market Research*, 64(1), 38-68. https://doi.org/10.1177/14707853211018428

[12] Davenport, T. H., Guha, A., Grewal, D., and Bressgott, T. (2020). How artificial intelligence will change the future of marketing. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 48(1), 24-42. https://doi.org/10.1007/s11747-019-00696-0

[13] European AI Market Continues to Grow Steadily Despite Economic Uncertainty, Says IDC. (n.d.). IDC: The Premier Global Market Intelligence Company. https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prEUR250299023

[14] Chui, M., Hall, B., Singla, A., and Sukharevsky, A. (2022). *The state of AI in 2021*. (n.d.). McKinsey & Company. https://www.mckinsey.com/capabilities/quantumblack/ourinsights/global-survey-the-state-of-ai-in-2021

[15] Eriksson, T., Bigi, A., and Bonera, M. (2020). Think with me, or think for me? On the future role of artificial intelligence in marketing strategy formulation. *The TQM Journal*, 32(4), 795-814. https://doi.org/10.1108/tqm-12-2019-0303

[16] Moreira, R. (2021). *Inteligência Artificial no Marketing Digital: Aceitação da Utilização de Inteligência Artificial nas Plataformas de Comércio* [Tese de mestrado]. Universidade Europeia.

[17] Florek, M. (2018). *Marketing Automation for Dummies*. John Wiley & Sons.

[18] Gupta, A. (2020). *Marketing Automation Made Easy: How to Use Automation to Grow Your Business*. Independently published.

[19] Kirschner, S. (2019). *Automated Marketing with Artificial Intelligence: The Future Is Here*. Springer Nature.

[20] Murgai, A. (2018). Transforming Digital Marketing with Artificial Intelligence. *International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science*, 7(4), 259-262.

[21] Hoyer, W. D., Kroschke, M., Schmitt, B. H., Kraume, K., and Shankar, V. (2020). Transforming the Customer Experience Through New Technologies. *Journal of Interactive Marketing*, 51, 57-71. https://doi.org/10.1016/j.intmar.2020.04.001

[22] Madeira, A., Neves, B., and Branco, D. (2020). O Uso da Inteligência Artificial Aplicada ao Marketing Digital: exploração das vulnerabilidades do usuário-consumidor. *Journal of Digital Media & Interaction*, 3(8), 95–111.

[23] Russell, S. J., and Norvig, P. (2010). *Artificial Intelligence: A Modern Approach*. Prentice Hall

ISBN: 978-989-36481-2-4

Como alcançar o sucesso digital nas empresas através das métricas de marketing

How to achieve digital success in companies through marketing metrics

Micaela Cardoso
Polytechnic Institute of Coimbra,
Coimbra Business School, Quinta Agrícola-Bencanta,
3045-231, Coimbra, Portugal
a2023110040@alumni.iscac.pt

Britney Lalgi
Polytechnic Institute of Coimbra,
Coimbra Business School, Quinta Agrícola-Bencanta,
3045-231, Coimbra, Portugal
a2023117542@alumni.iscac.pt

Leandra Ribeiro
Polytechnic Institute of Coimbra,
Coimbra Business School, Quinta Agrícola-Bencanta,
3045-231, Coimbra, Portugal
a20191333981@alumni.iscac.p

Mónica Tavares
Polytechnic Institute of Coimbra,
Coimbra Business School, Quinta Agrícola-Bencanta,
3045-231, Coimbra, Portugal
a2023109329@alumni.iscac.pt

Anabela de Figueiredo Marcos
Polytechnic Institute of Coimbra,
Coimbra Business School, Quinta Agrícola-Bencanta,
3045-231, Coimbra, Portugal
amarcos@iscac.pt

***Resumo* — Numa era dominada pelos avanços digitais, o sucesso das empresas depende da utilização eficaz das métricas de marketing. Assim, o propósito deste estudo consiste em evidenciar o papel das métricas de marketing no sucesso digital das empresas, mostrando que são essenciais para o desenvolvimento estratégico. Ao analisar e interpretar os indicadores de desempenho, as organizações podem aperfeiçoar as suas estratégias, otimizar a atribuição de recursos e melhorar a eficácia do marketing. As métricas são fundamentais, pois influenciam a taxa de conversão, o custo de aquisição e o envolvimento dos meios de comunicação social na definição de iniciativas digitais bem-sucedidas.**

***Palavras-chave* – Métricas; Marketing; KPI's; Sucesso Digital.**

***Abstract* — In an era dominated by digital advancements, the success of companies depends on the effective use of marketing metrics. Therefore, the purpose of this study is to highlight the role of marketing metrics in the digital success of companies, showing that they are essential for strategic development. By analyzing and interpreting performance indicators, organizations can refine their strategies, optimize resource allocation, and improve marketing efficacy. Metrics are fundamental because they influence conversion rates, acquisition costs, and social media engagement in defining successful digital initiatives. Parte superior do formulário**

Keywords – Metrics; Marketing; KPI; Digital Success.

I. Introdução

O mundo do marketing digital é dinâmico e cheio de oportunidades. Para que a empresa alcance o seu sucesso digital, é essencial compreender e acompanhar as métricas do marketing e interpretar os KPI´s. Os mercados tradicionais estão a perder o terreno para os mercados *online*, onde estes últimos são cada vez mais relevantes na promoção dos seus produtos e serviços.

O propósito deste artigo consiste em identificar as diversas formas de alcançar o sucesso digital através das métricas de marketing. Desta forma, o presente estudo abarca quatro pontos: o primeiro consiste numa introdução; o segundo aborda a metodologia adotada; o terceiro procede a uma revisão sistemática da literatura sobre o marketing digital, o sucesso digital, as métricas de marketing, as métricas de negócio e as métricas sociais, e, por fim, a medição de resultados. Para isso, falaremos dos indicadores chaves de desempenho (KPI´s) e indicaremos algumas chaves como os indicadores de produtividade, de capacidade e de qualidade. Finalmente, o quarto ponto contempla a conclusão e as linhas futuras de investigação relacionadas com o tema.

II. Metodologia

Este artigo escolheu, como formas de abordar o tema, o método de revisão da literatura. Com esse propósito, recorreu-se à pesquisa nas seguintes bases de dados: *B-on; Google Académico*, e ainda em outras fontes, como dissertações de mestrado e livros editados. Procurou-se considerar apenas publicações mais recentes, mas, à medida que o artigo ganhava forma, houve a necessidade de abranger publicações menos atuais.

Identify applicable sponsor/s here. If no sponsors, delete this text box. (sponsors)

III. Revisão da literatura

A. Marketing Digital e a sua Evolução

Kotler e Armstrong (2015) definem marketing como o processo social por meio do qual pessoas e grupos satisfazem desejos e necessidades com a criação, oferta e livre negociação de produtos e serviços de valor com as outras pessoas. Podendo assim dizer-se que o marketing digital é a venda ou comercialização de um determinado produto ou serviço ou marca através das mídias digitais ou também das redes digitais.

Por volta dos anos noventa, a Internet passou por uma tremenda transformação no seu crescimento, causando assim o surgimento de diversas empresas da nossa atualidade. Foi dado o nome de Web 1.0, onde surgiram os primeiros mecanismos de busca e venda de produtos *online* e os primeiros *softwares* de comunicação se foram tornando acessíveis ao mundo. Desta forma, o marketing foi evoluindo, através das seguintes fases: Marketing 1.0 que é o início do Marketing, Marketing 2.0 em que é de salientar a segmentação de mercado, o posicionamento e o marketing-mix, o marketing 3.0 que se debruça sobre as relações colaborativas, o marketing 4.0 que se centra na área digital que, em conjunto com o marketing *offline*, se designa "Blended Marketing", e, por fim, temos o marketing 5.0, que são as tecnologias humanizadas, isto é, a inteligência artificial.

Durante esse período surgiu a Google (na sua forma mais rudimentar), bem como outros motores de busca, dando início, dessa forma a uma nova era, a tão chamada "Era digital", surgindo o Marketing Digital. Marketing Digital ou Marketing 4.0, que foi considerado a atualização do Marketing, que compreende a realidade do consumidor e que leva em consideração a sua decisão de compra e as informações disponíveis na Internet sobre o produto ou serviço.

O marketing digital é um termo genérico utilizado para caracterizar todas as formas de marketing *online*, podendo ser utilizado por qualquer empresa independentemente do setor [2]. O marketing digital torna-se cada vez mais importante, uma vez que há o avanço da interação entre as empresas e os consumidores, sendo a sua principal função promover a ação e a defesa da marca [3]

A Internet afeta o marketing das empresas de diversas maneiras, desde a comunicação corporativa até à publicidade e, ,independentemente de a empresa estar ou não a participar nesse ambiente, os consumidores estarão presentes, comunicando sobre os seus produtos e serviços, comparando-os com os dos concorrentes [4].

B.Sucesso Digital/ Estratégia Digital

Para ter sucesso no mercado digital, é necessário que o empreendedor tenha os planos devidamente estruturados, sendo o sucesso digital considerado um conjunto de ações usadas para manter uma determinada marca em frente ao mercado. Este sucesso refere-se ao êxito obtido no mercado *online* e para alcançar este sucesso é essencial uma estratégia digital.

A estratégia digital é uma estratégia organizacional formulada e executada através de recursos digitais, que tem em vista a criação de valor e a vantagem competitiva [5]. A transformação digital é considerada um processo inevitável para qualquer empresa e sector. Contudo, a falta de estratégia digital é identificada como uma das principais razões pelas quais apenas um pequeno número de empresas é capaz de implementar planos [6]. A estratégia digital define objetivos e iniciativas de digitalização concretos, a curto, médio e longo prazo, no contexto de produtos, serviços e também na criação de valores, bem como para a organização e cultura de uma empresa [7].

Pode assim afirmar-se que o sucesso digital assume cada vez mais um papel elementar nas empresas e na sociedade, onde este adquire novas formas de desenvolvimento no mercado, o apoio por liderança e a cultura organizacional.

C. Métricas de Marketing

Compreender a eficácia das estratégias de marketing digital requer a capacidade de analisar e medir o seu impacto. O uso de métricas de marketing apropriadas é crucial para avaliar os objetivos alcançados e até para determinar se a estratégia implementada é a mais adequada para atingir os objetivos da organização. Ao identificar os indicadores de desempenho mais relevantes, as empresas podem aprimorar as suas taxas de conversão, o que consequentemente aumenta a sua visibilidade *online* [8].

A capacidade de medir os meios digitais é um dos principais benefícios do marketing digital em comparação com o marketing tradicional. Os profissionais de marketing perceberam rapidamente que a capacidade de avaliar as interações dos visitantes do *site,* através de ferramentas analíticas, proporciona uma compreensão mais profunda sobre a eficácia das ações de marketing [9].

1. Métricas de Negócio

Métricas de negócio são medidas quantitativas que servem para avaliar o desempenho e o impacto das atividades de marketing relativamente aos objetivos e metas globais da empresa [10]. Medem a eficácia das estratégias de marketing, com a garantia de ajudar as organizações a tomar decisões informadas e planear recursos de maneira eficiente. O alinhamento com os objetivos de negócio é importante, atendendo a que as métricas de marketing têm de estar diretamente alinhadas com o propósito da empresa, seja pelo aumento das vendas ou pelo fortalecimento da marca. Para além desse fator, também tem de existir relevância para o público, pois devem refletir aspetos que sejam relevantes, tendo em conta que devem contribuir para a construção de um relacionamento sólido entre a marca e o seu público.

O *benchmarking* compara as métricas de marketing com as *benchmarks* da empresa, que fornecem perspetivas diferentes sobre o desempenho e áreas de melhoria. As métricas de *branding* avaliam a perceção da marca, o seu reconhecimento, sentimentos e lealdade do cliente em relação à marca. A taxa de conversão serve para entender como as *leads* estão a progredir. Pode ser avaliado na forma como a taxa de conversão se encontra em diferentes fases, como estão os visitantes do site para a *lead* e como a *lead* está para o cliente. O custo por aquisição avalia o custo médio para adquirir um novo cliente. Esta métrica é essencial para entender a eficiência das estratégias de aquisição de clientes. O ROI (*Return on Investiment*) mede o retorno sobre o investimento medindo o impacto finan-

ISBN: 978-989-36481-2-4

ceiro das iniciativas de marketing em relação ao investimento feito, ajudando a medir a eficácia e a eficiência das campanhas.

É essencial que as métricas de negócio sejam escolhidas com precisão, como também é fundamental ajustar as métricas à medida que as estratégias e objetivos forem mudando [10].

2. Métricas Sociais

As métricas sociais referem-se às medidas quantitativas e qualitativas que avaliam o desempenho e o impacto das atividades de marketing em plataformas de comunicação social. Estas métricas são essenciais para compreender como a marca está a ser vista pelo público e como os utilizadores estão a envolver-se com o conteúdo [11].

O *engagement* inclui gostos, comentários, partilhas e cliques nos *posts*. Este indicador mede a interação do público com o conteúdo e a sua recetividade ao mesmo. O alcance mede quantas pessoas foram expostas ao conteúdo nas redes sociais, sendo que pode haver dois tipos de alcance, orgânico (não pago) e pago. As impressões representam o número total de visualizações de um conteúdo nas redes sociais. A taxa de cliques mede a percentagem de pessoas que clicaram num *link* em relação ao total de pessoas que viram o *post*. Este indicador é importante na avaliação do interesse e da eficácia do conteúdo. As conversões sociais averiguam as ações desejadas, como preenchimento de formulários ou compras, que resultam em interações nas redes sociais. As partilhas indicam a quantidade de vezes que um *post* foi partilhado, num alcance orgânico. O tempo médio de visualização de vídeo mede o tempo que os utilizadores assistem ao vídeo publicado nas redes sociais. É um indicador importante para perceber o envolvimento com o conteúdo audiovisual. O ROI social avalia o retorno sobre o investimento em campanhas lançadas nas redes sociais.

Estas métricas ajudam as empresas a entender o impacto das iniciativas de marketing, permitindo ajustar e otimizar para alcançar metas específicas, como aumentar a perceção da marca, impulsionar o *engagement* e a conversão de *leads* em clientes.

D. Medição de Resultados

Medir os resultados permite às empresas perceber se estão alinhadas com o plano estratégico. Tornou-se crucial ponderar as métricas mais conhecidas e úteis - as métricas de campanhas pagas, métricas de marketing de conteúdo, *email marketing* e as métricas de receitas e vendas [12].

As métricas de campanhas pagas são cruciais para avaliar o desempenho e a eficácia das campanhas de publicidade *online,* pois ajudam os anunciantes a entender como os seus investimentos em publicidade estão a contribuir para os objetivos de marketing e de negócios. As campanhas pagas são anúncios de publicidade pagos configurados nas redes sociais. As métricas de campanhas pagas mais importantes são, por exemplo, a taxa de cliques (CTR), o custo por mil impressões (CPM) e o custo por *lead* (CPL).

O CTR, ou Taxa de Cliques (em inglês, *Click-Through Rate*), é uma métrica usada em campanhas de marketing digital para medir a eficácia de anúncios *online*, emails marketing, ou outras formas de comunicação digital. O CTR é calculado dividindo o número de cliques que um anúncio recebe pelo número de vezes que o anúncio é exibido (impressões), multiplicando o resultado por 100 para obter uma percentagem. Essa métrica é crucial para entender o quanto um anúncio ou campanha específica é atraente para o público-alvo, indicando a proporção de pessoas que viram o anúncio e se sentiram motivadas a clicar nele para saber mais. Um CTR alto sugere que o anúncio é relevante e interessante para o público que o está vendo, enquanto um CTR baixo pode indicar que o anúncio não é atraente ou relevante para o público-alvo, ou que a mensagem não está a ser entregue de forma eficaz. O CTR ajuda os anunciantes a otimizar as suas campanhas e a afetação do orçamento para melhorar o desempenho geral das suas estratégias de marketing digital.

CPM é uma sigla que significa "Custo por Mil Impressões" (em inglês, *Cost per Mille*), uma métrica comumente utilizada em campanhas de marketing digital e publicidade para medir o custo de exibir um anúncio mil vezes. Serve para avaliar o custo de eficiência das campanhas publicitárias digitais, ajudando os anunciantes a entender quanto estão a pagar para que o seu anúncio seja exibido mil vezes numa plataforma ou rede de publicidade. O CPM é calculado dividindo-se o custo total da campanha pelo número total de impressões (exibições do anúncio), multiplicando-se depois o resultado por mil. Esta métrica permite que os anunciantes comparem a eficiência de custo de diferentes canais de publicidade, campanhas ou segmentos de público-alvo, facilitando a tomada de decisões informadas sobre onde alocar o seu orçamento de publicidade, para alcançar o melhor retorno sobre o investimento (ROI). Monitorar o CPL permite às empresas avaliar a eficácia das suas campanhas de marketing e ajustar as suas estratégias para maximizar o ROI. Reduzir o CPL, mantendo ou melhorando a qualidade dos *leads*, é um objetivo comum em campanhas de marketing, indicando uma alocação de recursos mais eficiente e uma estratégia de marketing mais eficaz.

O CPL, comumente conhecido como *Custo por Lead* (CPL), é uma métrica importante em marketing digital e publicidade que mede o custo associado à aquisição de um novo *lead* para o negócio. Um *lead* refere-se a um potencial cliente que demonstrou interesse no seu produto ou serviço, de alguma forma, preenchendo um formulário, assinando uma *newsletter*, ou realizando uma ação que indique um potencial interesse de compra. O CPL é calculado dividindo o custo total das campanhas de marketing pelo número total de *leads* gerados por essas campanhas. Esta métrica ajuda os anunciantes e os *marketers* a entenderem o quão eficiente é o seu investimento em marketing na geração de novos interesses de clientes potenciais.

As métricas de marketing de conteúdo são fundamentais para avaliar a eficácia das estratégias de conteúdo e garantir que elas contribuam para os objetivos mais amplos de marketing e de negócios. Algumas das métricas mais importantes são o Tráfego do Website, que mede o número de visitantes únicos e sessões no seu site, sendo um indicador-chave da atração do seu conteúdo. Outra é a Taxa de Rejeição (*Bounce Rate*) que é a percentagem de visitantes que saem do site após visualizar apenas uma página. Uma taxa de rejeição alta pode indicar conteúdo irrelevante ou de baixa qualidade. Uma outra é o Tempo na Página/Tempo de Sessão, que é o tempo médio que os visitantes passam lendo o conteúdo do seu site. Mais tempo na página geralmente indica um conteúdo mais envolvente. Outra é a Taxa de Conversão, que é a percentagem de visitantes que realizam uma ação desejada (como se inscrever numa *news-*

ISBN: 978-989-36481-2-4

letter, fazer *download* de um recurso ou realizar uma compra) após interagir com o seu conteúdo. Outra é Engajamento nas Redes Sociais, que inclui *likes*, partilhas, comentários e outras interações nas plataformas de mídia social. Indica quão valioso, relevante e partilhável é o seu conteúdo. Outra são os *Leads* Gerados, que são o número de *leads* qualificados gerados através do conteúdo, e que são essenciais para campanhas focadas na geração de *leads.* Outra é o Custo por *Lead* (CPL), que é o custo total de produção e distribuição de conteúdo dividido pelo número de *leads* gerados. Ajuda a avaliar a eficiência do investimento em marketing de conteúdo. Outra é a Retenção de Clientes, que mede a eficácia do conteúdo em manter clientes existentes, frequentemente avaliada através de taxas de renovação, frequência de compra ou engajamento contínuo. Outra é o Alcance Orgânico, que é o número de pessoas que veem o seu conteúdo sem promoção paga. Um alcance orgânico alto indica uma forte presença de marca e autoridade no assunto. Por último, a Autoridade de Domínio/Classificação nos Motores de Busca reflete a visibilidade do seu site nos resultados de pesquisa, indicando a qualidade e a relevância do seu conteúdo para os motores de busca.

O *e-mail marketing* pode ser definido como a "promoção de produtos ou serviços via e-mail, sendo uma ferramenta bastante versátil no que diz respeito ao tipo de conteúdo, que poderá ser personalizado, sob diversas vertentes [13]. Estas métricas fornecem insights valiosos sobre o desempenho das suas campanhas de e-mail marketing, permitindo otimizar a comunicação, melhorar o engajamento dos assinantes, e aumentar o ROI das suas iniciativas de e-mail.

Parte superior do formulário

As métricas de e-mail marketing mais importantes são a Taxa de Entrega que é a percentagem de e-mails enviados que foram efetivamente entregues nas caixas de entrada dos destinatários. Uma baixa taxa de entrega pode indicar problemas com a lista de e-mails ou com a reputação do remetente. Uma outra é a Taxa de Abertura (*Open Rate*), que é a percentagem de e-mails abertos em relação ao número total de e-mails entregues. Esta métrica ajuda a avaliar o interesse dos assinantes pelo assunto ou remetente do e-mail. Outra é a Taxa de Cliques **(***Click-Through Rate***-**CTR), que é a percentagem de destinatários que clicaram em pelo menos um *link* contido no e-mail. É uma métrica chave para avaliar o interesse e a interação dos assinantes com o conteúdo do e-mail. Outra é a Taxa de Conversão, que é a percentagem de destinatários que realizaram uma ação desejada (como fazer uma compra ou se inscrever para um evento) após clicar em um *link* no e-mail. Essa métrica é crucial para medir o sucesso real das campanhas em termos de alcançar objetivos específicos. Outra é a Taxa de Descadastro (*Unsubscribe Rate*), que é a percentagem de destinatários que optaram por não receber mais e-mails. Uma taxa alta pode indicar que o conteúdo não está atendendo às expectativas ou interesses dos assinantes. Uma outra é a Taxa de Rejeição (*Bounce Rate***)**, que é a percentagem de e-mails que não foram entregues com sucesso nas caixas de entrada dos destinatários, dividido entre rejeições duras (endereços de e-mail inválidos) e rejeições suaves (problemas temporários, como caixa de entrada cheia). A outra é a Taxa de Crescimento da Lista, que mede o ritmo de crescimento da sua lista de e-mails, considerando novas inscrições e descadastros. É importante para avaliar a eficácia das estratégias de aquisição de assinantes. A outra é a Taxa de Cliques para Abertura (*Click-to-Open Rate*-CTOR), que é a percentagem de cliques em relação ao número de e-mails abertos, oferecendo uma medida mais precisa da eficácia do conteúdo do e-mail para aqueles que realmente o viram. Outra é a Receita por E-mail Enviado, que calcula a receita gerada por cada e-mail enviado, ajudando a avaliar o retorno financeiro das campanhas de e-mail marketing.

As métricas de receitas e vendas são indicadores-chave de desempenho (KPIs) que ajudam as empresas a avaliar a saúde financeira e a eficácia das suas estratégias comerciais. Oferecem *insights* valiosos sobre o sucesso das operações de vendas, o crescimento da receita, e a lucratividade da empresa. Uma das métricas de receitas e vendas mais importante é a **Receita Total**, que é a soma do dinheiro gerado pela venda de produtos ou serviços antes de qualquer despesa ser subtraída. É o indicador mais básico da entrada de dinheiro numa empresa. Estas métricas fornecem uma visão do desempenho financeiro e operacional de uma empresa, permitindo aos gestores tomarem decisões informadas para impulsionar o crescimento, a eficiência e a rentabilidade.

As métricas são vitais para qualquer empresa que procura crescer, otimizar e manter-se relevante num mercado competitivo. São a bússola que orienta as decisões, estratégias e ações em todos os níveis da organização.

E. Key Performance Indicators (KPI´s)

Num cenário dinâmico, como o do marketing, a mensuração efetiva do desempenho é essencial para enfrentar os desafios específicos nesta área em constante evolução. Dentro desse contexto, os Indicadores-Chave de Desempenho (KPI's) assumem um papel crucial, como ferramentas indispensáveis para identificar e medir resultados nas variadas ações de marketing. A disseminação generalizada dos indicadores reflete-se diretamente nas estratégias das empresas, ancorando-se na capacidade de os KPI's proporcionarem uma visão objetiva e quantificável do sucesso das iniciativas de marketing.

Neste contexto, a mensuração e avaliação do desempenho no marketing não só desempenha um papel fundamental, como também molda diretamente as estratégias adotadas pelas empresas. Como foi destacado por [14], a habilidade de identificar e mensurar resultados em diversas ações de marketing é crucial, e é aqui que os Indicadores-Chave de Desempenho (KPI's) emergem como ferramentas essenciais [14]. A prática difundida do uso de KPI's nas estratégias de marketing empresarial, conforme foi evidenciado por Stricker et al. (2017) [15], enfatiza a relevância destes indicadores na avaliação eficaz das estratégias. Além disso, a sua adoção oferece flexibilidade para adaptar as ações às exigências de um ambiente em constante evolução. O entendimento aprofundado da estrutura dos KPI's aumenta não apenas a precisão das estimativas, mas também impulsiona a otimização contínua das ações de marketing.

E1. Indicadores de Capacidade

Os indicadores de capacidade referem-se às medidas utilizadas para avaliar a eficácia e o desempenho das estratégias de marketing [16]. São indicadores cruciais para perceber como é que as atividades de marketing contribuem para os objetivos gerais da empresa e para serem tomadas decisões informadas na otimização das campanhas.

ISBN: 978-989-36481-2-4

A taxa de conversão mede a quantidade de visitantes no site, que realizam a ação desejada, ou seja, realizar uma compra, quue preenchem formulários ou assinam uma *newsletter.* O ROI (Retorno Sobre Investimento) avalia a eficácia financeira das campanhas de marketing, comparando os ganhos obtidos com os custos associados à execução das campanhas. O CPA (Custo Por Aquisição) calcula o custo médio para adquirir um novo cliente, dividindo os gastos totais de marketing pelo número de novos clientes obtidos. A CTR (Taxa de Cliques) mede a quantidade de pessoas que clicaram num anúncio em relação ao número total de pessoas que o viram. O *engagement* avalia a interação entre o cliente e a marca. Os *leads* medem a quantidade de utilizadores que forneceram informações de contacto. O tempo médio no site indica a média de tempo que os visitantes estão *online*, de forma a avaliar o interesse e envolvimento. A taxa de retenção de clientes avalia a capacidade da empresa para manter clientes a longo prazo. O índice de satisfação do cliente mede a satisfação geral dos clientes obtido por *feedbacks* [16].

E2. Indicadores de Produtividade

Os indicadores de produtividade são métricas, que pretendem decifrar o desempenho individual e coletivo dos profissionais da equipa de marketing, relativamente à sua entrega e aos recursos investidos para concretizar o projeto, seja ele em tempo ou dinheiro. Os indicadores de produtividade fazem parte do grupo dos KPIs.

A produtividade consiste em usar recursos para que os custos sejam reduzidos, aumentando a competitividade, e, para que isso aconteça, é necessária a interação entre todos os sectores da organização, onde cada um deve estar alinhado com os propósitos da organização, para que haja uma cadeia produtiva com a finalidade de melhoria da produtividade [17].

E3. Indicadores de qualidade

Com a evolução acelerada da tecnologia do conhecimento, as empresas têm vindo a superar eficazmente as expectativas dos seus consumidores, através da disponibilização de produtos que satisfaçam todas as suas necessidades. Consequentemente, os consumidores são levados a escolher com base nas perceções de valor/qualidade desses produtos e serviços.

Os indicadores de qualidade consistem em mensurar, de forma quantitativa, a perceção e aceitação do produto ou serviço pelo cliente e também medir a conformidade do produto final de acordo com o projeto do mesmo, que deve acompanhar-se de metas, que irão fornecer o nível determinado de sucesso a ser atingido [5].

Para elaborar o indicador de qualidade é importante considerar alguns fatores, como o seu grau de importância, a sua eficiência no atendimento, e a sua disponibilidade. Cada organização detém o seu próprio desempenho de qualidade. Como indicador de qualidade, exige o foco nas métricas certas, sem desvalorizar as restantes métricas, que também são essenciais para a análise do crescimento da produtividade das organizações, priorizando os indicadores dos resultados, com o objetivo de deteção daqueles que geram custo de estratégia. Contudo, esta métrica tem como finalidade analisar o contributo da estratégia de uma organização. A satisfação do cliente está intimamente ligada à qualidade, sendo que podemos simplesmente afirmar que a qualidade se resume à ausência de inconformidade.

E4. Indicadores Estratégicos

Os indicadores estratégicos do marketing digital, os KPI's, são indicadores que devem ser definidos no âmbito do planeamento de estratégias das organizações, tendo em conta que este está ligado aos objetivos e metas dos negócios, e é a partir destes que conseguimos perceber se a empresa atingiu ou não os seus objetivos, e se existem melhorias a fazer. A estratégia de marketing no digital é muito ampla e relativa, uma vez que para cada modelo de negócio se aplica uma estratégia diferente e, para isso, é essencial fazer análises através de indicadores para perceber o mercado, as suas necessidades e responder às suas exigências.

O marketing é a escolha de segmentos de mercado e clientes que as unidades de negócio pretendem servir, identificando os processos internos críticos nos quais a unidade deve atingir excelência para a concretização das suas propostas de valor aos clientes-alvos e selecionar as capacidades individuais e organizacionais necessárias para atingir os objetivos internos dos clientes. No mundo do marketing, a utilização de métricas é vista como uma forma de alcançar o sucesso digital, onde é necessário que uma determinada empresa tenha um desenvolvimento adequado no mercado em que está inserida. Contudo o uso de métricas de marketing e os indicadores chaves de desempenho implicam que a empresa esteja devidamente estruturada de forma, isto é, segmento por segmento, a fim de alcançar os seus objetivos.

A disseminação dos indicadores de desempenho prende-se com a capacidade de cada KPI de proporcionar uma visão objetiva e quantificável do sucesso das iniciativas de marketing. Concluímos que, para alcançar o sucesso neste mundo da área digital, as empresas devem sempre recorrer aos indicadores como uma forma de auxílio e de desempenho como tomada de decisão entre as diferentes campanhas digitais (*email marketing*, campanhas pagas e marketing de conteúdo).

A estratégia é regra e diretriz para a decisão, que orienta o processo de desenvolvimento de uma organização. A CTR (*Click through Rate*) é utilizada para analisar a frequência com que a plataforma é visitada ou uma campanha é visualizada. O Custo por *Lead*, também utilizado pelas empresas, é um indicador estratégico que tem como objetivo gerar mais *leads*. No fundo, esta estratégia de custo por *lead* é utilizada para melhorar a eficiência dos serviços ou a campanha. O *Engagement,* que é aplicado através de uma interação com os consumidores, criando uma ligação de proximidade com o objetivo de melhorar os resultados, facilita a perceção das ações e dos caminhos mais eficientes a seguir, causando intencionalmente impacto no seu nicho.

F. Sucesso das Métricas de Marketing Digital focado nas Empresas

A escolha das métricas de marketing digital precisa refletir o tipo de imagem que se pretender transmitir da empresa, bem como atender ao perfil dos clientes e usuários que possui ou que pretende alcançar, ressaltando que o mercado-alvo da Internet ultrapassa os limites da comunidade de pesquisadores [19].

O marketing digital é a aplicação de estratégias digitais que utilizam teorias e ferramentas já conhecidas. Consiste, assim, na utilização da Internet como uma ferramenta para promov-

ISBN: 978-989-36481-2-4

er os serviços e produtos da empresa, através da comunicação, publicidade e de todos os conceitos de marketing [20].

As métricas e o sucesso das mesmas nas empresas no contexto digital funcionam como indicadores que ajudam os profissionais a canalizar as suas energias em busca dos objetivos da organização. Elas são usadas para medir vários indicadores, como a satisfação do cliente, a percentagem de crescimento e a produtividade.

No contexto digital, é importante analisar a interatividade com os clientes nos seus principais canais de comunicação, em que, nos dias de hoje, se resumem essencialmente às redes sociais, facilitando a perceção das preferências de pesquisas de produtos e serviços que despertam mais interesse, chave que define o índice de satisfação de cliente. Contudo, também podem ser entendidas como ferramentas de quantificação que uma organização utiliza para medir o seu progresso.

As diversas métricas de sucesso ajudam na avaliação de um negócio, nas mais inúmeras áreas possíveis, como o Índice de satisfação do cliente (avalia até que ponto os clientes estão satisfeitos com o seu produto ou serviço, através de algumas informações mensuradas como a análise de comentários) e o tempo de resposta de um serviço, entre outras. A produtividade é, sem dúvida, uma métrica com uma relevância enorme, porque, quando falamos de lucros, falamos da sustentabilidade das empresas, em que se mede a situação financeira da organização. Contudo, o crescimento consiste em analisar o aumento dos clientes, bem como a receita e a participação de mercado da organização.

O sucesso de uma empresa não vem apenas do simples facto de esta produzir um produto ou serviço de qualidade ou vender a um preço justo no mercado, é muito mais do que isso, há que trabalhar os objetivos finais traçados, definir KPI's mais relevantes para os seus negócios, evitar métricas que não geram resultados pretendidos pela organização, e proceder à comparação das métricas.

IV. CONCLUSÕES

No mundo do marketing, a utilização de métricas é vista como uma forma de alcançar o sucesso digital, onde é necessário que uma determinada empresa tenha um desenvolvimento adequado no mercado em que está inserida. Contudo, o uso de métricas de marketing e os indicadores-chave de desempenho implicam que a empresa esteja devidamente estruturada, isto é, segmento por segmento, a fim de alcançar os seus objetivos.

A disseminação dos indicadores de desempenho prende-se com a capacidade de cada KPI proporcionar uma visão objetiva e quantificável do sucesso das iniciativas de marketing. Concluímos que, para alcançar o sucesso neste mundo da área digital, as empresas devem sempre recorrer aos indicadores como forma de auxílio na tomada de decisão entre as diferentes campanhas digitais (*e-mail marketing*, campanhas pagas e marketing de conteúdo).

Referências bibliográficas

[1] Kotler, P. & Armstrong, G. (2015). *Princípios de Marketing*, Pearson Education do Brasil.

[2] Sudha, M., & Sheena, K. (2017). Impact of influencers in consumer decision process: the fashion industry. *SCMS Journal of Indian Management*, 14(3), 14-30.

[3] Kotler, P., Kartajaya, H., & Setiawan, I. (2017). *Marketing 4.0: Do Tradicional ao Digital*. Rio de Janeiro, Brasil: Sextante.

[4] Torres, C. (2009*). A Bíblia do Marketing Digital: Tudo o Que Você Queria Saber Sobre Marketing e Publicidade na Internet e Não Tinha a Quem Perguntar.* São Paulo, Brasil: Novatec Editora.

[5] Chi, M., Zhao, J., & Li, Y. (2016). Digital Business Strategy and Firm Performance: The Mediation Effects of E-collaboration Capability. Wuhan *International Conference On E-Business: 2016 Proceedings*, 58, 86-97.

[6] Matt, C., Hess, T., & Benlian, A. (2015). Digital Transformation Strategies. *Business & Information Systems Engineering*, 57(5), 339-343.

[7] Lipsmeier, A., Kühn, A., Joppen, R., & Dumitrescu, R. (2020). Process for the development of a digital strategy. *Procedia CIRP*, 88, 173-178.

[8] Saura, J. R., Sánchez, P. P., & Suárez, L. C. (2017). Understanding the Digital Marketing Environment with KPIs and Web Analytics. *Future Internet*, 9, 76, doi:10.3390/fi9040076.

[9] Chaffey, D. (2013). *Definitions of Emarketing vs Internet vs Digital Marketing*. Smart Insights.

[10] Paine, K. (2011). *Measure What Matters: Online Tools For Understanding Customers, Social Media, Engagement, and Key Relationships*. 1st edition.

[11] Sponder, M. (2013) *Social Media Analytics: Effective Tools for Building, Interpreting, and Using Metric*.

[12] Gouveia M. (2022). *Marketing Digital - o guia completo. Ideias de Ler.* 2ªedição.

[13] Brown, B. (2007). *The Complete Guide to E-mail Marketing*. Atlantic Publishing Group.

[14] Junior, H.D., & Lourenço, C.E. (2013). How do executives measure marketing results? Proposals on dimensions and corresponding items for a scale measuring the perception of marketing metricas adoption. AMA Summer *Educators Conference Proceedings*,.24, 172-180.

[15] Stricker, N., Micali, M., Dornfeld, D., & Lanza, G. (2017). Considering Interdependencies of KPIs – Possible Resource Efficiency and Effectiveness Improvements. *Procedia Manufacturing* 8, 300-307.

[16] Hemann, C., & Burbary, K. (2018). *Digital Marketing Analytics: Making Sence of Costumer Data in a Digital World*. Que Publishing. 2nd edition.

[17] Chase, R.B., Jacobs, R.F, & Aquilano, N.T. (2006). *Administração da produção* para a vantagem competitiva. 10ª edição, ed. Porto Alegre: Bookman.

[18] Carpinetti, L.R. (2010). *Gestão de Qualidade: Conceitos e Técnicas*. 1. ed. São Paulo: Atlas.

[19] Araújo, V.M.R.H. & Freire, I.M. (1996). A rede Internet como canal de comunicação, na perspetiva da Ciência da Informação. *Transformação, Campinas*, 8(2), 45-55.

[20] Torres, C. (2009). *A Bíblia do Marketing Digital: Tudo o Que Você Queria Saber Sobre Marketing e Publicidade na Internet e Não Tinha a Quem Perguntar.* São Paulo, Brasil: Novatec Editora.

ISBN: 978-989-36481-2-4

2026
21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI) – Iberian Proceedings of CISTI 2026

Editors
Álvaro Rocha, Carlos Ferrás,
Francisco Peñalvo, Ramiro Gonçalves

This volume presents a selection of peer-reviewed papers in Portuguese and Spanish, featured at the 21st Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI'2026), held from June 17 to 20, 2026, at University of Santiago de Compostela, in Santiago de Compostela, Spain.

CISTI'2026 is a leading international forum that brings together researchers, practitioners, and industry experts to exchange the latest research findings, innovative solutions, emerging trends, professional experiences, and key challenges across various domains of information systems and technologies. The conference also emphasizes recent technological advancements and their practical applications.

The book covers essential topics such as: A) Organizational Models and Information Systems; B) Knowledge Management and Decision Support Systems; C) Software Systems, Architectures, Applications, and Tools; D) Computer Networks, Mobility, and Pervasive Systems; E) Human-Centered Computing; F) Health Informatics; G) Information Technologies in Education; and H) Architecture and Engineering of Construction.

The primary audience for this publication includes postgraduate students, researchers, and academics in Information Systems and Technologies. It also serves as an essential reference for undergraduate students and professionals in related fields.

ISBN: 978-989-36481-2-4

WEB: http://www.cisti.eu/

Copyright 2026: Information and Technology Management Association (ITMA)

INFORMATION AND TECHNOLOGY MANAGEMENT ASSOCIATION