



e-revist@s

publons

Google Scholar



REDIB

DOAJ

AmeliCA

Crossref



MIAR

ROAD



Vol. 37, N° E1 (2025)

ISSN 0257 - 1749

e - ISSN 1390 - 3659

DOI 10.37815/rte

LAS TIC Y SU IMPACTO EN LA SOCIEDAD

TRACK TÉCNICO

Ticec 2025



Guayaquil, Ecuador
Vol. 37, Núm. E1 (2025)
Octubre, 15

DOI: 10.37815/rte.v37nE1



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Autoridades Institucionales (Institutional Authorities)

Rectora

Cecilia Alexandra Paredes Verduga, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

Vicerrectora de Docencia

Paola Romero, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

Vicerrectorado de Investigación, Desarrollo e Innovación (I+D+i)

Carlos Teodoro Monsalve Arteaga, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

Consejo de Editores (Editorial Board)

Directora General Editorial (Editor in Chief)

Nayeth I. Solórzano Alcivar, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: nsolorza@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-5642-334X

Directora Ejecutiva Editorial (Executive Director Co-Editor)

Katherine Anabelle Salvador Cisneros, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: ksalvado@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0003-0414-3597

Editores Asociados (Associate Editors)

Fausto Enrique Jácome López, M.Sc.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: fjacome@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0001-6808-7294

Irma Abrigo Córdova, Ph.D.
 Universidad Nacional de Loja, Ecuador
 e-mail: irmabrigocordova2016@gmail.com
 ORCID: 0000-0002-1537-6313

Patrick Taran, Prof.
 Global Migration Policy Associates, GMPA,
 Switzerland
 e-mail: taran@globalmigrationpolicy.org
 ORCID: 0000-0002-9442-5725

Santiago Berrezueta-Guzman, Ph.D.
 Technical University of Munich - TUM, Germany
 Corporación Ecuatoriana para el Desarrollo de la
 Investigación y la Academia - CEDIA, Ecuador
 e-mail: santiago.berrezueta@cedia.org.ec
 ORCID: 0000-0001-5559-2056

Editores/as de Sección o Temático (Section Editors)

Begoña Mora Jaureguialde, Dra.
 Universidad de Huelva, España
 e-mail: bego.mora@dedu.uhu.es
 ORCID: 0000-0002-1537-6313

Cristian Díaz Álvarez, Ph.D.
 Universidad del Meta, Colombia
 e-mail: cristian.diaz@unimeta.edu.co
 ORCID: 0000-0002-4212-4947

Eduardo Jordan Pérez, Ph.D.
 Griffith University, Australia
 e-mail: e.jordanperez@griffith.edu.au
 ORCID: 0000-0001-5299-8501

Fernando Sandoya Sánchez, Ph.D.
 Universidad de Guayaquil, Ecuador
 e-mail: fernando.sandoyas@ug.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-0011-4003

Hilda Flor Paéz, M.Sc.
 EDUPROSER Cía. Ltda., Ecuador
 e-mail: hflor@espol.edu.ec
 ORCID: 0009-0002-7472-8494

Alfredo José Núñez Unda, Ph.D.
 University of Manitoba, Canada
 e-mail: nuñeza@myumanitoba.ca
 ORCID: 0000-0003-0913-5190

Marcelo Rafael Báez Meza, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: mbaez@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-8563-6985

Marco Antonio González Escudero, Dr.
 Universidad Central del Ecuador, Ecuador
 e-mail: magonzalez@uce.edu.ec
 ORCID: 0000-0003-4415-6579

Miguel Eduardo Yapur Auad, M.Sc.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: myapur@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0001-6627-7908

Miriam Maricela Checa Artos, Ph.D.
 Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador
 e-mail: mcheaca@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-9606-7896

Ramón Espinel Martínez, Ph.D.
 Centro de investigaciones rurales, CIR
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: respinel@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-4998-2063

Rosa Aurora Espinoza Toalombo, Ph.D.
 Universidad Estatal de Milagro, Ecuador
 e-mail: respinozat@unemi.edu.ec
 ORCID: 0000-0001-6527-1870

Silvana del Pilar Gamboa Benitez, Ph.D.
 Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
 e-mail: silvana.gamboa@epn.edu.ec
 ORCID: 0000-0001-5951-1970

Sylvia Novillo Villegas, Ph.D.
 Universidad de las Américas, Ecuador
 e-mail: sylvia.novillo@udla.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-7659-6846

Wellington Enrique Wonsang Ureta, BS.c.
 San Diego State University Associates in Business Accounting, Estados Unidos
 e-mail: wonsangwellington@gmail.com
 ORCID: 0000-0003-3936-9705

Editores/as de Copia - Español (Copy Editors - Spanish)

Andrea Victoria Carranza García, M.Sc.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: avcarran@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0003-1762-4525

Diana Llamel Rodríguez Arteaga, M.Sc.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: dirodrig@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-3715-181X

Laura Amelia Malache Silva, M.Sc.
 CEDIA, Ecuador
 e-mail: laura.malache@cedia.org.ec
 ORCID: 0009-0004-2846-8710

Editores/as de Copia - Inglés (Copy Editors - English)

Lidia Govea de Bustamante, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: bgovea@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-6770-1261

Maite Velez Chamaidan, Lic.
 Massachusetts Bay Community College,
 United States
 e-mail: m_velez3@massbay.edu
 ORCID: 0009-0008-8633-818X

Consejo Científico (Advisory Board)

Carlos Teodoro Monsalve Arteaga, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: monsalve@espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-9428-4360

Boris Xavier Vintimilla Burgos, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
 e-mail: bvintim@fiec.espol.edu.ec
 ORCID: 0000-0001-8904-0209

Carlos Alberto Ramos Galarza, Ph.D.
 Pontificia Universidad Católica del Ecuador
 e-mail: ps_carlosramos@hotmail.com
 ORCID: 0000-0001-5614-1994

Diana Carolina Coello Fiallos, Ph.D.
 Universidad Técnica de Ambato, Ecuador
 e-mail: dc.coello@uta.edu.ec
 ORCID: 0000-0003-3628-5004

Diego Fernando Avila Pesantez, Ph.D.
 Escuela Superior Politécnica de Chimborazo,
 Ecuador
 e-mail: davila@esepoch.edu.ec
 ORCID: 0000-0001-8394-5621

Elena María Fernández González, Ph.D.
 Universidad de Oviedo, España
 e-mail: fernandezelena@uniovi.es
 ORCID: 0000-0002-5683-0674

Elva Patricia Reyes Díaz, Ph.D.
 Universidad Autónoma de Coahuila, México
 e-mail: elva.reyes@uadec.edu.mx
 ORCID: 0000-0002-8854-0946

Ignacio Bladimir Cerón Guerra, Ph.D.
 Escuela Politécnica Nacional, Ecuador
 e-mail: ignacio.ceron@epn.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-6373-9772

Isidro Fierro Ulloa, Ph.D.
 Universidad de Especialidades Espíritu Santo,
 Ecuador
 e-mail: isfierro@uees.edu.ec
 ORCID: 0000-0002-9000-6945

José Enrique Martínez-Pérez, Ph.D.
 Instituto Universitario de Tecnología del Estado
 Bolívar, Venezuela
 e-mail: josenriquemartinez@gmail.com
 ORCID: 0000-0003-3611-639

Jorge Antonio Córdova Morán, Ph.D.
 Universidad Estatal de Milagro, Ecuador
 e-mail: joranto205@gmail.com
 ORCID: 0000-0002-2730-4755

Juan José Oliveira Maurera, Ph.D.
Universidad de Oriente, Venezuela
e-mail: juanjoseoli@hotmail.com
ORCID: 0000-0002-8474-5872

Juan Humberto Avellaneda Cevallos, Ph.D.
Universidad Técnica Estatal de Quevedo,
Ecuador
e-mail: juan_avellaneda@yahoo.com
ORCID: 0000-0002-1805-4803

Luke Houghton, Ph.D.
Griffith University, Australia
e-mail: l.houghton@griffith.edu.au
ORCID: 0000-0002-7461-6591

Manuel Raúl Peláez Samaniego, Ph.D.
Universidad de Cuenca, Ecuador
e-mail: manuel.pelaez@ucuenca.edu.ec
ORCID: 0000-0002-7618-9474

María Del Pilar Cornejo Rodríguez, Ph.D.
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
e-mail: pcornejo@espol.edu.ec
ORCID: 0000-0003-4198-2904

María Genoveva Espinoza-Santeli, Ph.D.
Universidad Andina Simón Bolívar, Ecuador
e-mail: genoveva.espinoza@uasb.edu.ec
ORCID: 0000-0002-2347-9507

Olga Kadysheva, Ph.D.
Global Migration Policy Associates, Switzerland
e-mail: okadysheva@globalmigrationpolicy.org
ORCID: 0000-0002-4810-8964

Patricia A. Boeri, Ph.D.
Universidad Nacional de Río Negro, Argentina
e-mail: pboeri@unrn.edu.ar
ORCID: 0000-0003-3262-8030

Paúl Cesar Carrión Mero, Ph.D.
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
e-mail: pcarrion@espol.edu.ec
ORCID: 0000-0002-9747-7547

Raquel Miroslava Tinoco Egas, Ph.D.
Universidad Técnica de Machala, Ecuador
e-mail: raqueltinocoegas@hotmail.com
ORCID: 0000-0001-5979-8123

Stanislaus Albert-Georg Sonnenholzner, Ph.D.
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador
e-mail: ssonnen@cenaim.espol.edu.ec
ORCID: 0000-0002-5723-3994

Consejo Internacional de Revisores del Volumen (International Reviewers Board)

Ivan Parmacli
Universidad Técnica de Munich, Alemania
e-mail: ivan.parmacli@tum.de
ORCID: 0009-0004-1575-4478

Jorge Herrera
Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí,
Ecuador
e-mail: jorge.herrera@uleam.edu.ec
ORCID: 0000-0002-8673-0236

Jorge Luis Zambrano-Martínez
Universidad del Azuay, Ecuador
e-mail: jorge.zambrano@uazuay.edu.ec
ORCID: 0000-0002-5339-7860

Kerstin Andree
Universidad Técnica de Munich, Alemania
e-mail: kerstin.andree@tum.de
ORCID: 0009-0007-6360-8661

Melissa Montalvo
Screen Point Medical, Holanda
e-mail: melissa.montalvo@screenpointmed.com
ORCID: 0000-0002-9539-3243

Nadia Damianova
Universidad Técnica de Munich, Alemania
e-mail: nadia.damianova@tum.de
ORCID: 0009-0002-6945-0870

Rommel Torres
Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador
e-mail: rovtor@utpl.edu.ec
ORCID: 0000-0003-2313-0118

Samuel Garcia
Universidad Técnica de Munich, Alemania
e-mail: samuel.garcia@tum.de
ORCID: 0009-0006-0232-8677

Vladimir Robles-Bykbaev
Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador
e-mail: vrobles@ups.edu.ec
ORCID: 0000-0002-7645-8793

Gestión de Comunicación, Publicación y Técnica

Difusión y Comunicación

Gerencia de Comunicación Social y Asuntos Públicos, ESPOL

José Arturo Maldonado Moncayo, Ing.
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

Community Manager

José Luis Castro Zambrano, M.Sc.
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

Traducciones en idioma extranjero

English

Joyce Nan, BA.
Griffith University, Australia

Portada, Diseño y Diagramación

María Paz Cordero
CEDIA, Ecuador

Rosa Angelica Cortaza Borja
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

Kleber José Avelino Mosquera
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

Informática

Contacto Soporte Técnico
Kleber José Avelino Mosquera
rte@espol.edu.ec
Escuela Superior Politécnica del Litoral, Ecuador

Indexadores / Directorios / Identificadores



Sobre la revista

Misión: Promover y difundir investigación multidisciplinaria, científica y tecnológica de calidad, impulsando el avance del conocimiento y el desarrollo de la sociedad de manera significativa.

La **Revista Tecnológica ESPOL - RTE** es una publicación digital, a la que se puede acceder de forma abierta y gratuita desde su sitio web <https://rte.espol.edu.ec>. Se encuentra registrada en varios indexadores y directorios de bases de datos y cuenta con un proceso de evaluación continua de nuevas formas de indexación que permiten dar mayor visibilidad a los artículos publicados y a sus autores.

RTE presenta llamadas programadas para envío de artículos (Call for papers) en idiomas español o inglés, garantizando la publicación periódica de un volumen semestral (junio y diciembre). Adicionalmente, cada año se pueden producir volúmenes especiales sobre una temática específica (como un Monográfico o Dossier), o Ediciones Especiales relacionadas a un evento científico o tecnológico que recoge artículos aceptados por pares ciegos y presentados en ponencias, previo a su publicación. En el caso de volúmenes especiales internacionales se puede publicar artículos en otros idiomas en acuerdo con los editores invitados siempre y cuando el título y resumen sean incluidos también en español e inglés.

En caso de artículos presentados por más de un autor, siguiendo los criterios de autoría bajo la taxonomía CRediT (<https://credit.niso.org/>), RTE expresa que la falta de declaración de las contribuciones individuales implica una participación equitativa de todos los autores.

About

Mission: To promote and disseminate high-quality multidisciplinary, scientific, and technological research, driving the advancement of knowledge and the development of society in a meaningful way.

The **Revista Tecnológica ESPOL - RTE** is a digital publication, which can be accessed freely and openly from its website <https://rte.espol.edu.ec>. It is registered in several indexers and database directories and has a continuous evaluation of new forms of indexing that give greater visibility to published articles and their authors.

RTE presents scheduled calls for article submissions (Call for papers) in Spanish or English languages, guaranteeing the bi-annual publication of one volumes per year (June and December). However, each year added volumes are produced on a specific topic (such as a Monograph or Dossier), or Special Editions related to scientific or technological events that include accepted articles revised by blind peers and presented at academic events prior publication. In the case of international special issues, articles in other languages can be published in agreement with the invited editors if the title and abstract are also included in Spanish and English.

For articles submitted by more than one author, following the authorship criteria under the CRediT taxonomy (<https://credit.niso.org/>), RTE expresses that no declaration of individual contributions implies equal participation of all authors.

Editorial (Español)

La **Revista Tecnológica ESPOL (RTE-Espol)** tiene el gusto de presentar este volumen especial dedicado a los artículos técnicos de la edición 2025 de la **Conferencia Ecuatoriana de Tecnologías de la Información y Comunicación (TICEC)**. Este evento refleja la continuidad y madurez de nuestra investigación en innovación tecnológica, consolidando a Ecuador como un referente regional y un espacio de encuentro para el intercambio de ideas y soluciones con proyección internacional. Celebrado en la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE en Sangolquí, del 16 al 17 de octubre de 2025, TICEC 2025 se distingue por abordar una amplia variedad de temas que miran al presente y al futuro del desarrollo tecnológico.

Este volumen especial cubre áreas clave de la transformación digital y la infraestructura crítica. En *Infraestructura industrial y energía*, se presentan soluciones para la integración y la resiliencia de sistemas: el desarrollo de un convertidor de protocolo de SMA Data a Modbus TCP que facilita la interoperabilidad con plataformas SCADA; un estudio de mejora de la disponibilidad en un sistema SCADA aplicado a la microrred de la Universidad de Cuenca; y un trabajo de predicción con IA para optimizar la fragmentación de roca por voladura en minería a cielo abierto. Estas contribuciones muestran cómo la analítica avanzada y la ingeniería de sistemas impactan en la productividad, la seguridad y la eficiencia energética.

En *Visión por Computador, multimedia y monitoreo ambiental/seguridad*, los artículos exploran desde fundamentos hasta aplicaciones de alto impacto social. Se evalúan y comparan métricas objetivas de calidad de video (PSNR, SSIM y LPIPS), aportando criterios rigurosos para la evaluación multimedia. La digitalización inmersiva del Bosque Murocomba con técnicas de procesamiento de imágenes abre oportunidades para conservación y turismo científico. Asimismo, un sistema de detección y alerta de incendios forestales basado en imágenes e IA. Complementariamente, el modelado semántico de emergencias del ECU 911 mediante NLP y ontologías fortalece la gestión del conocimiento y la toma de decisiones en contextos críticos.

La sección de *Analítica educativa y transformación institucional* evidencia el papel de la tecnología en la mejora de procesos académicos. Se presenta un sistema recomendado para la asignación de profesores universitarios, orientado a una distribución más eficaz del talento docente. Otra contribución propone una metodología para identificar buenas prácticas docentes a partir de comentarios estudiantiles utilizando análisis de sentimientos y modelado temático, ofreciendo una vía sistemática para mejora continua. Finalmente, una aplicación basada en blockchain para una universidad sostenible integra una revisión sistemática y la propuesta UCE-camp para modernizar y transparentar procesos académicos en la educación superior.

El volumen especial TICEC 2025 reafirma el compromiso de la comunidad científica y profesional con el avance tecnológico y su aporte de soluciones, gracias al valioso trabajo de autores, revisores, expositores y participantes. Esta edición se proyecta como una referencia para quienes investigan, crean y aplican innovaciones en el dinámico campo de las tecnologías de la información y la comunicación.

Nayeth Solórzano Alcívar, PhD.
Directora General Editorial
Revista Tecnológica ESPOL – RTE

Santiago Berrezueta, Ph.D.
Editor Asociado
Revista Tecnológica ESPOL – RTE

Katherine Salvador Cisneros, PhD.
Directora Ejecutiva Editorial
Revista Tecnológica ESPOL – RTE

Laura Malache Silva, M.Sc.
Editor en Jefe
CEDIA

Editorial (English)

The **Revista Tecnológica ESPOL (RTE-Espol)** is pleased to present this special volume dedicated to the technical articles from the 2025 edition of the **Ecuadorian Conference on Information and Communication Technologies (TICEC)**. This event reflects the continuity and maturity of our research in technological innovation, consolidating Ecuador as a regional benchmark and a meeting space for the exchange of ideas and solutions with international projection. Held at the Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE in Sangolquí from October 16 to 17, 2025, TICEC 2025 stands out for addressing a wide range of topics that look toward both the present and the future of technological development.

This issue covers key areas of digital transformation and critical infrastructure. In *Industrial Infrastructure and Energy*, it presents solutions for system integration and resilience: the development of a protocol converter from SMA Data to Modbus TCP that facilitates interoperability with SCADA platforms; a study on improving availability in a SCADA system applied to the University of Cuenca microgrid; and a machine learning approach to optimize rock fragmentation by blasting in open-pit mining. These contributions show how advanced analytics and systems engineering impact productivity, safety, and energy efficiency.

In *Computer Vision, Multimedia, and Environmental/Safety Monitoring*, the articles range from foundational work to applications with high social impact. Objective video quality metrics (PSNR, SSIM, and LPIPS) are evaluated and compared, providing rigorous criteria for multimedia assessment. The immersive digitization of the Murocomba Forest using image processing techniques opens opportunities for conservation and scientific tourism. Likewise, a forest-fire detection and alert system based on imaging and AI is presented. Complementing these efforts, the semantic modeling of ECU 911 emergencies using NLP and ontologies strengthens knowledge management and decision-making in critical contexts.

The *Educational Analytics and Institutional Transformation* section highlights the role of technology in improving academic processes. It includes a recommender system for assigning university instructors, aimed at a more effective distribution of teaching talent. Another contribution proposes a methodology to identify good teaching practices from student comments using sentiment analysis and topic modeling, offering a systematic path to continuous improvement. Finally, a blockchain-based application for a sustainable university combines a systematic review with the UCE-camp proposal to modernize and bring transparency to academic processes in higher education.

The TICEC 2025 special volume reaffirms the commitment of the scientific and professional community to technological advancement and the development of solutions, thanks to the valuable contributions of authors, reviewers, presenters, and participants. This edition is envisioned as a reference for those who research, design, and apply innovations in the dynamic field of information and communication technologies.

Nayeth Solórzano Alcívar, PhD.
Editor in Chief
Revista Tecnológica ESPOL – RTE

Santiago Berrezueta, Ph.D.
Associate Editor
Revista Tecnológica ESPOL – RTE

Katherine Salvador Cisneros, PhD.
Executive Director Co-Editor
Revista Tecnológica ESPOL – RTE

Laura Malache Silva, M.Sc.
Editor in Chief
CEDIA

Índice / Index

Infraestructura industrial y energía / Industrial infrastructure and energy

- 12 *Development of a Protocol Converter from SMA Data to Modbus TCP for SCADA Integration / Desarrollo de un Convertidor de Protocolo de SMA Data a Modbus TCP para la Integración SCADA*
- 25 *Enhancing SCADA System Availability: A Case Study of Microgrid Universidad de Cuenca / Mejora de la Disponibilidad del Sistema SCADA: Caso de Estudio Microrred de la Universidad de Cuenca*
- 38 *Fragmentación de Roca por Voladura en Minería a Cielo Abierto: Predicción con IA / Rock Fragmentation by Blasting in Open-Pit Mining: an AI Predictive Model*

Visión por computador, multimedia y monitoreo ambiental/seguridad / Computer vision, multimedia, and environmental/security monitoring

- 56 *Evaluación y Comparación de Métricas Objetivas PSNR, SSIM y LPIPS para el Análisis de Calidad de Video / Evaluation and Comparison of Objective Metrics PSNR, SSIM, and LPIPS for Video Quality Analysis– y viceversa*
- 77 *Digitalización inmersiva del Bosque Murocomba con técnicas de procesamiento de imágenes / Immersive digitization of the Murocomba Forest using image processing techniques*
- 88 *Sistema de Detección y Alerta de Incendios Forestales Basado en Procesamiento de Imágenes e IA / Forest Fire Detection and Alert System Based on Image Processing and IA*
- 112 *Modelado Semántico de Emergencias del ECU 911 con NLP y Ontologías / Semantic Modeling of ECU911 Emergencies Using NLP and Ontologies*

Analítica educativa y transformación institucional / Educational analytics and institutional transformation

- 127 *Sistema Recomendador para la Asignación de Profesores en la Universidad de Cuenca / Recommender System for the Assignment of Professors at the University of Cuenca*
- 146 *Metodología para la Identificación de Buenas Prácticas Docentes a Partir de Comentarios Estudiantiles Utilizando Análisis de Sentimientos y Modelado Temático / Methodology for Identifying Good Teaching Practices Through Student Comments Using Sentiment Analysis and Structural Topic Modeling*
- 156 *Blockchain-based Application for a Sustainable University: Systematic Review and UCE-Camp Proposal for the Academic Processes of Higher Education Institutions / Aplicación basada en Blockchain para una Universidad Sostenible: Revisión Sistemática y Propuesta UCE-Camp para los Procesos Académicos de Educación Superior*

Ticec²⁰²⁵

Infraestructura industrial y energía

Industrial infrastructure and energy

Development of a Protocol Converter from SMA Data to Modbus TCP for SCADA Integration

Desarrollo de un Convertidor de Protocolo de SMA Data a Modbus TCP para la Integración SCADA

Santiago Ismael Araujo Ochoa¹ <https://orcid.org/0009-0006-8903-4849>, Joe Fernando Tigre Quituizaca¹ <https://orcid.org/0009-0001-2301-9922>, Juan Diego Belesaca¹ <https://orcid.org/0000-0001-8609-0358>, Fabian Astudillo-Salinas¹ <https://orcid.org/0000-0001-7644-0270>

¹Universidad de Cuenca, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Cuenca, Ecuador

santiago.araujo@ucuenca.edu.ec, fernando.tigre@ucuenca.edu.ec, juan.belesaca@ucuenca.edu.ec, fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Sent: 2025/06/29

Accepted: 2025/08/24

Published: 2025/10/15

Abstract

The integration of distributed energy resources into smart microgrids frequently necessitates seamless communication between heterogeneous devices and centralized supervisory systems. However, specific power electronics equipment, such as the SMA Sunny Island inverter, relies on proprietary communication protocols that are incompatible with standard SCADA interfaces. The present work delineates the design and implementation of a protocol converter that facilitates transparent translation between SMA Data and Modbus TCP, thereby enabling native integration of the Sunny Island inverter into Modbus-based SCADA environments. The proposed converter was developed using a Raspberry Pi platform and employs a modular architecture that combines the YASDI communication library with a custom Python-based Modbus TCP server. The system retrieves operational data from the inverter, maps it to Modbus input registers, and allows configuration commands to be issued from the SCADA system and applied to the inverter in a controlled manner. The experimental validation was carried out in the Microgrid Laboratory at the University of Cuenca. In this setting, the converter demonstrated reliable performance in two specific tasks: data acquisition and parameter configuration. The response times exhibited a range of 10 to 30 seconds, contingent upon the system's state. Following power cycles and communication interruptions, the converter demonstrated complete recovery capability. The

Summary: Introduction, Materials and Methods, Results and Discussion, Conclusions and Future Work.

How to cite: Araujo, S., Tigre, J., Belesaca, J. D. & Astudillo-Salinas, F. (2025). Development of a Protocol Converter from SMA Data to Modbus TCP for SCADA Integration. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 12-24. <https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1360>

findings substantiate the viability of the proposed method as a cost-effective and resilient solution for integrating proprietary energy devices with industrial monitoring platforms. Its flexibility and resilience render it suitable for broader deployment in smart grid infrastructures and distributed energy management systems.

Keywords: microgrid, inverter, Modbus, SMA data, gateway, converter.

Resumen

La integración de recursos energéticos distribuidos en microrredes inteligentes suele requerir una comunicación fluida entre dispositivos heterogéneos y sistemas de supervisión centralizados. Sin embargo, ciertos equipos de electrónica de potencia, como el inversor SMA Sunny Island, dependen de protocolos de comunicación propietarios que son incompatibles con las interfaces SCADA estándar. El presente trabajo describe el diseño y la implementación de un convertidor de protocolos que facilita la traducción transparente entre SMA Data y Modbus TCP, lo que permite la integración nativa del inversor Sunny Island en entornos SCADA basados en Modbus. El convertidor propuesto se desarrolló utilizando una plataforma Raspberry Pi y emplea una arquitectura modular que combina la biblioteca de comunicación YASDI con un servidor Modbus TCP personalizado basado en Python. El sistema recupera los datos operativos del inversor, los asigna a los registros de entrada Modbus y permite que los comandos de configuración se emitan desde el sistema SCADA y se apliquen al inversor de forma controlada. La validación experimental se llevó a cabo en el Laboratorio de Microrredes de la Universidad de Cuenca. En este entorno, el convertidor demostró un rendimiento fiable en dos tareas específicas: la adquisición de datos y la configuración de parámetros. Los tiempos de respuesta oscilaron entre 10 y 30 segundos, dependiendo del estado del sistema. Tras ciclos de alimentación e interrupciones de la comunicación, el convertidor demostró una capacidad de recuperación completa. Los resultados corroboran la viabilidad del método propuesto como solución rentable y resistente para integrar dispositivos energéticos patentados con plataformas de monitorización industrial. Su flexibilidad y resistencia lo hacen adecuado para un despliegue más amplio en infraestructuras de redes inteligentes y sistemas de gestión de energía distribuida.

Palabras clave: microrred, inversor, Modbus, SMA data, puerta de enlace, convertidor.

Introduction

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems play a crucial role in managing distributed energy resources within modern microgrids. These systems facilitate centralized control, real-time monitoring, and historical data visualization across a diverse array of distributed energy resources (DERs), including smart inverters, energy meters, and storage systems (Li et al., 2017). Typically, communication between these devices and the SCADA system relies on standardized industrial protocols, such as Modbus TCP/IP, which provide a uniform and robust framework for interoperability (Kermani et al., 2021). However, a significant number of commercially available inverters continue to operate using proprietary communication protocols, thereby limiting their direct integration into open SCADA platforms.

The University of Cuenca's microgrid laboratory has installed several pieces of energy generation and management equipment (Espinoza et al., 2017), including the Sunny Island inverter (SMA, 2015). One of the most significant challenges is integrating of the SMA Sunny Island inverter family, which utilizes the proprietary SMA Data protocol for communication with SCADA systems that use the Modbus protocol. Unlike Modbus, the SMA Data protocol is not

openly documented and lacks native compatibility with SCADA environments. It requires the use of intermediate solutions to bridge the protocol gap. Several studies have examined protocol conversion in the context of industrial automation and smart grids. For instance, Suryani et al. (2024) reviewed Interoperability in Microgrids, emphasizing the complexity of translating proprietary formats into open standards. Most efforts to convert protocols in the literature focus on bridging open but heterogeneous interfaces, such as Modbus RTU, MQTT, and IEC 61850, rather than undocumented, proprietary formats. For example, Si et al. 2021 describe middleware that translates Modbus RTU into MQTT to enable cloud compatibility in smart microgrids. Similarly, Hemmati et al. (2021) evaluated the interoperability of the IEC 61850 protocol in hardware-in-the-loop microgrid testbeds, highlighting the need for translating between heterogeneous communication standards.

Despite these advances, a lack of documented, low-cost, and field-tested methods remains for converting SMA Data to Modbus TCP/IP in microgrids. Most existing solutions are commercial black boxes or require deep customization at the firmware level, which complicates reproducibility and academic validation. The absence of standardized translation strategies hinders the effective integration of inverters and data acquisition in research environments focused on energy transition and intelligent grid control.

The following article presents the design, implementation, and laboratory validation of a protocol conversion system that bridges the proprietary SMA Data protocol and the Modbus TCP/IP protocol. The conversion architecture is developed using low-cost embedded hardware and custom software, deployed in the Microgrid Laboratory at the University of Cuenca. The system intercepts SMA Data communications from Sunny Island inverters and translates these into standardized Modbus register formats compatible with existing SCADA infrastructure. The converter facilitates seamless integration with SCADA systems without the need to modify inverter firmware or use proprietary SMA modules. It is achieved through the implementation of real-time parsing, data mapping, and Modbus frame construction. The experimental results demonstrate the successful recovery of real-time measurements (e.g., voltage, current, power) through Modbus polling, thereby substantiating the interoperability and usability in both grid-connected and islanded operational modes.

This contribution addresses a significant gap in the extant literature by providing a documented, replicable, and cost-effective solution for integrating legacy SMA Sunny Island inverters, especially those without native Modbus support, into open SCADA platforms. The approach is scalable and adaptable to other proprietary protocols aligning with modern microgrid research demands for reproducible and standardized data acquisition. Finally, the remainder of this manuscript is organized as follows: The second section delineates the materials and the experimental methodology that were utilized in the construction and evaluation of the protocol converter. In Section 3, the results of the converter's validation are presented, including performance metrics and interoperability tests. Section 4 discusses the implications of this work and outlines potential paths for future enhancements.

Materials and Methods

This section outlines the experimental configuration and methodological framework used to design, implement, and validate the converter tool that translates the SMA Data protocol into Modbus TCP/IP. First, the physical and network environment of the Microgrid Laboratory is described, with a focus on the Sunny Island inverter and the existing SCADA infrastructure. In the following section, an exposition of the hardware and software architecture of the conversion system is provided.

Experimental Setup

The protocol converter under consideration was developed and validated within the Microgrid Laboratory of the University of Cuenca, an academic facility with a focus on research and development in distributed energy systems. The laboratory is equipped with a hybrid energy configuration, comprising photovoltaic generation, an Ampere Square S inverter, an SMA Sunny Island inverter, and a diesel-based backup system (Gutiérrez Otavalo & Padilla Guamán, 2024). These components are interconnected through a fiber-optic ring that links multiple operational devices with a centralized SCADA platform.

The SCADA system is responsible for acquiring and displaying real-time measurements of electrical parameters, as well as storing historical data and triggering event-based alarms. The primary means of establishing communication between the SCADA server and field devices is through the use of Modbus TCP/IP. Devices such as smart meters and Programmable Logic Controllers (PLCs) are natively compatible with this protocol. However, some aspects within the microgrid, notably the SMA Sunny Island inverter, operate using proprietary communication standards. In this case, the SMA Data protocol is transmitted via the Speedwire interface. This absence of protocol compatibility poses a substantial integration challenge, as it hinders the direct acquisition of inverter data by the SCADA system.

This environment provides a realistic and operationally demanding testbed for evaluating the performance of the developed protocol converter. The integration of the converter into the existing communication infrastructure facilitates the assessment of its capacity to extract pertinent data from the SMA inverter, as well as its interoperability within a live SCADA-monitored microgrid environment.

Communication Context and Integration Challenge

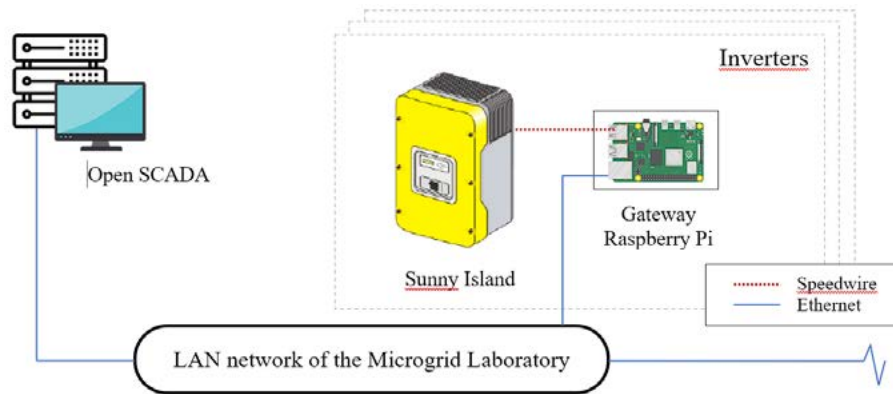
The integration of DERs into modern microgrids is contingent upon the standardization and interoperability of communication protocols. SCADA systems are designed to aggregate and manage data from heterogeneous sources using open communication protocols. Among these protocols, Modbus TCP/IP has been adopted most widely in industrial and academic applications. This protocol enables the SCADA system to query specific data registers on remote devices, facilitating real-time monitoring, historical logging, and event management.

In the case of the Microgrid Laboratory at the University of Cuenca, most field devices, including power meters and PLCs, are inherently compatible with Modbus TCP. However, specific equipment, such as the SMA Sunny Island inverter, is not compatible. This inverter employs the SMA Data protocol, a proprietary communication standard developed by SMA. The protocol is transmitted via Ethernet through the Speedwire interface. In contrast to Modbus, the SMA Data protocol does not disclose public register maps or function codes that a standard SCADA system can directly interpret. Consequently, this absence of interoperability hinders the SCADA from accessing inverter parameters, such as voltage, frequency, state of charge, and power output. These parameters are indispensable for effective monitoring and control functions within a microgrid environment.

To address this limitation, a gateway device was introduced as an intermediary between the inverter and the microgrid's local area network. This gateway is deployed on a Raspberry Pi 3 and captures the proprietary SMA Data frames, processes them, and responds to Modbus TCP requests issued by the SCADA server. In this manner, the gateway effectively emulates a Modbus-compatible device, thereby enabling the SCADA system to retrieve inverter data as if it were communicating with any other standard field unit. This approach obviates the necessity for invasive hardware modifications or firmware alterations on the inverter itself.

The communication topology resulting from this integration is illustrated in Figure 1, which delineates the physical connections between the SMA Sunny Island inverter, the gateway, and the SCADA network. As illustrated, the gateway plays a pivotal role in facilitating bidirectional information exchange between a closed, proprietary device and an open monitoring architecture.

Figure 1
Simplified communication topology



Converter Deployment and Functional Overview

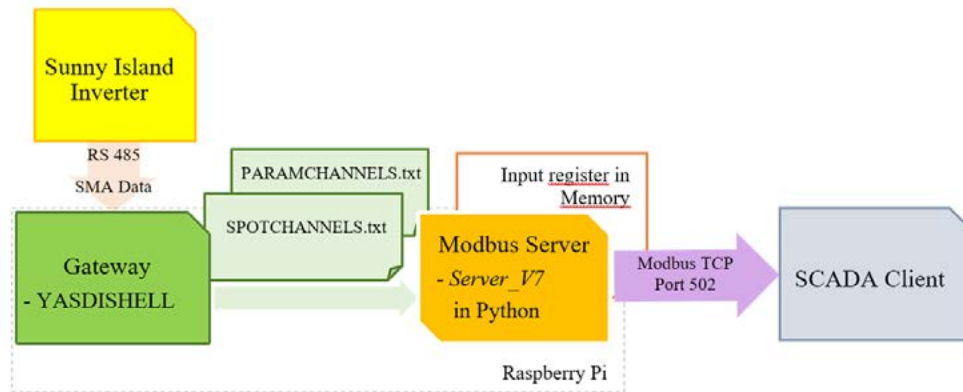
Two primary roles characterize the converter's functionality. Initially, it establishes and maintains communication with the inverter through the SMA Data protocol over a Speedwire. Subsequently, it exposes operational data from the inverter as Modbus TCP registers, thereby making it accessible to the SCADA system as if the inverter were a native Modbus agent device.

The sequence of events starts when the converter makes a request for and subsequently obtains real-time operational data from the inverter. It is facilitated by the utilization of the YASDISHELL program and the YASDI libraries (Eckhard M; Pknowledge). These data include critical parameters such as input/output voltage, current, power, battery state of charge, and device status. Each data point is stored temporarily in intermediary files (SPOTCHANNELS.txt and PARAMCHANNELS.txt) on the Raspberry Pi.

Subsequently, a Modbus TCP server implemented in Python (named Server_V7) reads these intermediary files and maps the extracted values into input registers. This mapping adheres to Modbus conventions, thereby ensuring compatibility with standard SCADA clients. The server maintains these registers in memory and updates them continuously as new data arrives. Furthermore, the server facilitates TCP socket communication to receive write requests from the SCADA system and, when authorized, directs these requests to the inverter via an additional shared file (SetInformation.txt), thereby serving as a control interface. The complete development of the SMA Data to Modbus TCP/IP protocol converter is available in the repository <https://github.com/fabianastudillo/microred-sunnyisland-ampere.git>.

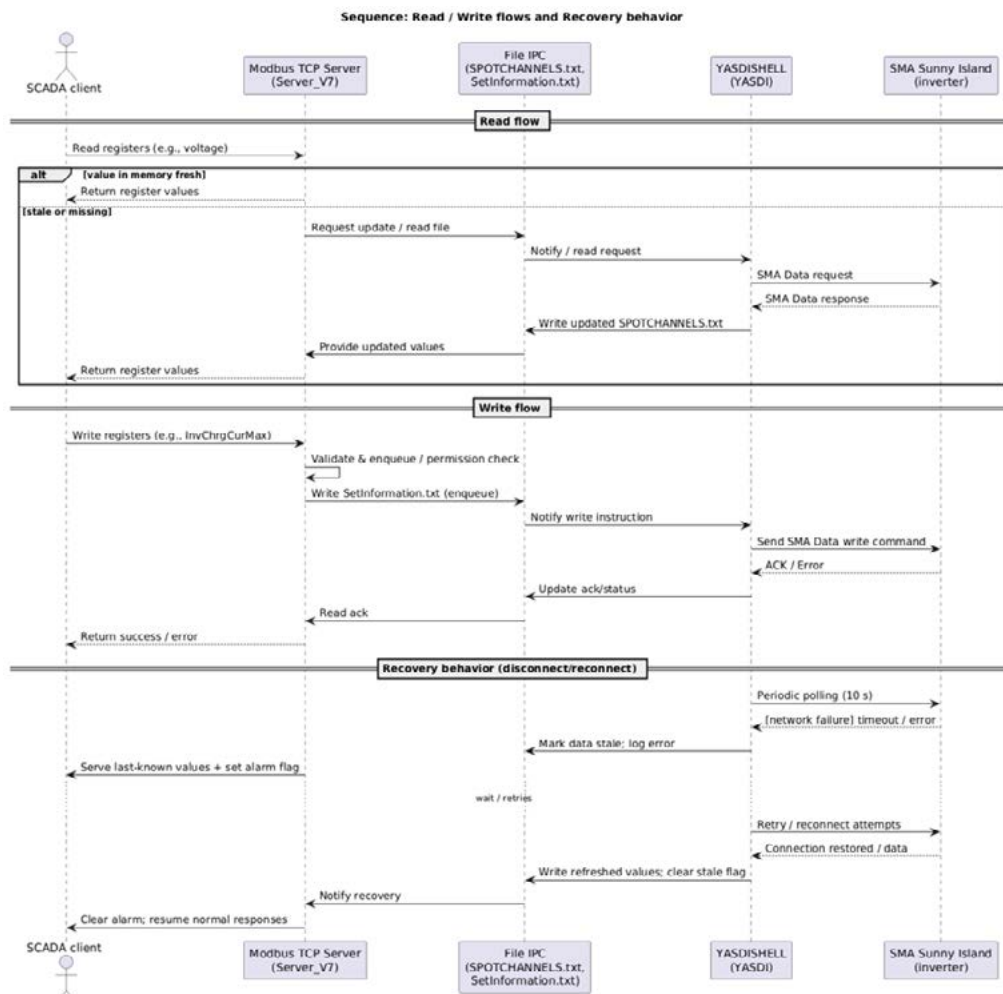
Figure 2 provides a detailed schematic of the data transformation pipeline managed by the converter. The figure illustrates the process of retrieving the inverter's data through the SMA Data protocol. The YASDISHELL application parses the protocol, and the data is stored temporarily in structured text files. The data is subsequently mapped to Modbus TCP input registers. These registers undergo continuous updates and are transmitted to the SCADA client via a standard TCP/IP Modbus interface. This modular pipeline facilitates decoupled data handling and ensures compatibility between heterogeneous communication standards.

Figure 2
Data flow pipeline from SMA inverter to SCADA via converter



As illustrated in Figure 3, the sequence diagram delineates the standard read and write operations between the SCADA client and the SMA Sunny Island inverter via the Raspberry Pi gateway. The diagram also illustrates the recovery behavior during a temporary communication outage. The diagram under consideration highlights the role of the file-based IPC (SPOTCHANNELS.txt / SetInformation.txt) and the YASDI bridge in facilitating of SMA data conversions.

Figure 3
Sequence diagram for read/write and recovery interactions



Experimental Procedure

The validation of the converter was conducted under controlled conditions within the Microgrid Laboratory at the University of Cuenca. The objective of this procedure was to demonstrate that the implemented converter facilitated reliable and transparent communication between the SCADA system and the Sunny Island inverter, which natively employs the proprietary SMA Data protocol.

The validation process was initiated by powering on the system and observing the automatic initialization of the services embedded in the Raspberry Pi. These services included the YASDISHELL application for communication with the inverter and the Modbus TCP server. After initialization, the SCADA client endeavored to establish a Modbus TCP connection. Upon successful connection, the system initiated a polling cycle of the Modbus registers exposed by the converter to retrieve inverter data.

The primary variables that were monitored during the experimental phase included inverter output voltage and current, battery voltage and state of charge, instantaneous power, and internal device temperature. The selection of these parameters was informed by their demonstrated relevance in operational monitoring and safety assessment in isolated or hybrid microgrid environments.

To assess the writing capabilities of the system, specific parameters were modified from the SCADA interface. These parameters included the maximum charge current and the minimum battery temperature required for restart. Subsequently, the updated values were verified against the inverter's internal status indicators to ascertain the correct implementation of the alterations. This process necessitated meticulous timing, as the system's architecture incorporates a minor delay due to its polling-based data acquisition loop and asynchronous file-based inter-process communication.

To assess system robustness, the physical connection between the inverter and the Raspberry Pi was intentionally interrupted and then reestablished. During the disruption, the behavior of the converter was meticulously monitored. It was determined that the system had the capacity to recover communication without the need for manual intervention on its own. This resilience is imperative for real-world deployments, where intermittent connectivity or power fluctuations are to be expected.

Results and Discussion

This section presents the experimental results obtained during the deployment and validation of the communication converter developed to interface the SMA Sunny Island inverter with a Modbus TCP-based SCADA system. The evaluation concentrated on system initialization behavior, real-time data acquisition, parameter writing functionality, temporal performance, and robustness under connection interruptions. The findings substantiate the operational viability and reliability of the converter within a laboratory-scale microgrid environment.

System Initialization and Service Execution

The initialization of the converter system is a critical factor in ensuring continuous and autonomous operation within the SCADA-integrated microgrid. To evaluate this aspect, the Raspberry Pi device hosting the converter services was powered on under standard laboratory conditions. The startup process was then observed in terms of duration and service activation.

The total startup time required for the Raspberry Pi to fully boot and launch the two key services: the YASDISHELL application and the Modbus TCP server. This process was approximately three minutes. The duration encompasses the loading of the operating system and all requisite network and USB subsystems, which are indispensable for serial communication with the inverter and TCP communication with the SCADA client.

After the initialization of both services, it was ascertained that they were operating in an active state. This verified the successful deployment of the services as background processes utilizing system-level service management. This automatic startup behavior is essential to guarantee system availability without requiring manual intervention after power interruptions or planned maintenance. As illustrated in Figures 4a and 4b, the confirmation messages verify the successful activation of both services, thereby facilitating seamless communication with the Sunny Island inverter and ensuring immediate availability for Modbus TCP connections.

This automated service configuration has been demonstrated to have a substantial impact on enhancing system resilience. In the event of an unexpected power cycle or network disruption, the converter automatically restores its full functionality, ensuring minimal downtime and continuous data acquisition for the SCADA platform.

Figure 4
Active status of services

a) YASDISHELL application (inversor)

```
rpi@raspberrypi:~$ sudo systemctl status ComServidor.service
● ComServidor.service - Modbus Server
   Loaded: loaded (/etc/systemd/system/ComServidor.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Tue 2023-06-13 13:40:27 -05; 12min ago
     Main PID: 339 (python3)
        Tasks: 4 (limit: 415)
           CPU: 15.621s
      CGroup: /system.slice/ComServidor.service
             └─339 /usr/bin/python3 /home/rpi/Documents/Modbus/Server_V7.py

jun 13 13:40:27 raspberrypi systemd[1]: Started Modbus Server.
rpi@raspberrypi:~$
```

b) Modbus TCP server.

```
rpi@raspberrypi:~$ sudo systemctl status ComInversor.service
● ComInversor.service - Daemon inverter communication
   Loaded: loaded (/etc/systemd/system/ComInversor.service; enabled; vendor preset: enabled)
   Active: active (running) since Tue 2023-06-13 13:42:29 -05; 9min ago
     Process: 337 ExecStartPre=/bin/sleep 40 (code=exited, status=0/SUCCESS)
    Main PID: 650 (yasdishell)
        Tasks: 2 (limit: 415)
           CPU: 9.720s
      CGroup: /system.slice/ComInversor.service
             └─650 /home/rpi/Documents/libyasdi/projects/generic-cmake/build-gcc/yasdishell

jun 13 13:40:27 raspberrypi systemd[1]: Starting Daemon inverter communication...
jun 13 13:42:29 raspberrypi systemd[1]: Started Daemon inverter communication.
rpi@raspberrypi:~$
```

Data Acquisition and SCADA Visualization

After the converter's full operational capacity and the Modbus TCP server's activation, the SCADA system successfully established a connection and initiated data polling from the Sunny Island inverter. The graphical interface, developed in LabVIEW, displayed real-time measurements retrieved via the converter, confirming that the protocol translation from SMA Data to Modbus was functioning as intended.

The SCADA dashboard exhibited grouped data according to relevant categories, including inverter status, battery information, power flow, and external grid parameters. These values were updated at ten-second intervals, and no communication failures were detected during

the observation periods. As illustrated in Figure 5, the monitoring interface displays real-time operational data in a clear and intuitive manner.

The inverter output voltage and current, battery voltage and State of Charge (SOC), system frequency, and instantaneous power were identified as the key variables to be monitored. A direct comparison was made between these values and the physical display on the inverter, revealing complete agreement in terms of numerical consistency. For instance, the battery system's overall health, measured in percentage (SOC) at 76%, and the auto-start counter, which registered at 3, were both displayed on both the inverter panel and the SCADA interface. These values served to substantiate the efficacy of the data mapping process that was executed by the converter.

Figure 5

Monitoring interface for the Sunny Island inverter (the Spanish language is in accordance with the native language of the microgrid operators). Note: the figure reproduces the actual operator HMI used by the microgrid staff (Spanish-language interface)



The ability to seamlessly visualize inverter data within the SCADA environment, without the need for proprietary SMA software, demonstrates the efficacy of the protocol conversion approach and its suitability for integration into more extensive monitoring infrastructures.

Parameter Configuration from SCADA

Beyond data acquisition, the converter was also evaluated for its ability to enable parameter configuration of the Sunny Island inverter directly from the SCADA system. This functionality is essential for supervisory control environments, where remote reconfiguration is often necessary to adapt to changing operational conditions or user-defined profiles.

The SCADA interface incorporated a configuration menu that enabled users to view and, when authorized, modify inverter parameters. The interface is presented in Figure 6, which illustrates various editable parameters, including maximum charge current (InvChrgCurMax), battery restart temperature (BatTmpStr), nominal grid current (GdCurNom), and generator auto-start count (GnAutoStr). These values were dynamically read from the Modbus Input Registers maintained in the converter's memory and reflected any changes made at the source device level.

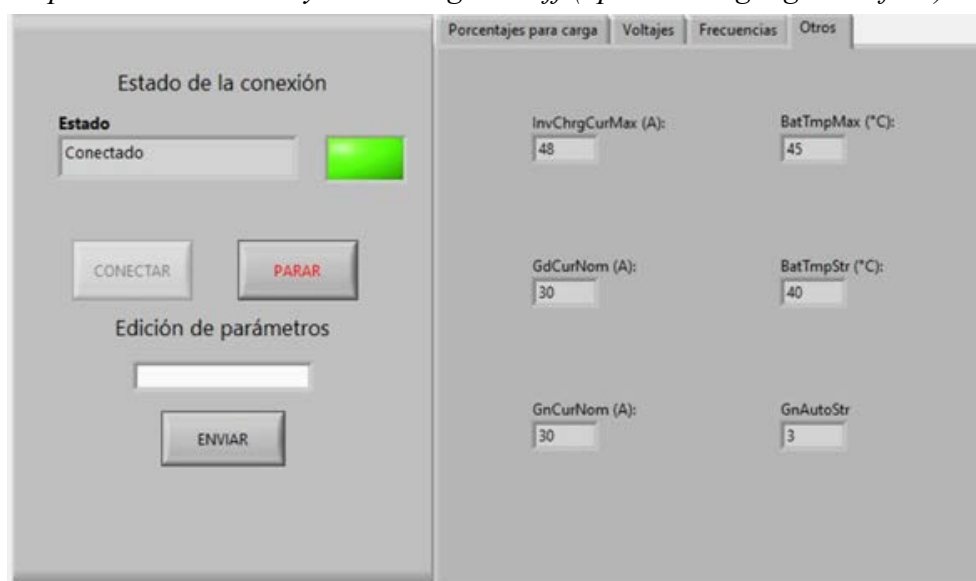
The writing process involved the issuance of a command from the SCADA interface, which was subsequently captured by the converter's Modbus TCP server. Subsequently, the server transferred the write instruction into a shared file, which was monitored by the YASDISHELL

application. Upon detecting a pending instruction, YASDISHELL parsed and applied the new value using the appropriate command structure of the SMA Data protocol. Subsequently, the inverter processed the change and updated its internal state.

The efficacy of this configuration pathway was validated by writing test values into the parameters and subsequently verifying their application through both the SCADA interface and the inverter's onboard display. The round-trip time—defined as the interval between the issuance of a SCADA command and the confirmation of its value—exhibited variability depending on the system's execution phase. If the converter was in a state of idleness, anticipating instruction, the alteration was manifested within a time span of approximately 10 to 15 seconds. If the system was executing a read cycle at the time that the write request was issued, the response time increased to between 15 and 30 seconds due to polling synchronization delays.

Figure 6

Configuration interface for the Sunny Island inverter. Note: the figure reproduces the actual operator HMI used by the microgrid staff (Spanish-language interface).



This performance reflects the polling-based nature of the converter's architecture, where read and write operations are decoupled and synchronized through shared files and conditional execution. Despite this non-real-time behavior, the delays observed are acceptable for the intended application, where operational parameters evolve on the order of seconds or minutes, rather than milliseconds.

Despite these timing variations, the configuration mechanism proved to be consistent and reliable, enabling remote parameter updates without interrupting the SCADA monitoring process. The converter's dual read/write capability signifies its robustness and its potential for full bidirectional integration within intelligent microgrid management platforms.

Resilience and Recovery Behavior

The reliability of a communication converter in a SCADA-integrated microgrid is determined by more than just its steady-state performance; its ability to recover from disruptions such as power loss, network disconnection, or interface instability is also a critical factor. To assess this dimension, a series of tests was conducted. In these tests, the connection between the Raspberry Pi gateway and the inverter was deliberately interrupted and later re-established under different operational conditions.

In scenarios involving temporary physical disconnection of the Speedwire interface or loss of Modbus TCP communication, the system demonstrated self-recovery behavior. After the restoration of the connection, the YASDISHELL process resumed data polling, and the Modbus server continued to expose the updated values to the SCADA client. During these transitions, no service crashes or data corruption events were observed. The experimental procedure was executed in the Microgrid Laboratory of the Universidad de Cuenca, employing a Sunny Island inverter and a controlled battery bank. Tests were performed in normal operating mode, with short-duration runs (5 minutes) and modest load variations to verify communication stability and read/write functionality of the gateway. The conditions under which the work was conducted provided sufficient evidence of feasibility. A concise summary of the system's observed performance (based on 10 runs) is provided in Table 1.

Table 1
Summary of observed performance (laboratory testbed)

METRIC	OBSERVED VALUE (LAB)	MEASUREMENT NOTES
Boot time (Raspberry Pi + services)	4 minutes (± 1 minute)	Time from power-on to YASDISHELL + Modbus server active
Write / round-trip (SCADA $\rightarrow$ converter $\rightarrow$ inverter $\rightarrow$ confirmation)	10 seconds (± 5 seconds)	Depends on converter state (idle vs during active read cycle)
Polling interval (configured)	10 seconds	SCADA dashboard updated every 10 s in experiments

Furthermore, the file-based interprocess communication approach utilized by the converter contributed to its fault tolerance. Intermediate data and command buffers were preserved in temporary storage, allowing the system to resume its data flow from the last valid state without requiring complete reinitialization or reconfiguration.

This resilience serves to substantiate the converter's aptitude for incorporation into critical monitoring environments, where communication disruptions are a recurring phenomenon. The ability of microgrids to recover autonomously and continue operating without human intervention is essential for minimizing downtime and ensuring continuous visibility into microgrid performance.

Limitations

The primary constraints of this study pertain to the scope of evaluation and the nature of the prototype. The experimental design involved conducting tests within a single laboratory setting, eliminating the need of extensive campaigns across multiple sites or under high operational load conditions. This methodological approach, characterized by its restriction to a single laboratory environment, naturally imposes limitations on the extent to which the obtained performance results can be extrapolated to other contexts. The present architecture relies on file-based interprocess communication and polling, which introduces additional latency and may not scale efficiently. While the reported response times are adequate for monitoring and configuration, they are not suitable for real-time control applications. However, significant concerns remain regarding the security aspects of the system, particularly about authentication, encryption, and functional safety mechanisms. Additionally, the system does not currently incorporate transactional guarantees for write operations, which is a fundamental aspect of ensuring data integrity and reliability. Furthermore, scalability tests and long-duration experiments, including those involving fault injection or stress conditions, were not conducted.

Additionally, dependence on the proprietary SMA Data protocol restricts portability and may pose compatibility risks. A notable limitation of the study is the absence of a direct comparison with commercial gateway solutions. Such a comparison would have facilitated a more comprehensive contextualization of the study's findings, particularly about the approach's strengths and weaknesses. These limitations are consistent with the exploratory nature of this thesis and define the next steps required for a production-ready deployment.

Conclusions and Future Work

This work demonstrates the successful implementation of a communication converter that enables protocol translation between SMA Data and Modbus TCP, allowing for the seamless integration of the SMA Sunny Island inverter into a Modbus-based SCADA environment. The solution, implemented on a Raspberry Pi, effectively addresses the discrepancy between proprietary inverter communication protocols and standard industrial interfaces utilized in supervisory systems.

Through experimental validation, the converter demonstrated its capacity to reliably retrieve real-time operational parameters from the inverter and expose them to the SCADA platform using conventional Modbus input registers. Additionally, the system enabled parameter configuration from the SCADA interface, with alterations accurately propagated to the inverter via a regulated asynchronous mechanism. The observed response times, ranging from 10 to 30 seconds depending on system state, were found to be acceptable for typical microgrid monitoring and control applications.

The converter also exhibited robust performance in the face of operational disturbances. The system's capacity for autonomous recovery from power cycles and communication interruptions, as evidenced by the absence of data loss and the need for no of manual intervention, is attributed to the integration of automatic service initialization with resilient file-based communication mechanisms.

Subsequent endeavors will focus on enhancing the converter's functionality to integrate multiple SMA devices concurrently and to incorporate supplementary inverter models that utilize different communication protocols. The enhancements will also aim to reduce response times through optimized polling strategies and explore the integration of publish/subscribe architectures, such as MQTT, for event-driven data transmission.

Acknowledgements and Declarations

The authors would like to express their gratitude to the Microgrid Laboratory at the Universidad de Cuenca and the Department of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering, which provided the laboratory and equipment for the development of this work. This work is part of the thesis: "INTEGRACIÓN DE LOS INVERSORES SUNNY ISLAND Y AMPERE SQUARE S AL SISTEMA SCADA DEL LABORATORIO DE MICRO-RED DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA".

The authors declare equal contribution and sharing of authorship roles for this publication.

The authors declared that, in the preparation of this article, AI tools were used.

References

- Eckhard, M. (n.d.). Python wrapper for SMA converter YASDI C library. <https://github.com/EckhardM/pyYASDI>
- Espinoza, J. L., González, L. G., & Sempértégui, R. (2017). Microgrid laboratory as a tool for research on non-conventional energy sources in Ecuador. *2017 IEEE International Autumn Meeting on Power, Electronics and Computing (ROPEC)*, 1–7. <https://doi.org/10.1109/ROPEC.2017.8261615>
- Gutiérrez Otavalo, L. V., & Padilla Guamán, C. E. (2024). *Análisis de la factibilidad de mejorar la disponibilidad del sistema SCADA durante los procesos de mantenimiento de los equipos de la micro-red de la Universidad de Cuenca*. [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/45307>
- Hemmati, M., Palahalli, H., Gruosso, G., & Grillo, S. (2021). Interoperability analysis of IEC61850 protocol using an emulated IED in a HIL microgrid testbed. *2021 IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm)*, 152–157. <https://doi.org/10.1109/SmartGridComm51999.2021.9632327>
- Kermani, M., Adelmanesh, B., Shirdare, E., Sima, C. A., Carni, D. L., & Martirano, L. (2021). Intelligent energy management based on SCADA system in a real microgrid for smart building applications. *Renewable Energy*, 171, 1115–1127. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.008>
- Li, S., Jiang, B., Wang, X., & Dong, L. (2017). Research and Application of a SCADA System for a Microgrid. *Technologies*, 5(2). <https://doi.org/10.3390/technologies5020012>
- Pknowledge. (n.d.). Fork of the YASDI library for solar SMA inverters. <https://github.com/pknowledge/libyasdi>
- Si, Y., Korada, N., Ayyanar, R., & Lei, Q. (2021). A High Performance Communication Architecture for a Smart Micro-Grid Testbed Using Customized Edge Intelligent Devices (EIDs) With SPI and Modbus TCP/IP Communication Protocols. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2, 2–17. <https://doi.org/10.1109/OJPEL.2021.3051327>
- SMA. (2015). *Inversor con batería SUNNY ISLAND 4548-US/6048-US Instrucciones de funcionamiento*. SMA.
- Suryani, A., Sulaeman, I., Rosyid, O. A., Moonen, N., & Popović, J. (2024). Interoperability in Microgrids to Improve Energy Access: A Systematic Review. *IEEE Access*, 12, 64267–64284. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3396275>

Enhancing SCADA System Availability: A Case Study of Microgrid Universidad de Cuenca

Mejora de la Disponibilidad del Sistema SCADA: Caso de Estudio Microrred de la Universidad de Cuenca

Lourdes Gutierrez-Otavallo¹ <https://orcid.org/0009-0009-6162-8081>, Claudia Padilla-Guaman¹ <https://orcid.org/0009-0000-7240-4547>, Juan Diego Belesaca¹ <https://orcid.org/0000-0001-8609-0358>, Fabian Astudillo-Salinas¹ <https://orcid.org/0000-0001-7644-0270>, Edison Villa-Ávila¹ <https://orcid.org/0000-0002-2766-5913>

¹Universidad de Cuenca, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Cuenca, Ecuador

lourdesv.gutierrez@ucuenca.edu.ec,
claudia.padillag@ucuenca.edu.ec, juan.belesaca@ucuenca.edu.ec,
fabian.astudillos@ucuenca.edu.ec, edisson.villa2809@ucuenca.edu.ec

Sent: 2025/06/29

Accepted: 2025/08/24

Published: 2025/10/15



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Abstract

Ensuring the uninterrupted operation of Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems is critical for industrial environments that rely on continuous monitoring and control of equipment. However, in the Microgrid Laboratory at the University of Cuenca, routine maintenance procedures have revealed a significant vulnerability: the SCADA system temporarily loses communication and control capabilities when some of the devices are powered down, resulting in forced system downtime. This paper investigates practical strategies to enhance SCADA system availability by addressing this critical limitation. Three hypotheses were explored: first, an issue in network redundancy management; second, with disconnecting of a device from the fiber-optic ring network; and third, programming errors within the LabVIEW-developed SCADA application. Experimental results demonstrated that these approaches, particularly the software-level improvements in LabVIEW, successfully maintained system control and communication during maintenance. The proposed solutions offer a scalable and cost-effective pathway to increase the resilience of SCADA systems in microgrid environments.

Keywords: microgrid, SCADA, resilience, maintenance, OT network.

Summary: Introduction, Materials and Methods, Results and Discussion, Conclusions and Future Work.

How to cite: Gutierrez-Otavallo, L., Padilla-Guaman, C., Belesaca, J. D., Astudillo-Salinas, F. & Villa-Ávila, E. (2025). Enhancing SCADA System Availability: A Case Study of Microgrid Universidad de Cuenca. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 25-37. <https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1357>

Resumen

Garantizar el funcionamiento ininterrumpido de los sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) es fundamental para los entornos industriales que dependen de la supervisión y el control continuos de los equipos. Sin embargo, en el Laboratorio de Microrredes de la Universidad de Cuenca, los procedimientos de mantenimiento rutinarios han revelado una vulnerabilidad significativa: el sistema SCADA pierde temporalmente sus capacidades de comunicación y control cuando se apaga alguno de los dispositivos, lo que provoca una interrupción forzosa del sistema. Este artículo investiga estrategias prácticas para mejorar la disponibilidad del sistema SCADA, abordando esta limitación crítica. Se exploraron tres hipótesis: en primer lugar, un problema en la gestión de la redundancia de la red; en segundo lugar, un problema en la desconexión de un dispositivo de la red de fibra óptica en anillo; y, en tercer lugar, errores de programación en la aplicación SCADA desarrollada con LabVIEW. Los resultados experimentales demostraron que estos enfoques, en particular las mejoras a nivel de software en LabVIEW mantuvieron con éxito el control y la comunicación del sistema durante el mantenimiento. Las soluciones propuestas ofrecen una vía escalable y rentable para aumentar la resiliencia de los sistemas SCADA en entornos de microrredes.

Palabras clave: microrred, SCADA, resiliencia, mantenimiento, red OT.

Introduction

Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) systems play a pivotal role in modern industrial automation, enabling the real-time monitoring and control of a wide array of physical processes. These systems depend on networks of Operational Technologies (OT), frequently established through wired or wireless infrastructures, to collect, process, and visualize critical operational data from field devices such as sensors, inverters, and programmable controllers as Programmable Logic Controller (PLC) y Programmable Automation Controller (PAC) (Chica Gallardo & Guamán Argudo, 2017; Daneels & Salter, 1999). The data acquired includes essential parameters such as power output, voltage, temperature, and frequency, which help optimize the performance and ensure system stability (Montesdeoca Chuva & Buñay Moncayo, 2021).

In recent years, the global shift toward sustainable energy has intensified the relevance of SCADA systems, particularly in smart grid and microgrid environments. The Microgrid Laboratory at the University of Cuenca was established as part of a national initiative aimed at supporting innovation and energy transition. This laboratory serves as a technological testbed for integrating renewable energy sources, storage systems, and electric vehicle infrastructure (Laboratorio de Microrred, 2021). Within this environment, a SCADA system implemented in Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (LabVIEW) enables centralized management of a set of devices interconnected through a fiber-optic ring network (Montesdeoca Chuva & Buñay Moncayo, 2021).

Notwithstanding the advantages offered by SCADA systems, they are susceptible to interruptions during service operations. In the Microgrid Laboratory, power disconnection for routine maintenance results in the temporary loss of connectivity between SCADA and field devices. In turn, it triggers system-wide alerts and leads to forced shutdowns. This behavior not only compromises operational continuity but also limits the flexibility and resilience expected from intelligent energy systems (Ujvarosi, 2016). The existing infrastructure is deficient in its lack of robust fault-tolerant mechanisms capable of sustaining communication and control if individual components are taken offline. This poses a substantial challenge in the context of

research laboratories and industrial facilities, where high availability and minimal downtime are paramount. Specifically, the current SCADA implementation exhibits a gap caused by GUI blocking and historical data loading during maintenance, which often leads to forced restarts. Therefore, the measurable objective of this study is to prevent such restarts and achieve a recovery time of less than 30 minutes.

The objective of this study is to address the challenge of enhancing the availability of SCADA systems during maintenance procedures. To this end, the study will evaluate and implement three complementary strategies. Initially, network redundancy protocols such as Spanning Tree Protocol (STP), Rapid STP, and Turbo Ring are configured on Weidmüller switches (Weidmüller, 2014) to mitigate single points of failure. Secondly, a physical network bypass is proposed through reconfiguration of the optical fiber layout, enhancing the system's fault tolerance. Thirdly, an analysis and adaptation of the LabVIEW-based SCADA architecture is conducted to overcome the limitations of its client-server communication model (Loayza, 2010; Zhou et al., 2009). Through experimental validation and technical adjustments, this work contributes to the development of more resilient SCADA systems for microgrid applications. It is anticipated that these outcomes will provide a foundation for future research and practical implementations in analogous laboratory and industrial contexts.

The remainder of this paper is organized as follows: The second section of the text outlines the materials and methodologies employed to implement the proposed strategies. In Section 3, the experimental results and system performance analysis are presented. Finally, Section 4 discusses the conclusions and suggests directions for future work.

Materials and Methods

This section presents the experimental setup and methodological approach used to investigate SCADA system interruptions during servicing activities in the Microgrid Laboratory at the University of Cuenca. The research combines a case study perspective with empirical observation and the design of controlled experiments to analyze the system's performance. The present study focuses on the SCADA system developed in LabVIEW, the OT network, and the communication infrastructure which is based on Weidmüller switches and a fiber-optic ring.

Experimental environment

The experiments were conducted in the Microgrid Laboratory at the University of Cuenca, a facility designed for research and testing of intelligent energy systems. The laboratory is equipped with a hybrid power generation infrastructure, comprising photovoltaic panels, a diesel generator, a liquefied petroleum gas (LPG) generator, a microturbine, and battery-based storage systems. These components are integrated into a microgrid configuration that supports both grid-connected and islanded modes of operation.

The interconnectedness of all equipment is facilitated by an OT network, which employs a fiber-optic ring topology to ensure high-speed data transmission and enhanced resilience. Programmable Logic Controllers (PLCs) are deployed across multiple subsystems, referred to as Advanced Power Integrated (API) station controllers. Each API is responsible for specific monitoring and control tasks. The communication infrastructure between the SCADA system and the field devices is established using the Modbus TCP/IP protocol. The utilization of Weidmüller switches, which are meticulously managed, plays a pivotal role in ensuring the seamless flow of data. These switches facilitate the continuity of data exchange, even during periods of physical reconfiguration or device-level failures.

A summary of the main components and characteristics of the microgrid environment is presented in Table 1. This environment provides a realistic and intricate platform assessing the behavior of the SCADA system under various maintenance scenarios, thereby simulating real-world disruptions and validating proposed solutions.

Table 1
Overview of the Microgrid Laboratory Infrastructure

COMPONENT	DESCRIPTION
Location	Microgrid Laboratory, University of Cuenca
Power sources	Photovoltaic panels, diesel generator, LPG generator, microturbine
Storage system	Battery-based energy storage units
Control devices	Programmable Logic Controllers (PLCs)
Communication protocols	Modbus TCP/IP, OPC UA
Network topology	Fiber-optic ring and ethernet to end devices
Network equipment	Managed Weidmüller switches, among others
SCADA platform	LabVIEW with Data Logging and Supervisory Control (DSC) module
Monitoring tools	NI MAX, Graylog, Scapy
Virtualization environment	VMware Workstation Pro (hosting Windows Server and Ubuntu Server instances)

SCADA System and Software Stack

The SCADA system utilized in the Microgrid Laboratory was developed in LabVIEW, employing the Data Logging and Supervisory Control (DSC) module to facilitate real-time monitoring, historical data visualization, alarm management, and automated control functions. The architecture employs a client-server model and is hosted on a virtualized Windows Server 2012 R2 instance.

The Modbus TCP/IP protocol facilitates the communication with field devices. The system gathers and logs real-time data, including power, temperature, and frequency, from multiple PLCs distributed across the microgrid. All acquired data are stored in the Citadel database, which is integrated into the SCADA system.

Additionally, NI Measurement & Automation Explorer (NI MAX) is employed for sensor configuration and real-time diagnostics. The management of all virtualized components is facilitated by VMware Workstation Pro, which serves as the host for both the LabVIEW SCADA and the log server environment. This process aligns with the methodically outlined setup in the laboratory's internal documentation.

Methodology

A mixed-methods approach was adopted to investigate the causes of SCADA system unavailability during equipment maintenance. This approach integrates three complementary strategies: the case study method, the empirical method, and the design of experiments (DoE). These strategies were outlined in the preliminary analysis and technical interactions with the Microgrid Laboratory staff.

The case study method explored the operational dynamics of the SCADA system in a real-world environment by focusing on specific incidents observed during serving activities. This method provided a detailed understanding of the system's architecture, communication flows, and failure points by analyzing its behavior under normal and interrupted conditions. It was

essential for formulating initial hypotheses, particularly in the absence of preexisting theoretical models regarding SCADA unavailability in fiber-optic ring networks.

The empirical method was used to directly observe and analyze system performance, with a focus on data flow continuity, communication stability, and device responsiveness. Through hands-on testing and observation, behaviors such as loss of connectivity, alert generation, and SCADA restarts were documented. These observations provided real-time evidence of system behavior, validating symptoms reported by operators, and narrowing down potential failure scenarios.

The design of experiments (DoE) methodology was employed to formally test three hypotheses derived from the case study. Each hypothesis was examined through targeted experiments:

- H1: Lack of proper network redundancy management using Weidmüller switches causes SCADA unavailability.
- H2: Disconnecting a device from the fiber-optic ring network causes system unavailability.
- H3: Programming errors within the LabVIEW-developed SCADA application are responsible for the system's failure during maintenance.

Each experiment was carefully structured to isolate relevant variables and capture measurable outputs. Network traffic was recorded using Scapy and Graylog, and system behavior was evaluated using log data, packet captures, and LabVIEW diagnostic outputs. These experiments enabled the data-driven validation or rejection of the proposed hypotheses, forming the basis for the technical solutions presented in subsequent sections.

Experimental design and procedures

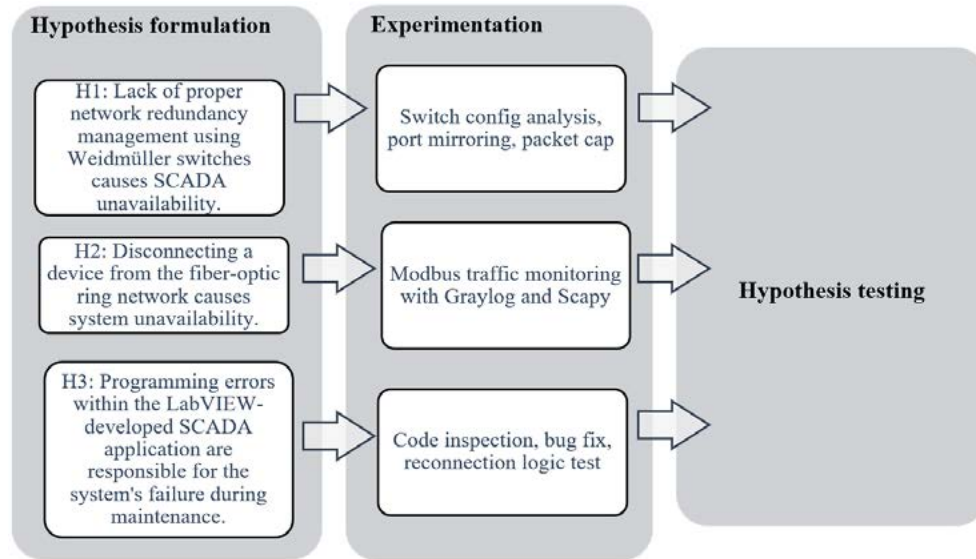
A series of three experiments were conducted to validate the hypotheses formulated within the methodological framework. Each experiment was meticulously designed to assess a particular aspect of the SCADA system's performance under maintenance-related disruptions. These experiments utilized tools and data collection techniques deemed suitable for real-time industrial environments.

The initial experiment aimed to determine whether inadequate redundancy management within the network contributed to the occurrence of SCADA unavailability. An examination of the Weidmüller switch configuration was conducted to verify the status of redundancy protocols, such as Turbo Ring, as per the manufacturer's documentation (Weidmüller, 2014). A port mirroring function was configured to capture and analyze traffic behavior during a simulated device disconnection. Network packets were captured using Wireshark and tcpdump, with a focus on communication continuity and protocol behavior. The analysis indicated that redundancy mechanisms were operational and efficacious, enabling communication to persist even in the event of a device's disconnection from the ring topology.

The second experiment evaluated the impact of disconnecting a single Programmable Logic Controller (PLC) on the behavior of the remaining devices. To this end, a virtual Ubuntu server was configured to collect and classify Modbus Query and Response messages using a custom Python script (Guachichullca Guamán, 2024) and the Scapy library. The results, which were visualized in real time through Graylog (Centralización y Análisis de Eventos de Seguridad Con Graylog, n.d.), demonstrated that while the disconnected PLC ceased sending data, the others continued transmitting without interruption, thereby refuting the second hypothesis.

Figure 1

Experimental validation flowchart for SCADA availability analysis



The third experiment focused on the identifying flaws in the SCADA software developed in LabVIEW. A thorough code inspection revealed issues in the handling of TCP connections and excessive startup delays due to unfiltered historical data loading. These issues were addressed by modifying the reconnection logic and eliminating superfluous initializations. Furthermore, unused trend monitoring blocks were eliminated, and database optimization was executed using SQL Server Management Studio. After the implementation of these adjustments, simulated serving procedures substantiated stable SCADA operation and sustained device communication.

To that end, Graylog (a centralized logging platform) as a means of monitoring system behavior and validating data flows was implemented. The platform is deployed on an Ubuntu 22.04 LTS server. The utilization of Scapy was employed for packet-level inspection of Modbus traffic between devices.

A summary of the experimental logic, including the hypotheses, procedures, and outcomes, is illustrated in Figure 1. Each experiment contributed to refining the understanding of the system's limitations and led to actionable improvements that enhanced SCADA availability in the Microgrid Laboratory environment.

Results and Discussion

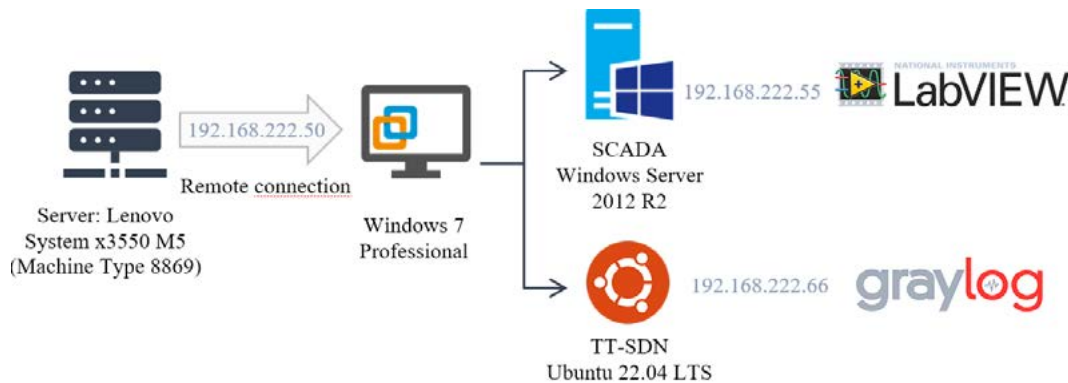
This section presents the results obtained through the experimental procedures described in the methodology. The primary objective of this study was to determine the underlying cause of the SCADA system's unavailability during maintenance operations in the Microgrid Laboratory. To this end, three hypotheses were formulated and evaluated through a series of targeted experiments.

The hypotheses addressed the potential causes of system failure, as described in the Methodology section. The testing of each hypothesis was conducted using the tools, protocols, and procedures outlined in Section 2. The experimental process entailed traffic monitoring, device disconnection, and software analysis. The ensuing subsections provide a comprehensive overview of the findings, incorporating both quantitative and qualitative data.

Figure 2 presents a diagram that summarizes the logical access topology of the SCADA

system. This figure provides a comprehensive overview of the interconnection between the SCADA server, field devices, and network components.

Figure 2
Logical access topology of the SCADA system



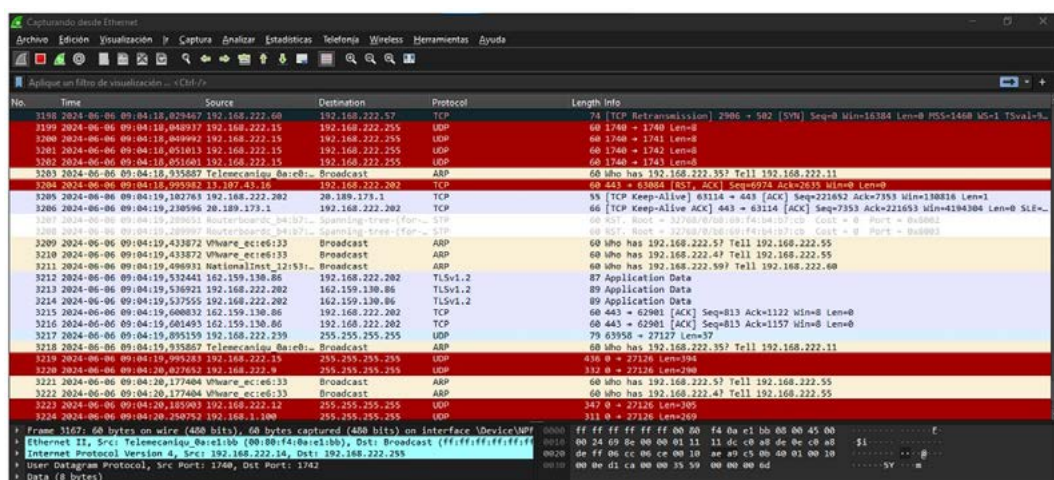
Hypotheses testing and experimental results

The first hypothesis H1 proposed that the unavailability of the SCADA system was due to a failure in managing network redundancy. More specifically, the failure involved the configuration of the fiber-optic ring that connects the OT devices via Weidmüller switches.

To validate this hypothesis, an experiment was conducted in which one of the switches in the fiber-optic ring was disconnected. Under the assumption of insufficient redundancy, the expected outcome was the loss of communication with devices located downstream of the disconnection point. However, packet captures obtained using Wireshark and tcpdump revealed continued data transmission between the SCADA system and the remaining field devices despite the disconnection.

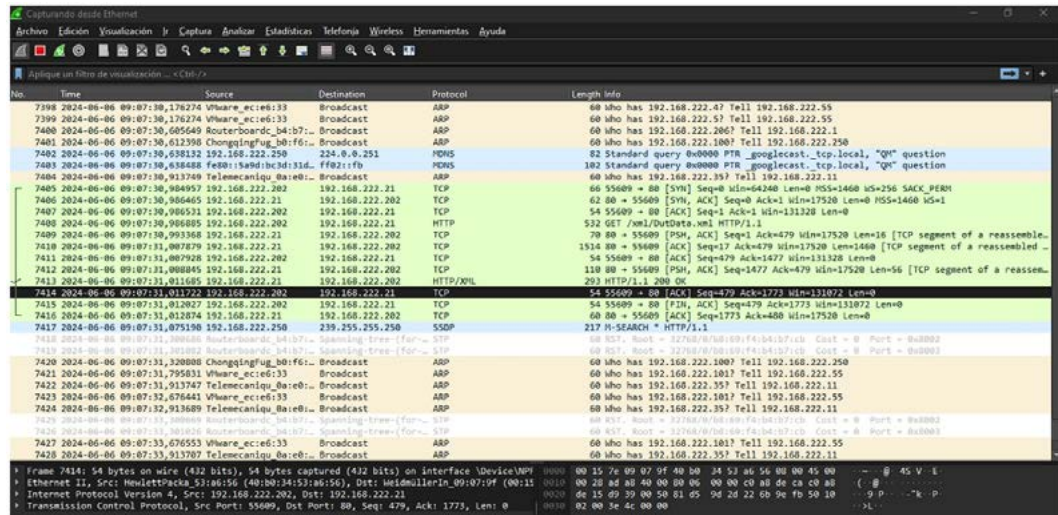
These results indicate that the redundancy mechanisms were active and functioning properly. Ethernet connections between all peripheral switches and the central switch ensured uninterrupted communication by effectively bypassing the broken ring segment.

Figure 3
Packet capture before disconnection in Weidmüller switch



Figures 3 and 4 illustrate the traffic behavior before and after the disconnection. Figure 3 illustrates the packet flow prior to the disconnection occurred. Figure 3 confirms that data from the same devices continued to be received after the switch was disconnected, thus validating the redundancy. Consequently, Hypothesis H1 was rejected, and it was determined that the SCADA system's availability was not affected by the fiber-optic ring topology or redundancy configuration.

Figure 4
Packet capture after disconnection from Weidmüller switch



The second hypothesis H2 suggested that disconnecting a Programmable Logic Controller (PLC) from the fiber-optic ring network would interrupt the availability of the SCADA system. This assumption was based on the idea that the ring topology might propagate failure to the rest of the network.

The PLC in API 3 was selected for disconnection due to its ease of physical access and was chosen to evaluate this hypothesis. The test involved recording the number of Modbus TCP queries and responses per minute for each PLC using Graylog before and after disconnection. These values were obtained through the log server connected to the SCADA system.

Figure 5
Message count before disconnection in APIs and PLCs

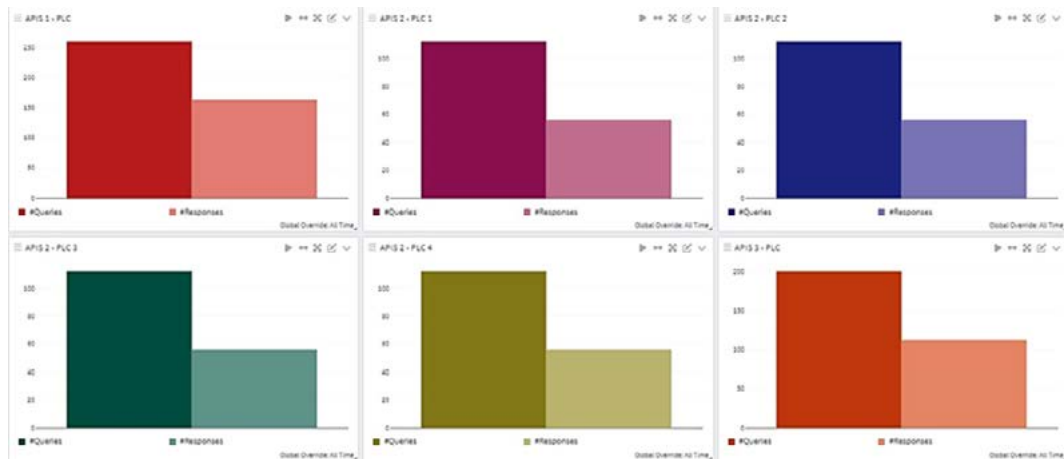
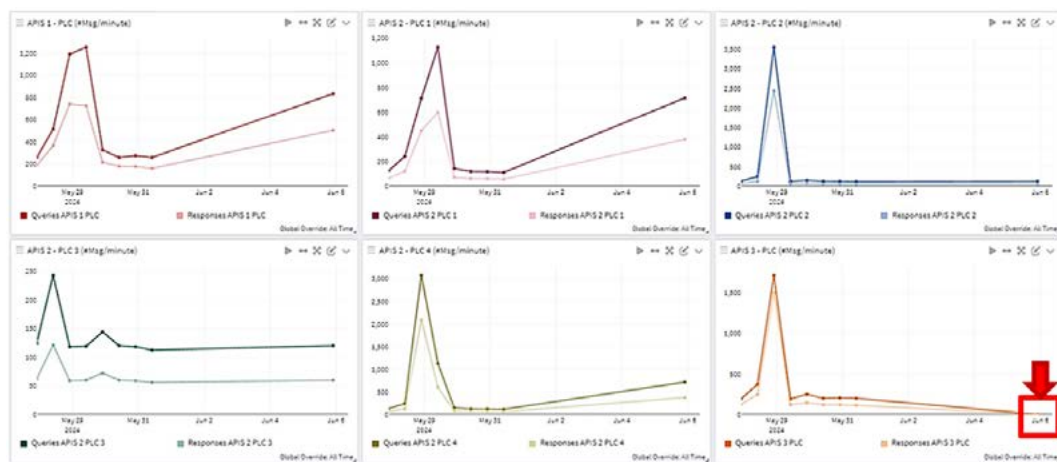


Figure 5 illustrates the number of Modbus messages before disconnection. All PLCs, including API 3, exhibit consistent data transmission and reception. After the disconnection of the API 3 PLC, the Modbus message count for that device decreases to zero. Concurrently, the communication patterns exhibited by the other PLCs remained consistent with their expected behaviors. Figure 6 further corroborates this finding by demonstrating the time-series behavior of query and response counts. Furthermore, Graylog furnished additional corroboration in the form of tabular logs during the disconnection process. Notably, communication with API 3 has been completely terminated, while the remaining devices remain unaffected.

These results clearly indicate that the loss of a single PLC does not compromise the network's operation. Therefore, Hypothesis H2 is rejected as well, since the SCADA system maintains full availability and data integrity when a field device is temporarily disconnected.

Figure 6
Message count over time in APIs and PLCs



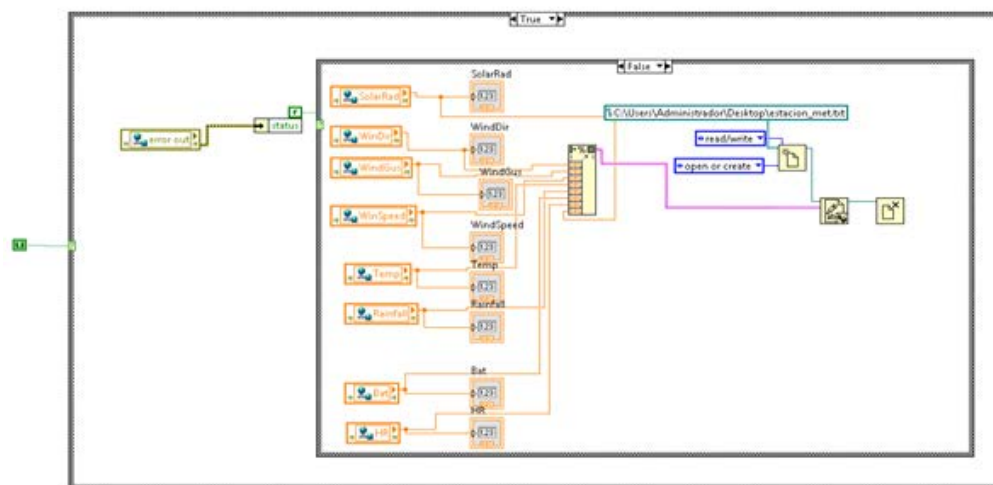
After rejecting the initial two hypotheses concerning the physical network infrastructure, the investigation focused on a third hypothesis H3. This hypothesis posited that the unavailability of the SCADA system was attributable to internal programming failures within the LabVIEW-based application. The validity of this hypothesis was ascertained through systematic testing of both the original and modified versions of the SCADA software.

In the initial version, several issues were identified through a meticulous examination of the code and a series of interactions with system operators. These included excessive startup time, system crashes following temporary PLC disconnections, and the inability to automatically recover from Modbus communication errors. Upon disconnection of the PLC from API 3, the system exhibited a Modbus I/O error with code -1967353902, signifying a loss of communication with the slave device. The interface was locked, necessitating a manual restart, which had a substantial impact on system availability. Furthermore, the system's initialization process was found to require up to eight hours due to the loading of historical data from the database. This phenomenon was attributed to the incorporation of all historical trend traces since the system's deployment.

To remediate these issues, a series of enhancements were implemented. First, a reconnection protocol was programmed using a conditional case structure, allowing automatic recovery from TCP disconnections without requiring for user intervention. After, the graphical user interface was modified to eliminate unnecessary error prompts, thereby allowing operators

Finally, the system's startup time was reduced to just a few minutes, greatly improving operational readiness. Validation of these improvements confirms acceptance of Hypothesis H3 and establishes that the root cause of SCADA unavailability was related to software design flaws in the original LabVIEW implementation.

Figure 7



A summary of the validation process based on the experimental results obtained for each hypothesis is presented in Table 2. The table indicates whether each hypothesis was accepted or rejected and if it contributed directly to the final solution that improved the availability of the SCADA system.

Table 2

HYPOTHESIS	VALIDATION RESULT	INCLUDE IN FINAL SOLUTION
H1: Lack of network redundancy management causes SCADA unavailability	Rejected	No
H2: PLC disconnection causes fiber ring failure	Rejected	No
H3: LabVIEW programming causes SCADA unavailability	Accepted	Yes

The results show that hypotheses H1 and H2, which attributed SCADA failures to network infrastructure issues, were rejected. The experiments demonstrated that the network's redundancy mechanisms and device independence were functioning correctly. In contrast, H3 was accepted because detailed software-level analysis confirmed that communication errors, system lockups, and performance delays were caused by limitations in the original LabVIEW implementation.

The software enhancements introduced in response to hypothesis H3 were successfully validated in a laboratory environment and are now part of the operational SCADA solution.

Complete system discussion

A comparative analysis was conducted between the original and updated versions of the SCADA system software to evaluate the effectiveness of the improvements made. The analysis focused on key performance indicators, including system availability during PLC disconnection, interface responsiveness, error handling, recovery behavior, and system startup time.

The original version of the system failed to handle temporary communication losses. When a PLC was disconnected, the SCADA system triggered a critical communication error followed by a Modbus I/O failure message. This error rendered the graphical user interface inoperative and required the system to be manually restarted. Even after reconnecting the PLC and restoring communication at the network level, the SCADA system remained unresponsive until a complete restart was performed. Additionally, the initialization time for the SCADA system in the original version was highly variable, ranging from several minutes to eight hours, depending on the volume of historical data loaded from the Citadel database. This delay reduced operational availability significantly and hindered routine maintenance procedures.

In contrast, the updated version of the SCADA software developed as part of this research demonstrated marked improvements in all evaluated aspects. Upon PLC disconnection, the system issued a non-intrusive visual alarm in SCADA without blocking operator interaction. The communication diagram (Figure 2) remained active, and other system components continued to function normally.

Once the PLC reconnected, Graylog confirmed the restoration of Modbus message flow, and the SCADA system automatically resumed normal operation without requiring a restart. Most notably, optimizing database access and removing unnecessary historical trend loading reduced the system's startup. The mean duration of system startup has been reduced from eight hours to 12 minutes, with a standard deviation of ± 2 minutes, based on 20 runs. These findings are consolidated in Table 3, which summarizes the performance differences between the original and updated SCADA software versions across key indicators. Overall, the comparison confirms that the implemented software changes significantly increased the robustness and resilience of the SCADA system during both planned and unplanned serving events.

Table 3
Comparative analysis of the original vs. updated SCADA systems

INDICATOR	ORIGINAL VERSION	UPDATED VERSION
Startup time	8 hours (variable, depending on historical data loading)	12 ± 2 minutes (20 runs, optimized DB access and filtered historical data)
Behavior on PLC disconnect	Triggered critical error, Modbus I/O failure → forced shutdown	Issued non-intrusive alarm, communication diagram active, other components normal
UI blocking	GUI froze and required manual restart even after PLC reconnection	GUI remained responsive; automatic reconnection without restart
Recovery after PLC reconnection	Required complete restart	Automatic recovery confirmed via Graylog (no restart needed)
Data handling (historical)	Heavy Citadel database loading; caused variability in startup	Selective filtering; unnecessary historical data

Conclusions and Future Work

The present study evaluated the root causes of SCADA system unavailability during maintenance procedures in the Microgrid Laboratory at the University of Cuenca. A mixed method approach was employed, integrating case study analysis, empirical observation, and experimental validation, to test three hypotheses and ascertain the origin of system failures. The study's findings indicated that the physical infrastructure of the OT network, including redundancy protocols and device disconnections, did not contribute to the observed unavailability. Consequently, the initial two hypotheses were refuted.

Conversely, the third hypothesis was corroborated. The analysis revealed that the primary constraints originated from software-level issues within the LabVIEW-based SCADA system. These included improper handling of communication failures, long startup times due to unfiltered historical data loading, and the absence of an automatic reconnection mechanism following temporary PLC disconnections. To remediate these issues, a series of enhancements were implemented, encompassing optimized reconnection logic, user interface improvements, and database filtering. Consequently, the system demonstrated a significant decrease in initialization time, eliminated interface lockups, and maintained full functionality during servicing events. These outcomes demonstrate that the availability of SCADA systems can be significantly enhanced through the implementation of targeted software modifications without the necessity of altering the existing physical infrastructure.

Looking ahead, several directions for future work are identified. These include upgrading the microgrid's hardware infrastructure with faster and more robust components, such as high-performance RAM and solid-state drives, to further enhance system responsiveness. Implementing automated backup systems for the SCADA database would enhance data resilience and reduce system load. More detailed protocol analysis using external tools such as Modbus Poll could provide valuable insights into communication behavior and help refine implementation. It is also important to improve the traceability of maintenance procedures by recording and classifying interventions more systematically. Finally, the integration of emerging technologies such as artificial intelligence and the Internet of Things presents an opportunity to evolve the SCADA system into a more intelligent, predictive, and self-adaptive platform.

Acknowledgements and Declarations

The authors would like to express their gratitude to the Microgrid Laboratory at the Universidad de Cuenca and Department of Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering, which provided the laboratory and equipment for the development of this work. This work is part of the thesis: "ANÁLISIS DE LA FACTIBILIDAD DE MEJORAR LA DISPONIBILIDAD DEL SISTEMA SCADA DURANTE LOS PROCESOS DE MANTENIMIENTO DE LOS EQUIPOS DE LA MICRO-RED DE LA UNIVERSIDAD DE CUENCA".

The authors declare equal contribution and sharing of authorship roles for this publication.

The authors declared that, in the preparation of this article, AI tools were used.

References

- Centralización y análisis de eventos de seguridad con Graylog. (n.d.). Retrieved June 23, 2025, from <https://openaccess.uoc.edu/items/1f2bc757-1b7e-43d3-8776-cc9a343964c1>
- Chica Gallardo, A. P., & Guamán Argudo, J. A. (2017). *Modelo de estado estacionario de la microrred del laboratorio de Balzay de la Universidad de Cuenca* [bachelorThesis]. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/28606>
- Daneels, A., & Salter, W. (1999). What is SCADA? *Proceedings of the 7th International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems (ICALPCS '99)*. Trieste, Italia: International Conference on Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. <https://cds.cern.ch/record/532624/files/mc1i01.pdf>
- Guachichullca Guamán, B. A. (2024). *Diseño e implementación de una Arquitectura de Ciberseguridad para la Micro-red de la Universidad de Cuenca* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca. <https://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/44828>
- Laboratorio De Microrred. (n.d.). Retrieved June 22, 2025, from <https://www2.ucuenca.edu.ec/ingenieria/laboratorios/lab-microrred>
- Loayza, E. G. (2010). *Desarrollo de una guía práctica para la medición del tráfico de red IP y monitoreo de dispositivos en tiempo real mediante herramientas MRTG y PRTG*. Pontificia Universidad Católica del Ecuador. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/3421/T-PUCE-3575.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Montesdeoca Chuva, D. I., & Buñay Moncayo, D. E. (2021). *Creación de sistemas SCADA para el laboratorio de microred de la Universidad de Cuenca bajo el enfoque de desarrollo dirigido por modelos* [Tesis de pregrado, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/37333>
- Ujvarosi, A. (2016). Evolution of SCADA systems. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*, 9(58) (1), 63-68.
- Weidmüller. (2014). *Industrial Ethernet managed switches: Manual for managed switches of series ValueLine and PremiumLine*. <https://manualzz.com/doc/6766188/manual-managed-weidm%C3%BCller-switches>
- Zhou, J., Liu, D., Ma, X., & Ye, C. (2009). Application of industry ethernet and configuration software in heating network monitoring system. *2009 WRI World Congress on Computer Science and Information Engineering, CSIE 2009*, 131–134. <https://doi.org/10.1109/CSIE.2009.439>

Fragmentación de Roca por Voladura en Minería a Cielo Abierto: Predicción con IA

Rock Fragmentation by Blasting in Open-Pit Mining: an AI Predictive Model

Steven Toapanta-Delgado¹ <https://orcid.org/0009-0001-0015-5008>, Byron Guerrero-Rodriguez¹
<https://orcid.org/0000-0002-6288-4804>, Christian Mejia-Escobar¹ <https://orcid.org/0000-0001-6715-191X>

¹Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador
sftoapanta@uce.edu.ec, bvguerrero@uce.edu.ec,
cimejia@uce.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2025/06/29

Aceptado: 2025/08/24

Publicado: 2025/10/15

Resumen

La fragmentación de rocas por voladura es fundamental en el sector minero. Este proceso busca optimizar el tamaño de la roca para su posterior extracción, transporte y procesamiento. Predecir esta fragmentación se vuelve una tarea crucial para mejorar la eficiencia operativa; sin embargo, la aplicación de fórmulas simplificadas carece de precisión y adaptabilidad a las variaciones litológicas. Este estudio propone el uso de inteligencia artificial (IA) para la estimación precisa del diámetro promedio de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. A partir de un conjunto de 97 datos de fragmentación y voladuras reales a nivel mundial, se evaluaron los algoritmos de Random Forest (RF), Support Vector Regressor (SVR) y Kernel Ridge Regression (KRR), junto con la ecuación de Kuz-Ram, ampliamente utilizada en la industria. Los resultados indican que los modelos de IA superan notablemente la ecuación convencional. RF ofrece la mayor precisión con valores de MSE de 0.0017 y R^2 de 95.38 %. En contraste, SVR alcanza valores de 0.0064 y 83.13 %, mientras que KRR obtiene 0.016 y 69.60 %. El adecuado desempeño de estos algoritmos ha motivado el desarrollo de una aplicación que facilita a los usuarios la visualización de mallas de perforación, establecer dimensiones concretas y comparar las proyecciones del tamaño medio de las rocas. Esta herramienta facilita la toma de decisiones informadas, mejorando los procesos de minería, fomentando resultados más confiables y sostenibles en distintos contextos operativos.

Sumario: Introducción, Metodología, Resultados y Discusión, Conclusiones.

Cómo citar: Toapanta-Delgado, S., Guerrero-Rodriguez, B. & Mejia-Escobar, C. (2025). Fragmentación de Roca por Voladura en Minería a Cielo Abierto: Predicción con IA. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 38-54. <https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1356>

Palabras clave: fragmentación, minería, perforación, voladura, estimación, machine learning, inteligencia artificial.

Abstract

Rock fragmentation by blasting is fundamental in the mining sector. This process seeks to optimize rock size for subsequent extraction, transport, and processing. Predicting this fragmentation becomes a crucial task for improving operational efficiency; however, the application of simplified formulas lacks precision and adaptability to lithological variations. This study proposes the use of artificial intelligence (AI) for the accurate estimation of the average diameter of igneous, sedimentary, and metamorphic rocks. Based on a set of 97 real fragmentation and blasting data from around the world, the Random Forest (RF), Support Vector Regressor (SVR), and Kernel Ridge Regression (KRR) algorithms were evaluated, along with the Kuz-Ram equation, widely used in the industry. The results indicate that AI models significantly outperform the conventional equation. RF offers the highest accuracy with MSE of 0.0017 and R^2 of 95.38%. In contrast, SVR achieves values of 0.0064 and 83.13%, while KRR achieves 0.016 and 69.60%. The adequate performance of these algorithms has led to the development of an application that allows users to view drilling grids, set specific dimensions, and compare projections of average rock size. This tool facilitates informed decision-making, improving mining processes and promoting more reliable and sustainable results in different operational contexts.

Keywords: Fragmentation, mining, drilling, blasting, estimation, machine learning, artificial intelligence.

Introducción

La fragmentación de la roca es un pilar fundamental en la viabilidad económica y la eficiencia operativa de cualquier proyecto minero (Xie et al., 2021; Zamora-Paredes et al., 2020). La voladura, como etapa inicial de conminución, impacta directamente los costos y la productividad de operaciones subsiguientes como carga, transporte, trituración y molienda (Yakovlev et al., 2024). Una fragmentación óptima es crucial (Aryafar et al., 2020), pero la presencia de rocas sobredimensionadas aumenta costos por voladuras secundarias y genera impactos ambientales como polvo y vibraciones (Su & Ma, 2022) (Guerrero-Rodriguez et al., 2024). De hecho, más del 70 % de la energía explosiva se desperdicia en efectos adversos, en lugar de contribuir a una fragmentación efectiva. Tradicionalmente, la predicción se ha basado en modelos empíricos como Rosin-Rammler o Kuz-Ram (Vu & Bao, 2021); no obstante, estos métodos son limitados por su dependencia de trabajo manual, sesgos de datos y la incapacidad de capturar las complejas relaciones no lineales y propiedades de la masa rocosa (Ohadi et al., 2020).

Para superar estas limitaciones, la inteligencia artificial (IA) se presenta como una alternativa prometedora en la ingeniería minera (Saadoun et al., 2024). Los modelos de IA, con su capacidad de autoaprendizaje y reconocimiento de patrones no lineales, permiten predicciones más precisas y la optimización de los diseños de voladura (Leng et al., 2020). El presente estudio propone el desarrollo de un modelo predictivo aplicando técnicas de IA para la fragmentación de roca en voladuras a cielo abierto. Para optimizar los parámetros de voladura y lograr una rotura de roca más efectiva, se evalúan tres algoritmos de aprendizaje automático (Random Forest, Support Vector Machine y Kernel Ridge Regression) con el fin de reducir costos y minimizar impactos ambientales (Zhao et al., 2024). La contribución concreta de este trabajo es

una herramienta de software predictiva confiable y precisa con una interfaz gráfica de usuario que permitirá ajustar proactivamente la voladura, mejorando la eficiencia operativa, la productividad y la recuperación del mineral, mientras se mitigan los daños económicos y ecológicos (Górriz et al., 2023).

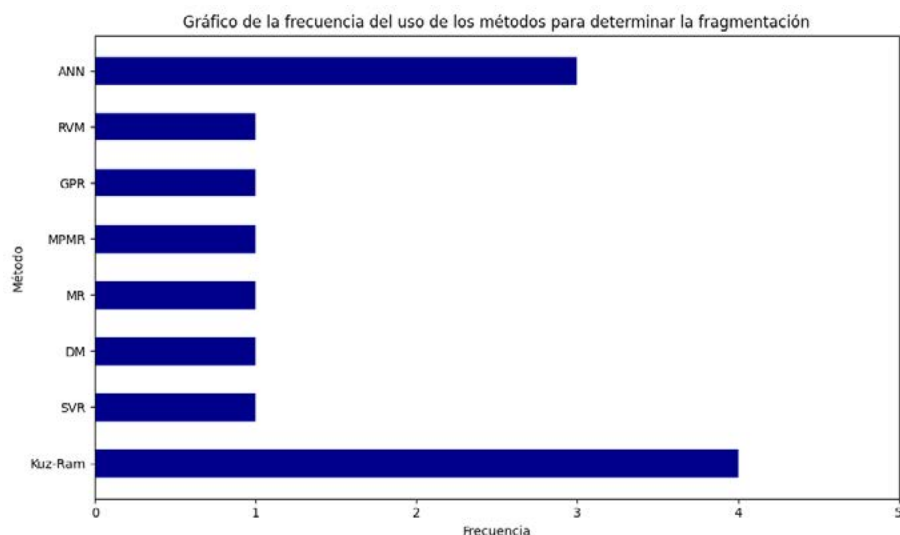
Metodología

Trabajo previo

El análisis comparativo de once investigaciones sobre fragmentación revela una amplia variedad de metodologías utilizadas y variables seleccionadas, las cuales se ven afectadas por los objetivos particulares y el contexto geográfico y operativo de cada uno de los trabajos. La fuente de los datos difiere en gran medida: hay investigaciones que se centran en una única área, mientras que otras incluyen varias regiones y naciones, como Chile, Turquía, Perú, Finlandia, Cuba y Zambia, o incluso abarcan escalas a nivel global, lo que influye en la cantidad y el tipo de información analizada. Respecto a las metodologías, la Figura 1 destaca la aplicación de técnicas de IA y modelos empíricos.

Figura 1

Frecuencia de los modelos empleados en las investigaciones analizadas

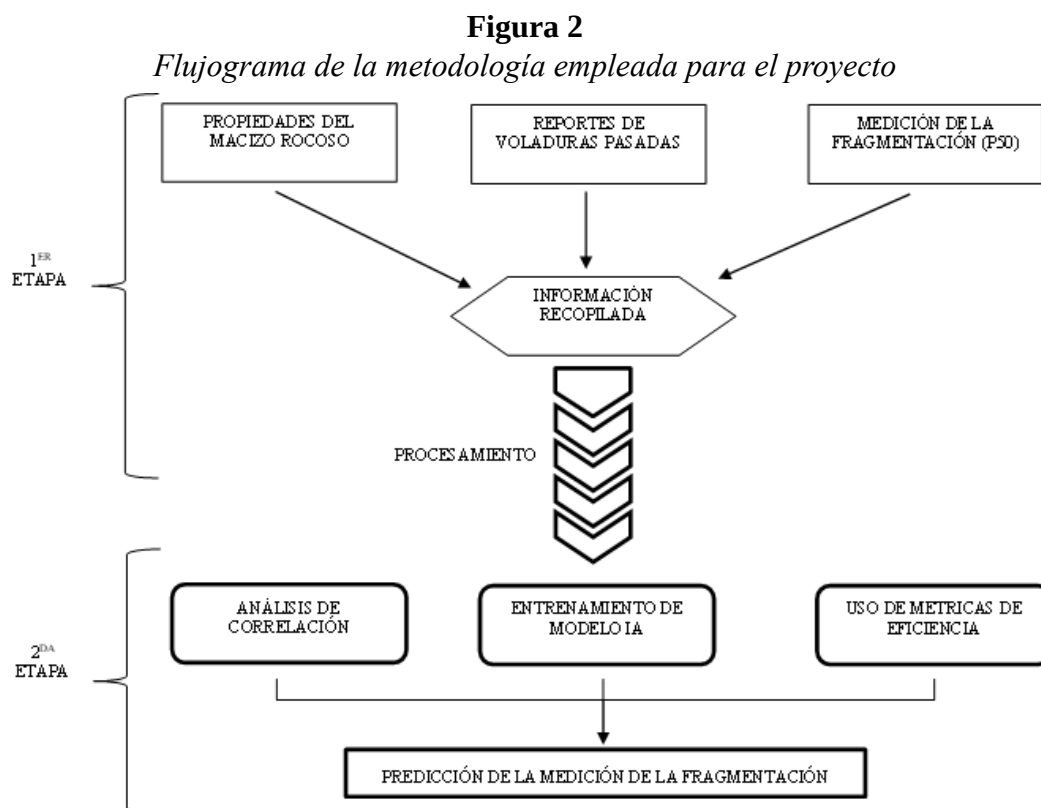


La red neuronal artificial (ANN) utilizada en tres investigaciones (Amoako et al., 2022; de Castro, 2021; Rosales-Huamani et al., 2020) y el modelo Kuz-Ram aplicado en cuatro (Bunga et al., 2020; Castro, 2021; Mwangi, 2019; Rojas Linares, 2018) son los más frecuentes, lo que indica su versatilidad y establecimiento. Métodos alternativos comprenden la máquina de vectores de relevancia (RVM), la regresión de procesos Gaussianos (GPR), la regresión de probabilidad minimax (MPMR), la regresión múltiple y la matriz de decisión, cada uno con sus respectivos fundamentos teóricos. No obstante, ellos están limitados por la adaptabilidad al tipo de roca y la presentación de los resultados, ya que no facilitan una mejor visualización para el usuario final.

Propuesta

A diferencia de los trabajos anteriores, este estudio busca cuantificar la fragmentación durante voladuras considerando diferentes tipos de rocas. Incorpora nueve categorías de litologías, que incluyen ígneas, metamórficas y sedimentarias, con el fin de analizar el comportamiento de los materiales geológicos. Además, se seleccionaron los tres algoritmos de IA con la mayor

precisión reportada en la literatura, que son evaluados y comparados, tanto entre ellos como con un método convencional ampliamente utilizado. Posteriormente, se desarrolla una aplicación de software para optimizar la calidad del producto, implementando un sistema de retroalimentación constante. En esencia, la metodología sigue los pasos del aprendizaje automático (ML) clásico, agrupados en dos grandes etapas: datos y modelo, tal como se ilustra en la Figura 2.



La primera etapa se dedica al conjunto de datos, donde se recopilan y analizan datos de caracterización geotécnica, registros históricos y mediciones de fragmentación para obtener métricas como el tamaño crítico P(50), para identificar inconsistencias por variaciones geológicas o errores. La segunda etapa corresponde a los métodos de procesamiento de estos datos. Aquí se utilizan modelos matemáticos y algoritmos de IA para correlacionar variables como dureza del material y parámetros de diseño, para predecir resultados y mejorar la planificación. Este enfoque reduce incertidumbre, optimiza eficiencia energética y económica y se adapta a diversos contextos mineros, priorizando sostenibilidad. La integración de datos experimentales, simulaciones y registros históricos asegura robustez, ajustando factores como separación de barrenos o cantidad de explosivo para maximizar recursos y minimizar costos. A continuación, se explican con más detalle los datos y modelos utilizados.

Datos

Los datos se recopilaron a partir de una investigación detallada realizada por Hudaverdi et al. (2006), que abarca un total de 97 registros de diversas partes del mundo, asegurando así una adecuada representatividad. Cada registro incluye ocho factores principales que afectan la fragmentación y el rendimiento en las voladuras (Tabla 1): espaciamento/burden (S/B), altura de banco/burden (H/B), burden/diámetro de barreno (B/D), stemming/burden (T/B), factor de pólvora (PF), tamaño de bloque in situ (XB), módulo de elasticidad (E) y tamaño medio de fragmentación (P50) como variable dependiente.

Tabla 1*Variables del conjunto de datos y sus indicadores estadísticos más importantes*

VARIABLES	DEFINICIÓN	CLASIFICACIÓN	TIPO	MÍNIMO	MÁXIMO	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
S/B	Relación de parámetro central (Espaciamiento/Burden)	Cuantitativa continua	Independiente	1	1.75	1.201778	0.110134
H/B	Relación de geometría de la malla (Altura de banco/Burden)	Cuantitativa continua	Independiente	1.33	6.82	3.458889	1.638696
B/D	Relación de eficiencia vertical o de profundidad de hoyo (Burden/Diámetro de agujero)	Cuantitativa continua	Independiente	17.98	39.47	27.216333	4.798088
T/B	Relación de confinamiento de la energía (Taco estéril/Burden)	Cuantitativa continua	Independiente	0.5	4.67	1.267556	0.691722
PF (kg/m ³)	Factor de pólvora	Cuantitativa continua	Independiente	0.22	1.26	0.536556	0.239227
XB (m)	Tamaño de bloque estimado	Cuantitativa continua	Independiente	0.02	2.35	1.178667	0.479209
E (GPa)	Módulo de elasticidad o de Young de roca intacta	Cuantitativa continua	Independiente	9.57	60	30.585333	17.75583
P50 (m)	Tamaño medio de roca fragmentada	Cuantitativa continua	Dependiente	0.12	0.96	0.315667	0.185576

Aunque el número de registros es limitado, ya que su contenido es único, especializado y de difícil acceso, este conjunto de datos es particularmente relevante para el estudio. Mediante el uso de unidades del Sistema Internacional, se crearon relaciones sólidas para modelos de predicción que son útiles en situaciones geotécnicas y mineras. El análisis estadístico expone las conexiones entre las variables, enfatizando la desviación estándar. Un valor elevado en el módulo de elasticidad ($E = 17.755830$ GPa) indica una alta variabilidad, lo que influye en la capacidad para realizar predicciones. En contraste, el reducido valor del factor de pólvora ($PF = 0.239227$ kg/m³) sugiere una uniformidad que propicia resultados consistentes.

Métodos

Kuz-Ram

Es un modelo empírico muy utilizado en la minería, anticipa cómo se fragmentan las rocas después de las explosiones, mejorando las operaciones en la planta al calcular cómo se distribuirán los tamaños de los fragmentos (Hekmat et al., 2019). Se fundamenta en criterios tales como el factor geológico (volabilidad), diseño de voladura (burden, espaciamento, altura del banco) y propiedades del material explosivo (cantidad, tipo, densidad) (López et al., 2003). El tamaño promedio del fragmento (P50) se determina utilizando la Ec. 1 (Kuznetsov, 1973). Para optimizar la granulometría, se modifican el burden y el espaciamento, lo que incrementa la productividad. La validación confronta las predicciones con el análisis de imágenes (Split Desktop, WipFrag), lo que permite realizar ajustes para incrementar la precisión (Das et al.,

2023). A pesar de que Kuz-Ram es sencillo de aplicar y valioso para los diseños iniciales, puede sobreestimar el tamaño de los fragmentos en algunas rocas, dependiendo de la calidad de los datos y del factor de la roca (Lawal, 2021). Los modelos ajustados y los elementos de corrección optimizan su calibración y alineación con los resultados experimentales.

$$P50 = \left[2.2 - 14 \left(\frac{D}{B} \right) \right] \times \left[\left(\frac{1 + \frac{S}{B}}{2} \right)^{0.5} \right] \times \left[1 - \frac{E}{B} \right] \quad Ec. (1)$$

Random Forest

Es un algoritmo de aprendizaje automático; se caracteriza por su eficacia en la predicción de la fragmentación de rocas en los procesos de voladuras mineras, lo que permite optimizar los procesos y aumentar la eficiencia (Shafl, 2024). Comienza recolectando información de campo, como características geomecánicas (resistencia uniaxial y módulo de elasticidad), parámetros relacionados con la voladura (distancia entre agujeros/carga y factor de carga) y datos empíricos (promedio del tamaño de los fragmentos) (Hu et al., 2023). Se entrena un conjunto de árboles de decisión utilizando subconjuntos aleatorios de datos, aplicando la técnica de *bootstrapping* y la selección aleatoria de variables, con el fin de disminuir las correlaciones y mejorar la robustez (Raj et al., 2024). Se establece el hiperparámetro de número de estimadores (número de árboles) para prevenir el sobreajuste (Zhao et al., 2024). Validado con indicadores como el error cuadrático medio y el coeficiente de determinación, el modelo Random Forest presenta una mayor precisión en comparación con otros modelos. Además, identifica variables clave a través de análisis de sensibilidad y optimiza diseños de voladura, logrando las distribuciones granulométricas deseadas y aumentando la productividad en minería (Y. L. Zhang et al., 2024).

Support Vector Regressor

El algoritmo SVR se distingue por su exactitud en la predicción de la fragmentación de rocas durante las voladuras, superando a los modelos empíricos convencionales (Rabbani et al., 2024). Comienza con la recopilación de datos, que debe incluir los parámetros de voladura, las propiedades geomecánicas y métricas tales como P50 o P80 (Hasanipanah et al., 2018). Estos conjuntos de datos, que están separados en grupos de entrenamiento y de prueba, se obtuvieron a partir de explosiones reales (Li et al., 2021). El modelo SVR es entrenado para estimar el tamaño de los fragmentos, adecuando el hiperparámetro de regularización C (Miao et al., 2021). Su rendimiento se valora mediante indicadores tales como el Error Cuadrático Medio.

Kernel Ridge Regression

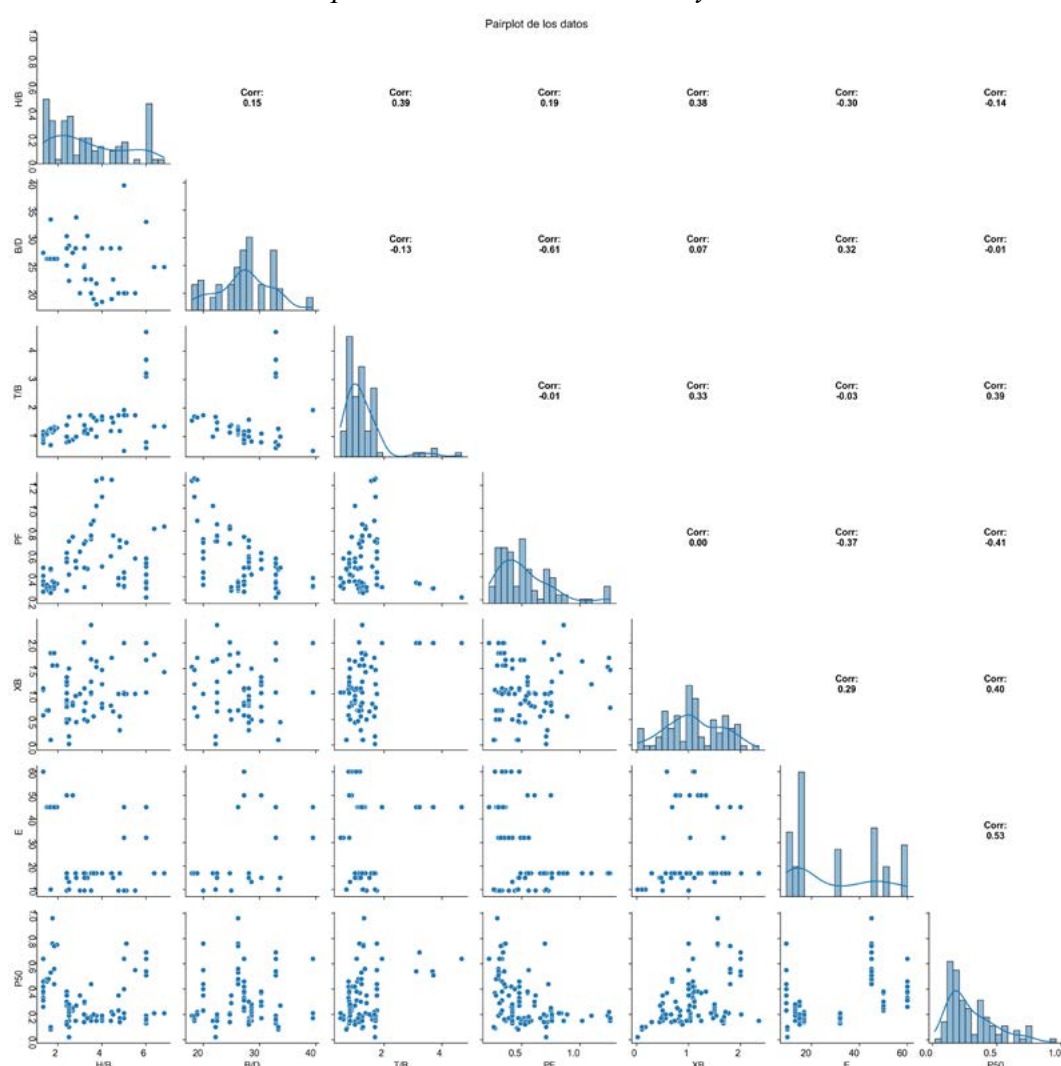
La regresión KRR es una técnica de aprendizaje automático utilizada para modelar relaciones no lineales en la predicción de la fragmentación de rocas durante voladuras mineras, destacándose por su alta precisión (Wu et al., 2024). Emplea funciones de kernel para trasladar datos a espacios dimensionales más altos y aplica regularización ridge para prevenir el sobreajuste, lo que mejora la solidez de las predicciones (Lin, 2023). El procedimiento inicia con la recopilación de datos a partir de investigaciones de campo o simulaciones, separándolos en grupos de entrenamiento y de prueba (R. Zhang et al., 2023). Se entrena el modelo KRR optimizando el hiperparámetro de coeficiente de kernel. Métodos como KRR autoadaptativo mejoran el rendimiento, medido con métricas estándar, garantizando así pronósticos precisos y consistentes (Yin et al., 2020).

Resultados y Discusión

Análisis estadístico

La Figura 3 representa el diagrama de pairplot, que muestra conexiones relevantes entre las variables del estudio, dispuestas de acuerdo con su tipo y fuerza. En las correlaciones positivas, se detectaron desde débiles a moderadas (0.31 a 0.48), destacando XB-P50 y E-P50 (ambas 0.48), las cuales evidenciaron tendencias claramente en aumento y un agrupamiento notable de los puntos. Por otra parte, T/B-P50 (0.42) y H/B-T/B (0.39) mostraron una concentración inferior. Respecto a las correlaciones pequeñas (0.15 a 0.20), como S/B-H/B (0.16) y XB-E (0.20), se observó una considerable dispersión. Dado que los coeficientes de correlación van de moderados a bajos, no existe una multicolinealidad significativa entre las variables. Por ello, se justifica su uso en un modelo predictivo, donde se definen claramente los roles de variable independiente y dependiente.

Figura 3
Pairplot de los datos de entrada y salida

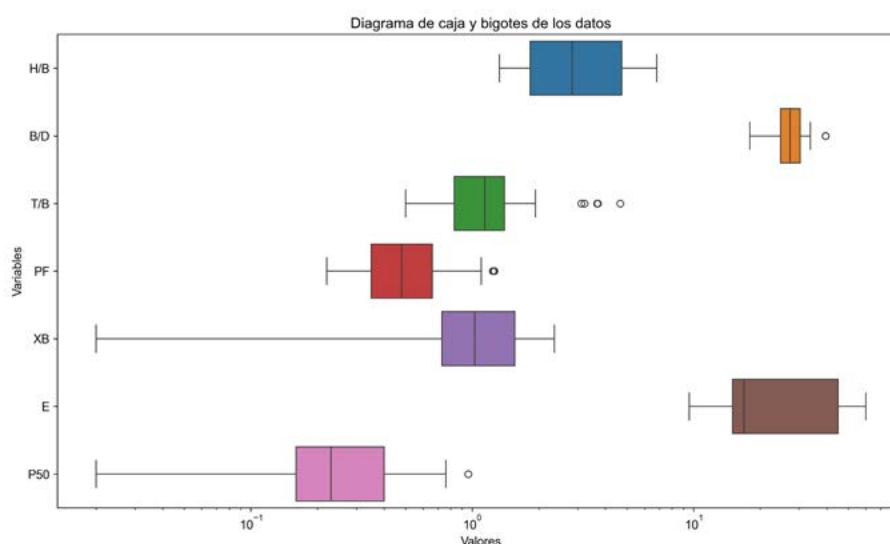


Los histogramas en diagonal del pairplot apoyaron este análisis, exhibiendo distribuciones asimétricas (S/B con sesgo hacia la derecha), uniformes (H/B entre 2.5 y 5) y simétricas (XB centrado en valores promedios). En situaciones de correlaciones negativas, estas fluctuaron entre bajas (-0.22 a -0.45) y moderadamente altas (-0.60), destacándose PF-B/D (-0.60) como la más robusta, con una clara tendencia a la baja, seguida por PF-P50 (-0.45) y PF-XB (-0.41). Las relaciones débiles negativas (B/D-T/B: -0.10; T/B-PF: -0.03) exhibieron patrones que se

asemejan a la aleatoriedad; además, los histogramas destacaron características relevantes en la distribución: B/D se concentra entre 20 y 40, T/B presenta un sesgo hacia la izquierda y P50 tiene una distribución ajustada alrededor de un valor medio. Al exhibir patrones que no siguen una línea recta, estos diagramas confirman la ausencia de una correlación lineal, lo cual justifica plenamente la implementación de un modelo de IA para capturar la complejidad inherente de estas relaciones.

El gráfico de caja y bigotes (Figura 4) ilustra la distribución logarítmica de las variables S/B, H/B, B/D, T/B, PF, XB, E y P50. En el caso de S/B, B/D y P50, existe una importante concentración, con cajas compactas; S/B presenta una mediana cercana a 10^1 y un rango limitado (10^0 - 10^1). En comparación, H/B, T/B, PF, XB y E exhiben una dispersión más amplia. H/B presenta un 50 % central extenso, con una mediana de 10^1 , en tanto que T/B y XB exhiben amplios rangos intercuartílicos y medianas próximas a 10^0 . Los valores atípicos de S/B, T/B y PF (círculos) muestran desviaciones importantes, lo que refleja la variabilidad presente en los datos.

Figura 4
Diagrama de caja y bigotes de las variables del estudio



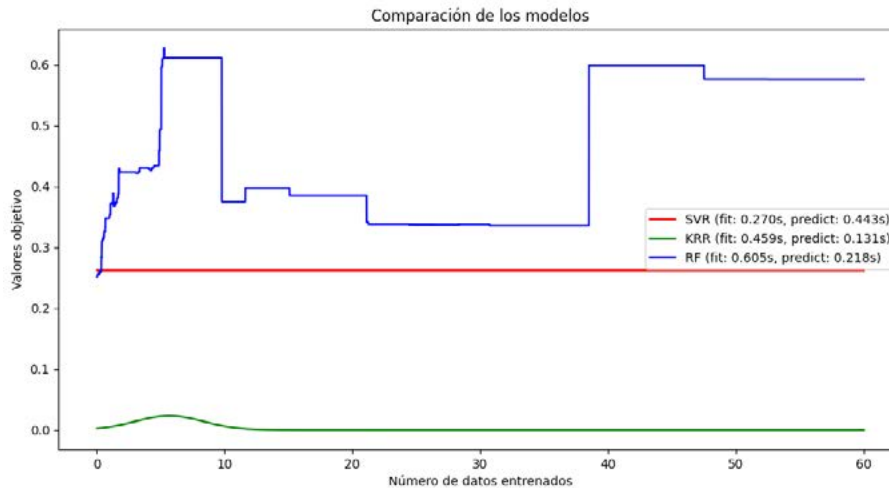
Aunque los diagramas de caja resaltan la variabilidad y la presencia de valores atípicos que sugieren comportamientos inusuales, estos son escasos y, por lo tanto, no afectan significativamente al modelo, obviando la necesidad de un análisis especial. Esta variabilidad, particularmente en P50 y el factor de pólvora, subraya la diversidad de reacciones de cada unidad litológica a la explosión, lo que resalta la importancia de desarrollar modelos adaptativos para optimizar los procesos mineros.

Entrenamiento de los algoritmos de IA

El entrenamiento de los tres modelos de IA revela las variaciones en su habilidad para hacer predicciones (Figura 5). El modelo SVR (línea roja) muestra una gran consistencia, con valores de objetivo alrededor de 0.26 y sin cambios significativos. Por otra parte, KRR (verde) muestra valores cercanos a cero, con un ligero incremento al inicio, permaneciendo casi constante, lo que indica una reacción mínima. Por otro lado, RF (azul) exhibe una conducta más activa, con cambios destacados y picos que sobrepasan el 0.60, logrando una mejor comprensión de las variaciones del objetivo. En relación con los tiempos de procesamiento, el modelo RF requiere 0.152 segundos para el entrenamiento y 0.254 segundos para la predicción. KRR es más eficiente, con un tiempo de entrenamiento de 0.296 segundos y un tiempo de predicción

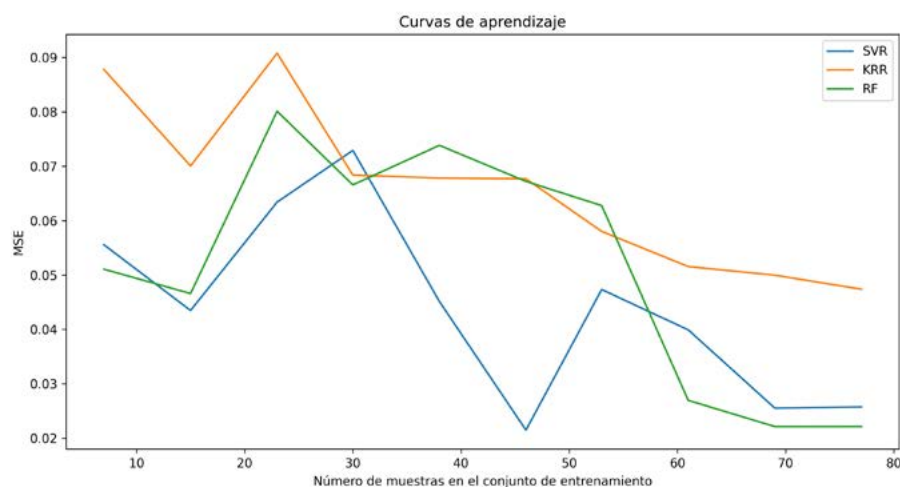
de 0.154 segundos. SVR, aunque se asemeja a KRR en su proceso de entrenamiento, requiere 0.506 segundos para realizar la predicción. RF se caracteriza por su capacidad de adaptación, mientras que KRR y SVR proporcionan mayor estabilidad, aunque son menos receptivos a las variaciones en los datos.

Figura 5
Comparación del rendimiento de los modelos de IA empleados



Por otra parte, en la Figura 6, el modelo KRR presenta un comportamiento más inestable y es muy sensible a la cantidad de datos que se le suministran. Se pueden observar picos de error en los valores intermedios, particularmente cerca de las 20 muestras, donde el MSE excede 0.09. A pesar de que su desempeño presenta una ligera mejora más adelante, nunca consigue igualar la precisión del SVR ni del RF, lo que sugiere modificaciones en su regularización o en las funciones kernel que emplea. Respecto al modelo RF, muestra una trayectoria más variable, particularmente entre las 20 y 55 muestras, lo que podría indicar una inclinación al sobreajuste en conjuntos pequeños o medianamente grandes. No obstante, a partir de las 60 muestras, el error se reduce considerablemente y se mantiene alrededor de 0.025, convirtiéndose en uno de los más destacados en esa sección del gráfico.

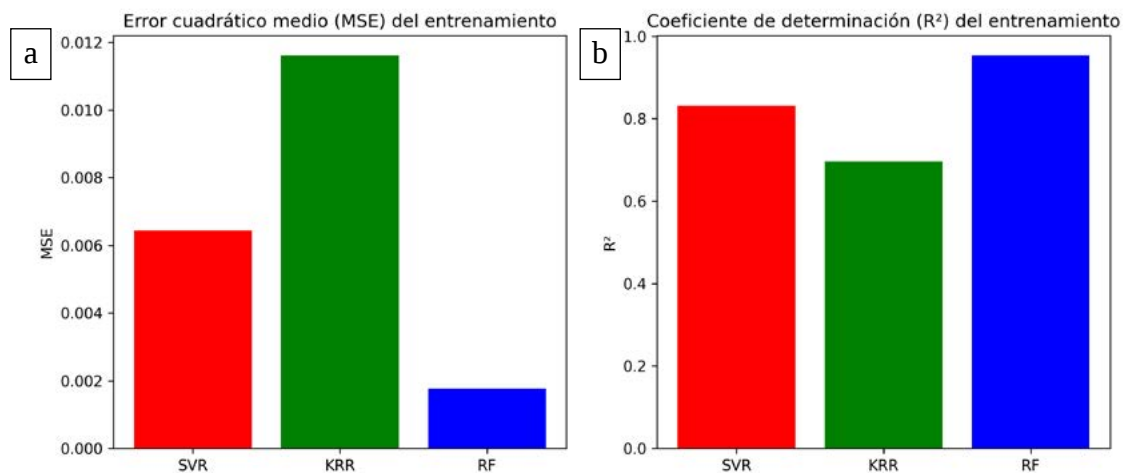
Figura 6
Curvas de aprendizaje de cada uno de los modelos empleados



En la Figura 7, el gráfico de la izquierda (a) ilustra el MSE durante el entrenamiento. Se observa que el modelo RF sobresale, alcanzando el menor error con un valor de 0.0017638. Por otro lado, el modelo KRR presentó el MSE más elevado, aproximadamente 0.0116156, lo que sugiere que no se adaptó con la misma eficacia a los datos de entrenamiento. El modelo SVR se encontró en una posición intermedia, con un MSE aproximado de 0.0064449. El gráfico de la derecha (b) muestra un conjunto de resultados que se alinean con la métrica mencionada anteriormente. El modelo RF obtuvo el R^2 más alto (95.38 %), lo que indica que este modelo es capaz de explicar una gran parte de la variación en los datos de entrenamiento. En contraste, el modelo KRR presentó el valor de R^2 más bajo, cercano a 69.60 %, que señala menor habilidad para captar la varianza. Una vez más, el modelo SVR se situó en el medio, obteniendo un R^2 de 83.13 %.

Figura 7

Métricas de evaluación para el análisis de los algoritmos empleados



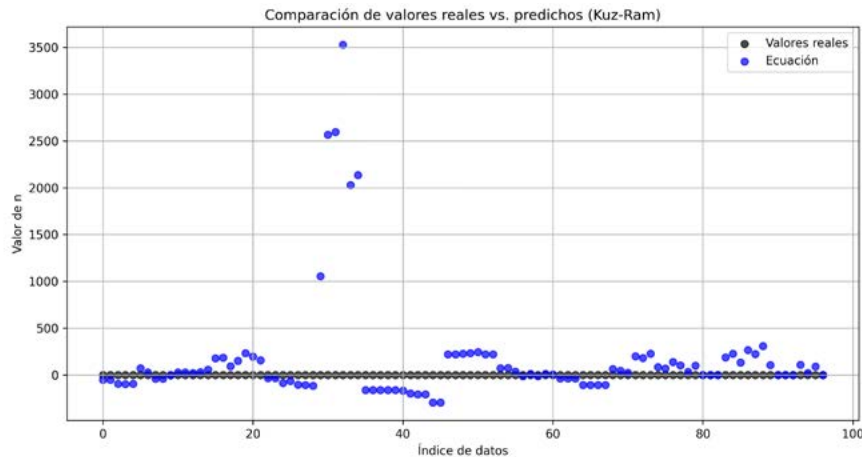
Evaluación

La Figura 8 muestra la conexión y las discrepancias entre un grupo de valores reales y aquellos que se obtienen de la ecuación Kuz-Ram, a lo largo de un índice de datos. Los valores reales, indicados con puntos grises, exhiben una disposición predominantemente horizontal. En contraste, los valores estimados por la ecuación, representados como puntos azules, normalmente siguen el mismo rumbo que los valores reales en la mayor parte de los puntos de datos, permaneciendo cerca del eje. No obstante, existe una marcada diferencia en algunos segmentos, particularmente entre los índices 30 y 40, donde la ecuación sugiere valores que son considerablemente más elevados que los reales, alcanzando máximos que exceden los 2500 e incluso sobrepasando los 3500. Esta discrepancia pone de relieve la limitación del modelo predictivo para entender la dinámica esencial en esos puntos concretos, aunque, en la mayoría del conjunto de datos, la ecuación parece ajustarse con notable precisión a los valores observados.

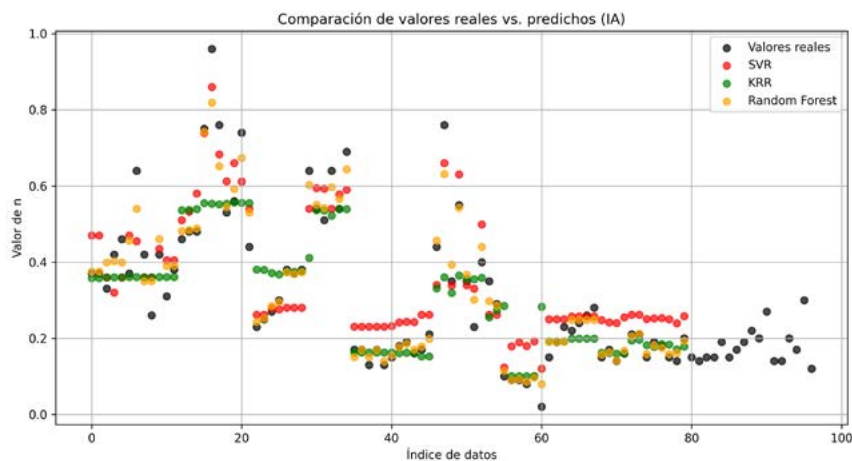
La Figura 9 presenta una comparación del desempeño de los tres algoritmos de aprendizaje automático en la predicción de valores frente a los valores reales. Se observa que los tres métodos de IA son capaces, en gran parte, de coincidir con los valores reales, lo que indica que han logrado identificar algunas pautas en los datos fundamentales. No obstante, se pueden notar variaciones en su capacidad de predicción; en ciertos segmentos del índice de datos, el modelo RF puede coincidir más estrechamente con los valores reales que los otros, mientras que, en otros, se aprecia una desviación más evidente. A medida que el índice de datos avanza, hay variaciones en la precisión, con cambios que muestran las particularidades y habilidades específicas de cada algoritmo para generalizar a partir de los datos utilizados en su entrenamiento.

Figura 8

Comparativa entre los valores predichos por la ecuación Kuz-Ram y los valores reales

**Figura 9**

Comparativa entre los valores predichos por los modelos IA y los valores reales



En la valoración de los modelos de IA, la capacidad de adaptación y la eficiencia en el uso de computadoras son aspectos fundamentales que muestran una narrativa compleja acerca del desempeño de RF, SVR y KRR. El modelo RF, similar a un camaleón digital, muestra una destacada habilidad para seguir el comportamiento de la variable objetivo, variando de forma significativa y, en numerosas ocasiones, aproximándose con una notable precisión a los valores reales del proceso de fragmentación. Esta capacidad de predicción, demostrada por su mínimo MSE durante el proceso de entrenamiento y un R^2 que se aproxima a la perfección (cercano a 0.98), lo establece como un estándar en la comprensión de la complejidad de los datos, alcanzando un porcentaje de efectividad en el ajuste del 95 % o superior.

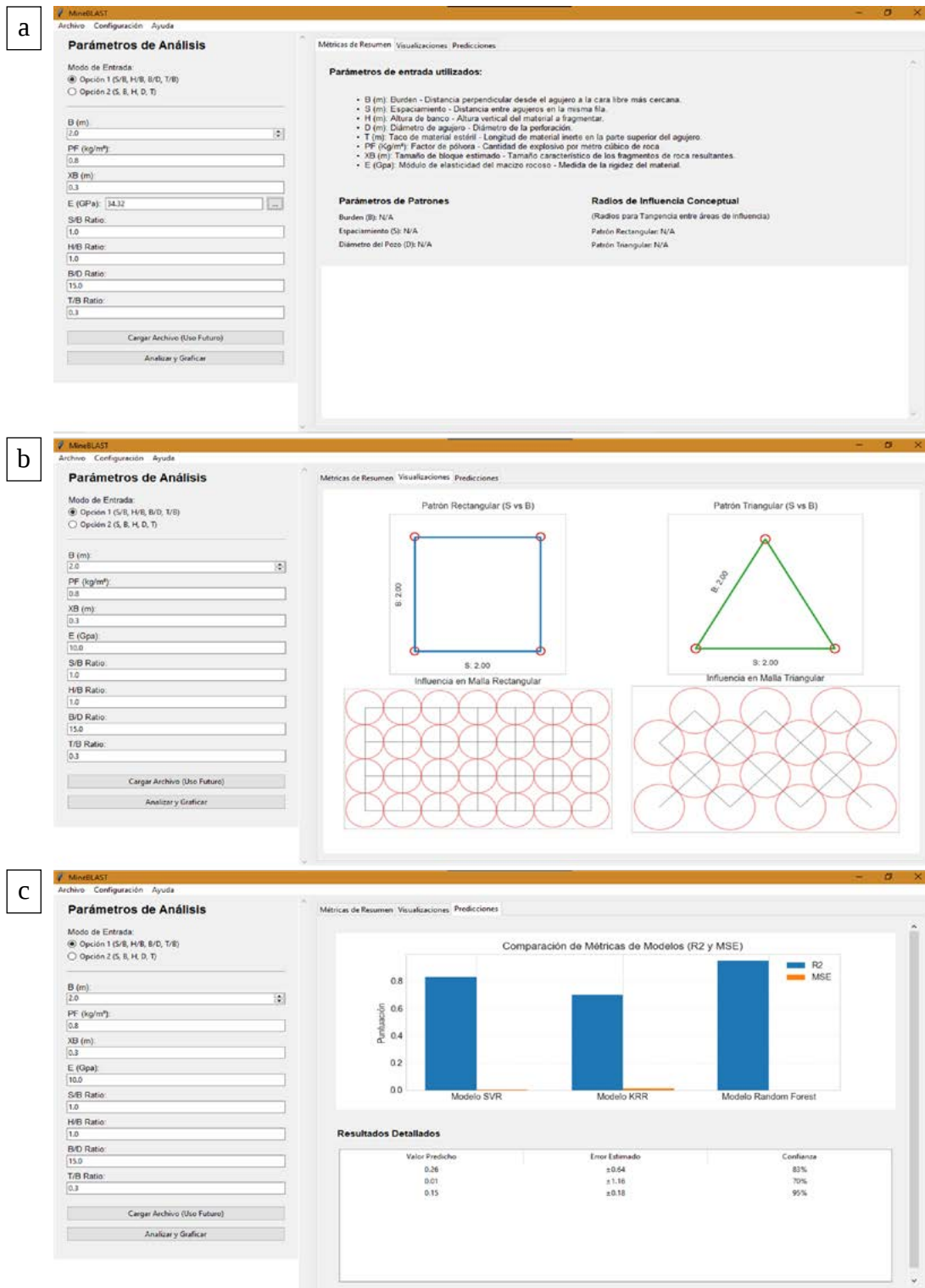
No obstante, esta habilidad para predecir implica un precio. Al examinar las métricas temporales, el modelo RF es el más lento en la etapa de predicción, exhibiendo tiempos de ejecución consistentemente más elevados que sus equivalentes SVR y KRR (superando 10–2 segundos en la mayoría de los tamaños de entrenamiento), además de mostrar un mayor tiempo de ajuste en ciertos intervalos. La característica fundamental del RF, que analiza un conjunto de árboles para efectuar cada predicción, conlleva una mayor necesidad de capacidad de procesamiento. En situaciones donde la respuesta inmediata es esencial, esto podría comprometer su funcionalidad práctica. Por lo tanto, RF hace que la predicción sea más comprensible al mostrar la realidad: su debilidad se encuentra en el tiempo que requiere para ofrecer sus pronósticos, un aspecto que no se puede ignorar en el ámbito de una aplicación práctica en minería.

Aplicación

El buen desempeño de nuestros modelos de IA ha sido transformado en una solución tangible: una aplicación de software desarrollada en Python y Visual Studio Code. Esta herramienta práctica para predecir la fragmentación de rocas ofrece una interfaz que logra, a través de un botón, conectar los modelos entrenados, previamente guardados y codificados en un archivo binario (.pkl), permitiendo que, al presionar el botón, el sistema decodifique este archivo, reconstruyendo el modelo en memoria para procesar los datos de entrada del usuario y realizar el cálculo eficiente del tamaño medio de fragmentación de la roca. La Figura 10 muestra la interfaz del usuario, que se estructura en tres vistas diferentes, cada una enfocada en un aspecto esencial del estudio de parámetros en voladura y la valoración de modelos de IA. Su diseño está concebido para promover la interacción con las personas, con el propósito de hacer más comprensible la complejidad de los datos y los algoritmos, proporcionando una visión de la mente que subyace a la fragmentación de la roca.

En la primera pantalla (a), denominada "Parámetros de Análisis", observamos un panel de control bastante accesible que facilita enormemente la introducción de datos para el usuario. Se tiene la posibilidad de cargar documentos que contienen información específica sobre perforación y voladura. Existen opciones como "Modo de Entrada", que aparenta señalar si la información es histórica o si corresponde a un diseño reciente, y "Opción", que sugiere una elección de diversos escenarios de análisis, siendo "Opción 1", la relación de "Parámetros de Entrada" comprende variables esenciales tales como "S/B" (Relación Espaciamento/Burden), "H/B" (Relación Altura de banco/Burden), "B/D" (Relación Burden/Diámetro de agujero), "PF" (Factor de pólvora), "XB" (Tamaño de bloque) y "E" (Módulo de elasticidad) y "Opción 2" considerando las variables "B (m)" (Burden), "D (m)" (Diámetro de agujero), "S (m)" (Espaciamento), "H" (Altura del banco), "T" (Taco inerte), "PF" (Factor de pólvora), "XB" (Tamaño de bloque) y "E" (Módulo de elasticidad). Esta parte se presenta como la introducción de la interfaz, el espacio donde el operador puede utilizar su comprensión del terreno y de la voladura en el sistema. Asimismo, en la esquina superior derecha, se encuentra una sección titulada "Parámetros de Entrada Utilizados", que proporciona conceptos breves sobre cada variable, actuando como un glosario en el mismo lugar. Esto facilita la comprensión de la terminología técnica, permitiendo al usuario interactuar con mayor seguridad en el vocabulario del franqueo de roca. Los "Parámetros de Patrones" y "Radios de Influencia Conceptual" ofrecen un contexto adicional, definiendo las configuraciones habituales y las consecuencias espaciales de la voladura, lo cual refleja la realidad física de la mina.

La segunda sección (b), denominada "Visualizaciones", nos invita a descubrir el interesante ámbito de la comprensión espacial de los patrones de perforación. En este lugar, podemos observar dos diagramas esquemáticos: uno que representa un "Patrón Rectangular (S vs B)" y otro que representa un "Patrón Triangular (S vs B)". Estos gráficos, con radios de metros, no solo ilustran la disposición geométrica de la malla de perforación, sino que también nos facilitan la comprensión de la "Influencia en Malla Rectangular" e "Influencia en Malla Triangular" mediante representaciones de la fragmentación conceptual. Esta parte es un claro ejemplo de cómo la interfaz funciona como un traductor visual: transforma cifras y conceptos en imágenes que un ingeniero puede entender y con las que puede interactuar en su mente. La habilidad de observar el impacto de la malla es fundamental, ya que permite al usuario entender rápidamente cómo la organización de los barrenos influye en la distribución de la energía explosiva y, por lo tanto, en la fragmentación. En este punto, la abstracción matemática se convierte en algo concreto.

Figura 10*Interfaz gráfica de la aplicación y ejemplo de cálculo del tamaño medio de fragmentación*

Finalmente, la tercera vista (c), "Predicciones", representa el punto más importante del proceso de análisis, en el que los modelos de IA presentan sus conclusiones. A continuación, se muestra un gráfico de barras titulado "Comparación de Métricas de Modelos (R^2 y MSE)", que resume el rendimiento de los modelos SVR, KRR y RF. En esta plataforma, los datos estadísticos se presentan de manera visualmente atractiva: el modelo RF se destaca como el mejor en R^2 , alcanzando aproximadamente 0.98, y exhibe un MSE notablemente bajo, lo que sugiere un ajuste

casi ideal a los datos de entrenamiento. SVR presenta un R^2 de aproximadamente 0.8, mientras que KRR se encuentra ligeramente rezagado. Este panel funciona como la decisión del jurado algorítmico, permitiendo al usuario reconocer de manera rápida qué modelo ha demostrado ser el más efectivo para predecir la fragmentación. Más adelante, la parte titulada "Resultados Detallados" proporciona un análisis más exhaustivo de las predicciones, exhibiendo "Valor Predicho" de P50, "Desviación Estimada" y "Confianza", lo que proporciona una dimensión adicional de interpretación y permite al usuario comprender el pronóstico.

Conclusiones

Este estudio ha demostrado la implementación de los algoritmos Random Forest (RF), Support Vector Regressor (SVR) y Kernel Ridge Regressor (KRR) para la predicción de la fragmentación óptima de la roca en minería, lo que mejora considerablemente la eficiencia operativa. Los resultados indican que RF superó a los demás en términos de precisión, logrando un error cuadrático medio bajo que ronda el 0.13 % y un valor R^2 cercano a los valores objetivo del conjunto de datos.

El mejor desempeño de los modelos de IA y su habilidad para capturar las complejas interrelaciones entre los parámetros de perforación y voladura (espaciamiento, burden, diámetro de agujero, altura de banco y taco de estéril), de la roca (módulo de elasticidad) y el tamaño medio de los fragmentos (P50), demuestran que son una alternativa más conveniente que el método de estimación convencional.

Los bajos valores de MSE obtenidos por los modelos de IA confirman que los factores geotécnicos y operativos son predictores válidos para la fragmentación de las rocas. Este hallazgo es relevante, ya que demuestra la capacidad de los modelos para manejar la variabilidad inherente a la composición litológica. Además, la matriz de correlación muestra conexiones significativas, como la relación inversa entre el factor de pólvora y la relación carga/diámetro, el módulo de elasticidad o el tamaño promedio de fragmentación (P50), indicando que un mayor uso de pólvora tiende a reducir estos valores.

Se resalta la importancia de contar con una aplicación que convierta resultados complicados de modelos de IA en información comprensible. Mostrar gráficos de fragmentación y previsiones, permite a los usuarios trabajar con datos, simular situaciones de voladura y modificar parámetros geotécnicos, asistiendo a estudiantes y profesionales sin necesitar conocimientos profundos en decisiones cotidianas en minería.

Si bien los modelos presentados han demostrado su eficacia, su rendimiento podría optimizarse al aumentar la calidad y la cantidad de los datos de entrenamiento. Aunque la recolección de datos asociados con el uso de explosivos es un desafío por la escasa accesibilidad y la alta sensibilidad, se sugieren indicadores clave de desempeño (KPI) del proceso de voladura, el precio del material (USD/Ton) y los gastos que conlleva extraerlo. Además, el resultado P50 se puede complementar con sus homólogos P20 y P80, permitiendo trazar una curva granulométrica aproximada.

Finalmente, los estudios futuros pueden identificar y caracterizar otros factores influyentes para la fragmentación (ej. RMR, Q de Barton) ligados al tipo de roca, lo cual es esencial para mejorar los diseños de voladuras, minimizar la incertidumbre y garantizar resultados fiables en las operaciones mineras.

Reconocimientos y Declaraciones

Los autores declaran que, en la elaboración de este artículo, se han utilizado las siguientes herramientas de inteligencia artificial: Research Rabbit (versión 2025), Consensus (versión 2025) y Elicit (versión 2025). Consensus y Elicit se usaron para encontrar respuestas y resumir artículos científicos, ayudando en la recopilación de información bibliográfica. Research Rabbit se usó para encontrar documentos relacionados y construir mapas de citaciones, optimizando la revisión de literatura.

Los autores declaran la contribución y participación equitativa de roles de autoría para esta publicación.

Referencias

- Amoako, R., Jha, A., & Zhong, S. (2022). Rock Fragmentation Prediction Using an Artificial Neural Network and Support Vector Regression Hybrid Approach. *Mining*, 2(2), 233–247. <https://doi.org/10.3390/mining2020013>
- Aryafar, A., Rahimdel, M. J., & Tavakkoli, E. (2020). Selection of the most proper drilling and blasting pattern by using madm methods (A case study: Sangan iron ore mine, iran). *Rudarsko Geolosko Nafni Zbornik*, 35(3), 97–108. <https://doi.org/10.17794/rgn.2020.3.10>
- Bunga, A. P., Noguel, J. A. O., & Quesada, R. W. (2019). Predicción y evaluación de la granulometría de la pila de material obtenido en las voladuras en la mina Prediction and assessment of material gradation obtained through blasting in Polymetallic Castellano mine , Pinar del Río , Cuba. *Ciencia & Futuro*, 10(1), 37–49. <https://doi.org/ISSN 2306-823X>
- Das, R. K., Dhekne, P. Y., & Murmu, S. (2023). Development of a Multiplication Factor for the Kuz-Ram Model to Match the Fragment Size Obtained from Wipfrag Image Analysis. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 71(12), 2414–2425. <https://doi.org/10.18311/jmmf/2023/34116>
- de Castro, D. F. (2021). Comparative analysis of fragmentation models for underground blasting. *UNDERGROUND MINING ENGINEERING 39 (2021) 29-42 UNIVERSITY OF BELGRADE - FACULTY OF MINING AND GEOLOGY FACULTY OF MINING AND GEOLOGY*, 39(39), 29–42. <https://doi.org/10.5937/podrad2139029f>
- Górriz, J. M., Álvarez-Illán, I., Álvarez-Marquina, A., Arco, J. E., Atzmueller, M., Ballarini, F., Barakova, E., Bologna, G., Bonomini, P., Castellanos-Dominguez, G., Castillo-Barnes, D., Cho, S. B., Contreras, R., Cuadra, J. M., Domínguez, E., Domínguez-Mateos, F., Duro, R. J., Elizondo, D., Fernández-Caballero, A., ... Ferrández-Vicente, J. M. (2023). Computational approaches to Explainable Artificial Intelligence: Advances in theory, applications and trends. *Information Fusion*, 100(July), 101945. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2023.101945>
- Guerrero-Rodriguez, B., Salvador-Meneses, J., Garcia-Rodriguez, J., & Mejia-Escobar, C. (2024). Improving Landslides Prediction: Meteorological Data Preprocessing Based on Supervised and Unsupervised Learning. *Cybernetics and Systems*, 55(6), 1332–1356. <https://doi.org/10.1080/01969722.2023.2240647>
- Hasanipanah, M., Amnieh, H. B., Arab, H., & Zamzam, M. S. (2018). Feasibility of PSO–ANFIS model to estimate rock fragmentation produced by mine blasting. *Neural Computing and Applications*, 30, 1015–1024. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2746-1>
- Hekmat, A., Munoz, S., & Gomez, R. (2019). Prediction of Rock Fragmentation Based on a Modified Kuz-Ram Model. En *Proceedings of the 27th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection - MPES 2018* (pp. 69–79). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99220-4_6
- Hu, J., Song, Z., Si, J., Cao, G., Nie, L., & Chen, A. (2023). Prediction of Rock Mass Parameters Based on PCA and Random Forest Method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41, 4629–4640. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02536-z>

- Hudaverdi, T., Kulatilake, P. H. S. W., & Kuzu, C. (2006). Prediction of blast fragmentation using multivariate analysis procedures. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 30(13), 1303–1336. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/nag.957>
- Kuznetsov, V. M. (1973). The mean diameter of fragments formed by blasting rock. *Journal of Mining Science*, 9(2), 144–148. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02506177>
- Lawal, A. I. (2021). A new modification to the Kuz-Ram model using the fragment size predicted by image analysis. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2020.104595>
- Leng, Z., Fan, Y., Gao, Q., & Hu, Y. (2020). Evaluation and optimization of blasting approaches to reducing oversize boulders and toes in open-pit mine. *International Journal of Mining Science and Technology*, 30(3), 373–380. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.03.010>
- Li, E., Yang, F., Ren, M., Zhang, X., Zhou, J., & Khandelwal, M. (2021). Prediction of blasting mean fragment size using support vector regression combined with five optimization algorithms. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 13(6), 1380–1397. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.07.013>
- Lin, S.-B. (2023). *Adaptive Parameter Selection for Kernel Ridge Regression*.
- López, E., López, C., Ortiz, F., & Pernia, J. (2003). Manual de Perforación y Voladura de Rocas. En *Ingeopress*. http://www.entornografico.com/ingeopres/Ing_119/ing119_sum.htm
- Miao, Y., Zhang, Y., Wu, D., Li, K., Yan, X., & Lin, J. (2021). Rock Fragmentation Size Distribution Prediction and Blasting Parameter Optimization Based on the Muck-Pile Model. En *Mining, Metallurgy and Exploration* (Vol. 38, pp. 1071–1080). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s42461-021-00384-0>
- Mwango, V. (2015). Optimization of Blasting Parameters-A case study of Nchanga Open Pits. *INTERNATIONAL JOURNAL OF SCIENTIFIC & TECHNOLOGY RESEARCH*, 4(September 2015), 45–51. <https://doi.org/ISSN 2277-8616>
- Ohadi, B., Sun, X., Esmaili, K., & Consens, M. P. (2020). Predicting blast-induced outcomes using random forest models of multi-year blasting data from an open pit mine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 79(1), 329–343. <https://doi.org/10.1007/s10064-019-01566-3>
- Rabbani, A., Samadi, H., Fissaha, Y., Agarwal, S. P., Balsara, S., Rai, A., Kawamura, Y., & Sharma, S. (2024). A comprehensive study on the application of soft computing methods in predicting and evaluating rock fragmentation in an opencast mining. *Earth Science Informatics*, 17(6), 6019–6034. <https://doi.org/10.1007/s12145-024-01488-z>
- Raj, A. K., Choudhary, B. S., & Deressa, G. W. (2024). Prediction of Rock Fragmentation for Surface Mine Blasting Through Machine Learning Techniques. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series D*. <https://doi.org/10.1007/s40033-024-00812-7>
- Rojas Linares, E. L. (2018). Un nuevo enfoque predictivo de la fragmentación en la Voladura de Rocas. *Industrial Data*, 21(1), 17–26. <https://doi.org/10.15381/idata.v21i1.14907>
- Rosales-Huamani, J. A., Perez-Alvarado, R. S., Rojas-Villanueva, U., & Castillo-Sequera, J. L. (2020). Design of a predictive model of rock breakage by blasting using artificial neural networks. *Symmetry*, 12(9), 1–17. <https://doi.org/10.3390/SYM12091405>
- Saadoun, A., Boukarm, R., Fredj, M., Menacer, K., Boudjellal, D., Hafsaoui, A., & Yilmaz, I. (2024). Optimal Blast Design Considering the Effects of Geometric Blasting Parameters on Rock Fragmentation : A Case Study. In *World Summit: Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Congress*, 1, 136–146. <https://doi.org/10.3897/ap.7.e0146>
- Shafli, A. (2024, octubre 1). *Random Forest Classification with Scikit-Learn*. datacamp. <https://www.datacamp.com/tutorial/random-forests-classifier-python>

- Su, H., & Ma, S. (2022). Study on the stability of high and steep slopes under deep bench blasting vibration in open-pit mines. *Frontiers in Earth Science*, 10(September), 1–15. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.990012>
- Vu, T., & Bao, T. (2021). Development of a predictive model of rock fragmentation for Nui Phao open-pit mine in Vietnam using multiple-output Neural Networks and Monte Carlo Dropout technique. *ResearchSquare*, 1, 1–14. <https://doi.org/https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-171960/v1>
- Wu, Z., Wu, Y., Weng, L., Li, M., Wang, Z., & Chu, Z. (2024). Machine learning approach to predicting the macro-mechanical properties of rock from the meso-mechanical parameters. *Computers and Geotechnics*, 166. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105933>
- Xie, C., Nguyen, H., Bui, X. N., Choi, Y., Zhou, J., & Nguyen-Trang, T. (2021). Predicting rock size distribution in mine blasting using various novel soft computing models based on meta-heuristics and machine learning algorithms. *Geoscience Frontiers*, 12(3), 101108. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.11.005>
- Yakovlev, V. L., Zharikov, S. N., Regotunov, A. S., & Kutuev, V. A. (2024). Methodological basis for adaptation of the drilling and blasting parameters to changing mining and geological conditions when mining complex-structured deposits. *Mining Industry Journal (Gornay Promishlennost)*, 6, 89–97. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-6-89-97>
- Yin, R., Liu, Y., Wang, W., & Meng, D. (2020). Sketch Kernel Ridge Regression Using Circulant Matrix: Algorithm and Theory. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 31, 3512–3524. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2019.2944959>
- Zamora-Paredes, V., Arauzo-Gallardo, L., Raymundo-Ibanez, C., & Perez, M. (2020). Optimal mesh design methodology considering geometric parameters for rock fragmentation in open-pit mining in the Southern Andes of Peru. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 758(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/758/1/012015>
- Zhang, R., Li, Y., & Gui, Y. (2023). Prediction of rock blasting induced air overpressure using a self-adaptive weighted kernel ridge regression. *Applied Soft Computing*, 148. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110851>
- Zhang, Y. L., Qin, Y. G., Armaghani, D. J., Monjezi, M., & Zhou, J. (2024). Enhancing rock fragmentation prediction in mining operations: A Hybrid GWO-RF model with SHAP interpretability. *Journal of Central South University*, 31(8), 2916–2929. <https://doi.org/10.1007/s11771-024-5699-z>
- Zhao, J., Li, D., Zhou, J., Armaghani, D. J., & Zhou, A. (2024). Performance evaluation of rock fragmentation prediction based on RF-BOA, AdaBoost-BOA, GBoost-BOA, and ERT-BOA hybrid models. *Deep Underground Science and Engineering*, 4, 3–17. <https://doi.org/10.1002/dug2.12089>

Ticec²⁰²⁵

Visión por computador, multimedia y monitoreo ambiental/seguridad

Computer vision, multimedia, and
environmental/security monitoring

Evaluación y Comparación de Métricas Objetivas PSNR, SSIM y LPIPS para el Análisis de Calidad de Video

Evaluation and Comparison of Objective Metrics PSNR, SSIM, and LPIPS for Video Quality Analysis

Carlos Flores Maza¹ <https://orcid.org/0009-0001-6915-3158>,
Santiago González Martínez¹ <https://orcid.org/0000-0001-6604-889X>

¹Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador
bladimir.flores@ucuenca.edu.ec,
santiago.gonzalezm@ucuenca.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2025/05/08

Aceptado: 2025/08/20

Publicado: 2025/10/15

Resumen

Este artículo presenta una herramienta para la evaluación de la calidad de video, que permite seleccionar parámetros de escalabilidad de calidad (QP), temporal (FPS) y espacial (bitrate). La propuesta integra métricas tradicionales como *Peak Signal-to-Noise Ratio* (PSNR) y *Structural Similarity Index* (SSIM), junto con la métrica perceptual *Learned Perceptual Image Patch Similarity* (LPIPS), basada en redes neuronales profundas. Para validar su efectividad, se aplicó una metodología en dos fases de evaluación subjetiva. En la primera, los participantes evaluaron videos codificados con un mismo parámetro de escalabilidad, mostrando alta correspondencia entre la percepción visual y las métricas. En la segunda, se compararon diferentes configuraciones, evidenciando preferencia por alta calidad y escalabilidad espacial intermedia. Asimismo, en experimentos adicionales con distorsiones comunes (difuminado y ruido), LPIPS alcanzó una sensibilidad del 73.64 %, superando a PSNR y SSIM en su alineación con la percepción humana. La principal contribución de este trabajo es una herramienta que combina evaluaciones objetivas y subjetivas, facilitando un análisis más completo y cercano a la percepción visual humana.

Palabras clave: escalabilidad, PSNR, SSIM, LPIPS, calidad de video, objetivo, subjetivo.

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión, Conclusiones.

Cómo citar: Flores, C. & González, S. (2025). Evaluación y Comparación de Métricas Objetivas PSNR, SSIM y LPIPS para el Análisis de Calidad de Video. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 56-76.
<https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1317>

Abstract

This paper presents a tool for video quality assessment that allows the selection of quality (QP), temporal (FPS), and spatial (bitrate) scalability parameters. The proposal integrates traditional metrics such as Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) and Structural Similarity Index (SSIM), together with the perceptual metric Perceptual Image Patch Similarity (LPIPS), which is based on deep neural networks. To validate its effectiveness, a two-phase subjective evaluation methodology was applied. In the first phase, participants assessed videos encoded with the same scalability parameter, showing a strong correspondence between visual perception and objective metrics. In the second phase, different configurations were compared, revealing a preference for high quality and intermediate spatial scalability. Additionally, in experiments with common distortions such as blurring and noise, LPIPS achieved a sensitivity of 73.64%, outperforming PSNR and SSIM in its alignment with human perception. The main contribution of this work is a tool that combines objective and subjective evaluations, enabling a more comprehensive analysis that closely reflects human visual perception.

Keywords: scalability, PSNR, SSIM, LPIPS, video quality, objective, subjective.

Introducción

La evaluación de la calidad visual en imágenes y videos es un desafío clave en campos como la transmisión de video, la realidad aumentada, la restauración de imágenes, la síntesis de superresolución y las aplicaciones médicas (Huynh-Thu y Ghanbari, 2012). Tradicionalmente, se han empleado métricas como Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) (Izquierdo, 2017) y Structural Similarity Index (SSIM) (Huynh-Thu y Ghanbari, 2012). Aunque útiles por su simplicidad, estas métricas no capturan adecuadamente las complejidades de la percepción visual humana, pues suelen ser poco sensibles a distorsiones perceptuales relevantes para la experiencia del espectador (Hou et al., 2022; J. Wang et al., 2023).

Con el avance de la inteligencia artificial, han surgido métricas basadas en redes neuronales profundas que modelan de mejor manera la percepción visual. Entre ellas destacan Perceptual Image Patch Similarity (LPIPS) y Perceptual image-error Assessment through Pairwise Preference (PieAPP), que han mostrado un alineamiento más estrecho con la evaluación subjetiva humana (Prashnani et al., 2018; R. Zhang et al., 2018). Estudios recientes confirman su superioridad frente a PSNR y SSIM en distintas tareas de restauración y superresolución (K. Zhang et al., 2021; S. Zhang et al., 2023), teniendo en cuenta que en Gu et al., (2020) mostraron que LPIPS y PieAPP lograron una mejor correlación con la percepción humana, con valores de Spearman's Rank Correlation Coefficient (SRCC) de 0.488 y 0.534, en comparación con los 0.239 y 0.338 de PSNR y SSIM. Asimismo, se han propuesto variantes mejoradas como A-DISTS (Ding et al., 2020, 2023), que optimiza la métrica DISTS mediante una asignación más precisa de pesos locales y logra una correlación más alta con evaluaciones humanas. De igual forma, en áreas específicas como la calidad de imágenes médicas o en competencias internacionales como NTIRE, métricas perceptuales como LPIPS, DISTS o sus variantes han mostrado correlaciones significativamente mayores con la percepción humana (Kastrýulin et al., 2023; Gu et al., 2022).

En el caso de video, la evaluación es aún más compleja debido a la naturaleza dinámica del contenido. Métricas como FloLPIPS buscan integrar distorsiones espaciales y temporales, ofreciendo una valoración más completa en aplicaciones como la interpolación de fotogramas y la restauración de secuencias (Danier et al., 2022; Hou et al., 2022). No obstante, persisten limitaciones, sobre todo en entornos no controlados o en videos *in-the-wild*, donde los enfoques

sin referencia aún muestran correlaciones incompletas con la percepción humana (Li et al., 2019). Paralelamente, han surgido propuestas innovadoras como IQAGPT, que incorpora modelos de lenguaje para evaluar la calidad de imágenes médicas, marcando una tendencia hacia métricas más especializadas y cercanas a la valoración humana (Chen et al., 2023).

La principal contribución de este trabajo es el desarrollo de una herramienta novedosa que permite evaluar la calidad visual de videos de manera general, combinando métricas tradicionales (PSNR, SSIM) y métricas perceptuales basadas en redes neuronales profundas (LPIPS). A diferencia de estudios previos que analizan cada métrica de forma aislada, nuestra herramienta integra evaluaciones objetivas y subjetivas en un mismo entorno, permitiendo relacionar directamente los parámetros de escalabilidad del video con la percepción humana. Esto facilita un análisis más completo y preciso de la calidad visual, acercando los resultados de la evaluación automática a la experiencia real del espectador.

Materiales y Métodos

El presente estudio se enfoca en la evaluación de la calidad de video utilizando métricas tanto objetivas como subjetivas. Para ello, se desarrolló una herramienta que facilita la selección, codificación y análisis de videos de distintas categorías. La metodología diseñada se esquematiza en la Figura 1, y está compuesta por cuatro etapas: carga de video, codificación, selección de videos y generación de gráficas.

Cada una de estas etapas se detalla a continuación, describiendo los materiales utilizados, el proceso de muestreo, así como las técnicas de análisis aplicadas.

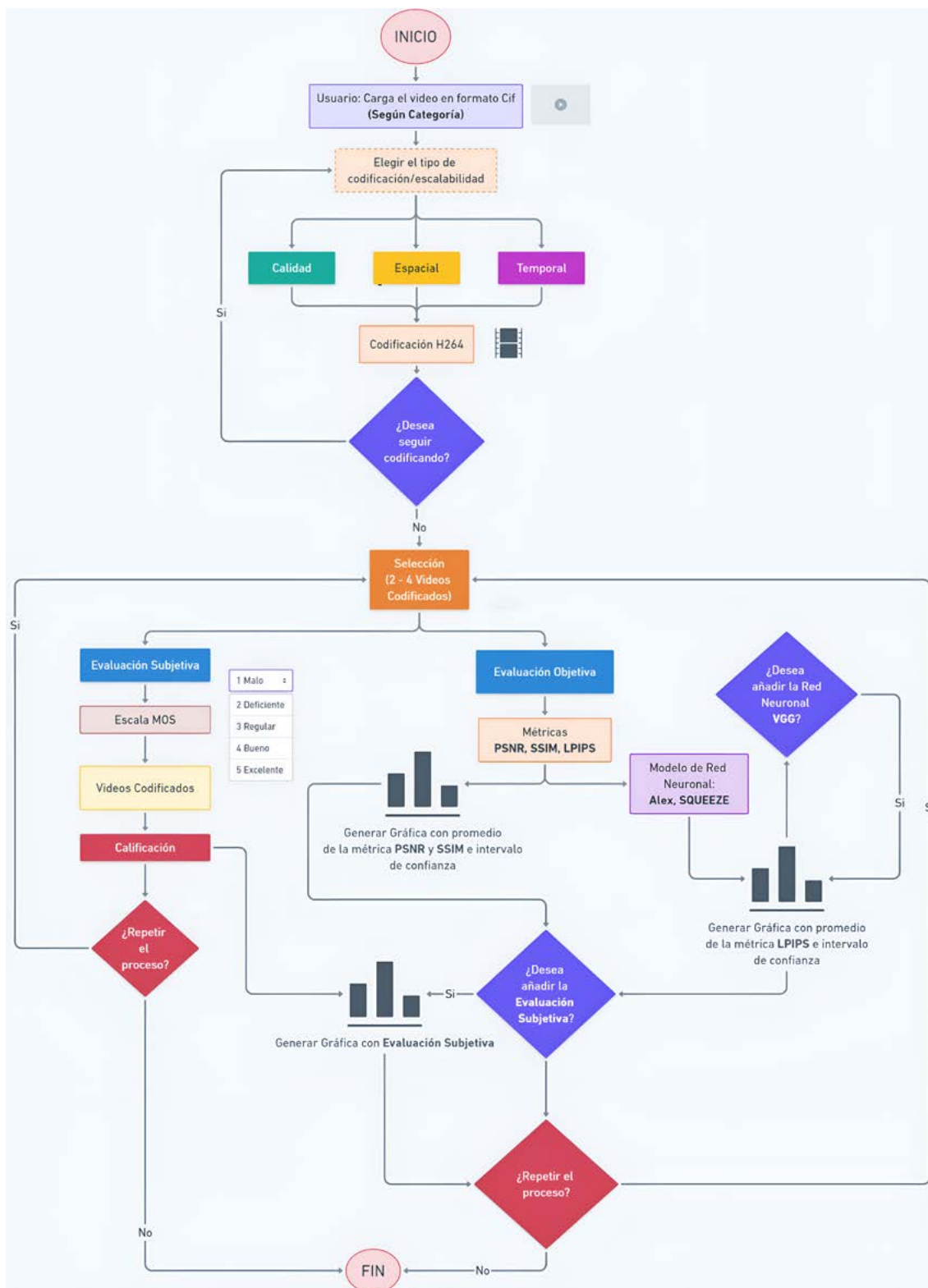
Muestreo

Para el estudio se definieron un total de cinco categorías de videos: videovigilancia, videoconferencia, entretenimiento, animaciones y tiempo real, con dos videos por cada categoría, obtenidos de la base de datos pública Xiph Media (Xiph Foundation, 2023). Los videos fueron elegidos en formato .yuv, debido a que este formato sin compresión es ideal para realizar comparaciones precisas entre el contenido original y el contenido procesado. Todos los videos tienen una resolución CIF (352×288) y una duración menor a 15 segundos, lo cual es crucial para el procesamiento eficiente de las evaluaciones objetivas y para evitar la fatiga en las evaluaciones subjetivas. Los detalles de cada video por categoría se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1
Videos seleccionados por categoría

CATEGORÍA DE VIDEO	VIDEO SELECCIONADO
Videovigilancia	bus hall_monitor
Videoconferencia	akiyo deadline
Entretenimiento	football (b) soccer
Animaciones	big_buck_bunny elephants_dream
Tiempo real	crew football (a)

Figura 1
Metodología general para la evaluación objetiva y subjetiva de video



Procedimientos

Carga de video

Los videos seleccionados en formato .yuv son organizados por categorías, permitiendo al usuario elegir cuáles serán codificados en la siguiente etapa. Esta selección permite una variedad de escenarios de uso real, representando distintas demandas de calidad de imagen y fluidez.

Codificación

Una vez seleccionado el video, se procede a su procesamiento utilizando el códec H.264 y la herramienta FFmpeg (FFmpeg API, 2024). La codificación se ajusta según tres parámetros de escalabilidad: calidad, temporal y espacial, que permiten una adaptación eficiente del video según las necesidades específicas de cada aplicación, como se muestra en la Tabla 2 (Bowker, 2021; L. Wang, 2021; Watt, 2022).

Tabla 2
Relación entre categorías de video y escalabilidad

CATEGORÍA DE VIDEO	ESCALABILIDAD
Videovigilancia	Temporal, calidad
Videoconferencia	Temporal, espacial
Entretenimiento	Calidad, espacial
Animaciones	Calidad, temporal
Tiempo real	Temporal, espacial

- **Calidad:** Se controla mediante el parámetro de cuantización (QP), que varía en un rango de 0 a 60. Un valor de QP más bajo implica una mayor calidad visual y menor compresión, mientras que valores más altos incrementan la compresión a costa de la calidad. Este ajuste es crucial para equilibrar la relación entre calidad visual y tamaño del archivo.
- **Temporal:** Este aspecto está representado por los frames por segundo (FPS), que pueden ajustarse entre 2 y 30. Un mayor número de FPS proporciona una mejor fluidez en el video, lo que es importante para escenas con mucho movimiento, mientras que un valor menor puede ser suficiente para videos con menos dinamismo, reduciendo así el tamaño del archivo.
- **Espacial:** El bitrate define la cantidad de datos utilizados para representar cada segundo de video, comenzando desde 25 kbps. Al aumentar el bitrate, se incrementa la cantidad de información por cuadro, lo que resulta en una mejor calidad visual. Sin embargo, también se traduce en mayores requisitos de almacenamiento y ancho de banda.

Estos tres parámetros permiten una codificación flexible, adaptando la compresión y la calidad del video a las necesidades específicas. La Figura 2 ilustra el flujo de este proceso de codificación y cómo se aplican estos ajustes para optimizar el rendimiento y la calidad visual del video final.

Selección de videos

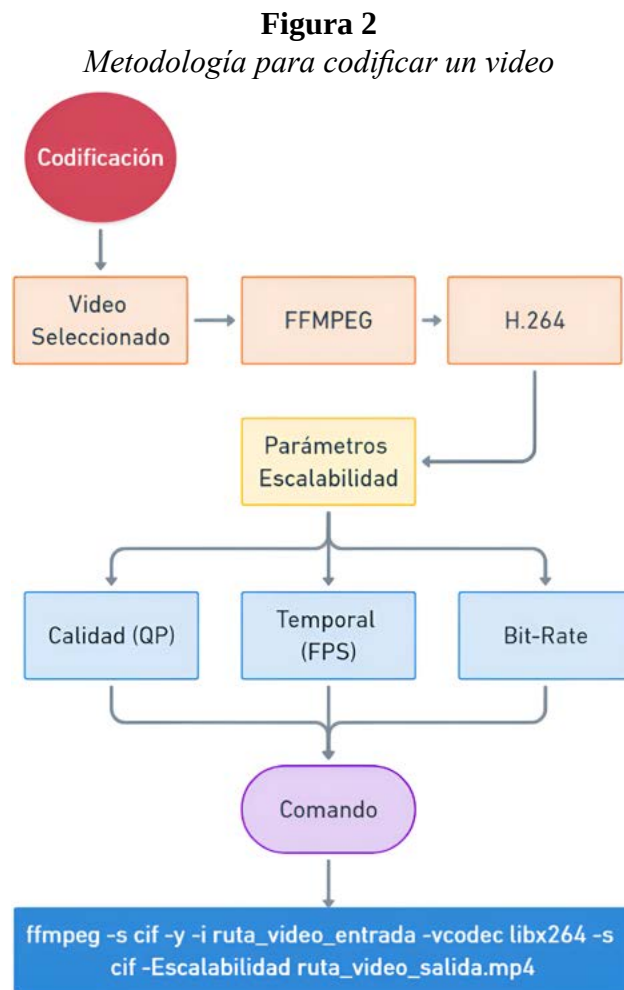
Después de la codificación, el usuario puede seleccionar entre dos y cuatro versiones de un mismo video con distintos niveles de escalabilidad para ser evaluados. Esto permite una comparación directa de las métricas de calidad entre las distintas versiones, facilitando el análisis objetivo y subjetivo de los videos.

Evaluación de la calidad

La calidad objetiva de los videos se evaluó mediante tres métricas ampliamente utilizadas en el campo de procesamiento de imágenes y video: PSNR, SSIM y LPIPS.

En primer lugar, el PSNR es una métrica clásica que destaca por su simplicidad y rápida implementación, ya que no demanda un alto costo computacional y, aun así, ofrece una buena aproximación a la calidad del video. Por otro lado, el SSIM analiza la similitud entre imágenes, considerando aspectos perceptuales como el brillo, el contraste y la estructura, lo que lo convierte en un indicador más representativo que el PSNR. Finalmente, el LPIPS introduce un enfoque basado en aprendizaje profundo: mediante redes convolucionales, evalúa la calidad desde una perspectiva perceptual más cercana al sistema visual humano, superando las limitaciones de las métricas tradicionales.

Estas métricas se aplicaron tras convertir los videos de su formato original .yuv a bgr, formato compatible con las bibliotecas de procesamiento de video como OpenCV y PyTorch; este proceso se ilustra en la Figura 3.

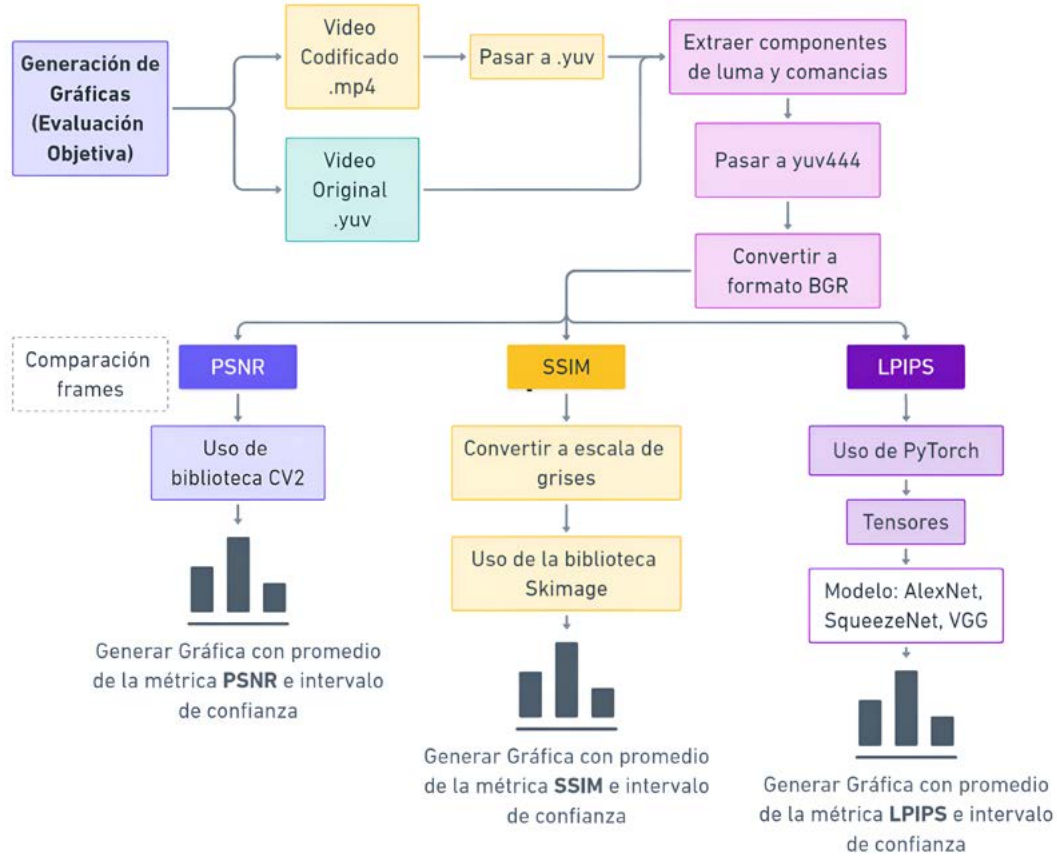


- PSNR: Evaluada con OpenCV, mide la diferencia entre el video original y el codificado en términos de decibelios (dB). Se calcula con la fórmula $PSNR = 10\log_{10}(L^2/MSE)$, donde L es el valor máximo del píxel y MSE es el error cuadrático medio entre las imágenes. El MSE se define como la Ecuación 1:

$$MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [O(i,j) - D(i,j)]^2 \quad (1)$$

Donde M y N son las dimensiones de la imagen, $O(i,j)$ es el píxel original y $D(i,j)$ es el píxel distorsionado. Valores entre 30 y 50 dB indican buena calidad (Kotevski y Mitrevski, 2010).

Figura 3
Generación de gráfica evaluación objetiva



- **SSIM:** Calculada con Skimage, compara la similitud estructural entre dos imágenes. Se basa en tres componentes: luminancia (l), contraste (c) y estructura (s), definidos como las ecuaciones 2, 3, 4.

$$l(i,j) = \frac{2\mu_O\mu_D + C_1}{\mu_O^2 + \mu_D^2 + C_1} \quad (2)$$

$$c(i,j) = \frac{2\sigma_O\sigma_D + C_2}{\sigma_O^2 + \sigma_D^2 + C_2} \quad (3)$$

$$s(i,j) = \frac{\sigma_{OD} + C_3}{\sigma_O\sigma_D + C_3} \quad (4)$$

Donde μ_O y μ_D son las medias de los píxeles en las imágenes original y distorsionada, σ_O y σ_D son las desviaciones estándar, y σ_{OD} es la covarianza. Los valores se combinan usando la fórmula que se muestra en la Ecuación 5.

$$SSIM(i,j) = \frac{(2\mu_O\mu_D + C_1)(2\sigma_O\sigma_D + C_2)}{(\mu_O^2 + \mu_D^2 + C_1)(\sigma_O^2 + \sigma_D^2 + C_2)} \quad (5)$$

El valor resultante varía entre 0 y 1, donde 1 indica la mejor calidad. Este índice se calcula aplicando una ventana de 8x8 píxeles en toda la imagen. De este modo,

resultan tres mapas de índices SSIM, uno por plano de color. Los tres mapas se combinan linealmente en uno, habitualmente otorgando un 80 % del peso a la luminancia y dejando un 10 % a cada plano de croma (Richardson, 2010).

- **LPIPS:** Para esta métrica se emplean tensores y redes neuronales preentrenadas, como AlexNet, SqueezeNet y VGG para medir la similitud perceptual entre dos imágenes. Se basa en las diferencias entre características profundas extraídas de las imágenes, tales como texturas y bordes. La fórmula general para calcular la distancia perceptual entre dos patches es la Ecuación 6. Un patch de imagen es un pequeño fragmento cuadrado de una imagen, típicamente de dimensiones 32x32 píxeles, aunque se pueden utilizar otras dimensiones como 16x16, 64x64 píxeles (Zhang et al., 2018).

$$d(x, x_0) = \sum_l \frac{1}{H_l W_l} \sum_{h,w} |w^l \odot (\widehat{y_{hw}^l} - \widehat{y_{0hw}^l})|_2^2 \quad (6)$$

Donde $d(x, x_0)$ es la distancia perceptual entre las imágenes x (original) y x_0 (distorsionada), w^l es el vector de ponderación, y $(\widehat{y^l})$ representa las activaciones de la red en la capa l . Un valor bajo de d indica que las imágenes son perceptualmente similares.

Todo el código fuente está liberado en GitHub accediendo al siguiente enlace (Flores, 2024).

Evaluación subjetiva

La evaluación subjetiva fue diseñada para complementar las métricas objetivas, capturando la percepción de la calidad visual por parte de los usuarios. Para ello, se empleó el método MOS (Mean Opinion Score), que mide la calidad percibida en una escala del 1 al 5, con 1 representando "malo" y 5 representando "excelente". La evaluación fue realizada en dos etapas: una donde los participantes evaluaron videos con un solo parámetro de escalabilidad y otra donde se evaluaron videos con múltiples parámetros.

Diseño de experimentos

Para demostrar el funcionamiento de la herramienta y su relación con la evaluación de los usuarios, se desarrollaron dos tipos de pruebas. En la primera, se mostraron los videos con un solo parámetro de escalabilidad, y en la segunda, se utilizaron varios parámetros de escalabilidad, según la Tabla 3, que presenta las categorías y los videos seleccionados. La escalabilidad con el respectivo parámetro se intercaló para mostrar las diferencias a los participantes en la evaluación subjetiva, utilizando los valores de QP (20, 30, 40, 50), FPS (2, 8, 16, 30) y bitrate (100 kbps, 200 kbps, 300 kbps, 400 kbps).

Tabla 3
Video seleccionado por categoría

CATEGORÍA DE VIDEO	ESCALABILIDAD	VIDEO SELECCIONADO
Videovigilancia	Temporal	Hall Monitor
Animaciones	Calidad	Buck Big Bunny
Tiempo real	Espacial	Crew

Calificaciones subjetivas

Las calificaciones subjetivas se recopilaban utilizando una escala de estrellas, como se describe en la Tabla 4. Los participantes evaluaron los videos con base en varios factores, como la pérdida de color, pixelación y fluidez del movimiento. Estas características fueron seleccionadas debido a su relevancia en la percepción de calidad visual en transmisiones de video comprimido.

Materiales de prueba

Siguiendo el diseño de prueba descrito, se seleccionaron 12 secuencias de video divididas en tres categorías: videovigilancia, animaciones y tiempo real, con una resolución CIF (352x288). Los videos fueron codificados usando el códec H.264 y presentados en formato .mp4 a los participantes mediante una pantalla de 86 pulgadas, definición 4K Ultra HD, optimizada para evitar reflejos y asegurar una evaluación consistente de la calidad.

Tabla 4
Video seleccionado por categoría

ESCALA	VALORACIÓN
1eEstrella	Malo
2 estrellas	Deficiente
3 estrellas	Regular
4 estrellas	Bueno
5 estrellas	Excelente

Metodología basada en la ITU-R BT.500-14

El diseño de la evaluación se basó en las recomendaciones de la ITU-R BT.500-14 y sigue la metodología adoptada por Elecard (Kruglov, 2022). Esta metodología asegura que los usuarios no estén al tanto de los parámetros de codificación usados para cada video, eliminando cualquier sesgo que pudiera influir en su percepción.

Participantes que evalúan un solo parámetro de escalabilidad

La muestra consistió en 37 estudiantes, con edades entre 20 y 22 años, de género masculino y femenino. Todos los participantes eran usuarios no expertos en compresión de video, lo que permitió obtener evaluaciones representativas de la experiencia de un espectador promedio. Cada secuencia de video se repitió entre 9 y 10 veces para permitir la identificación clara de diferencias.

Participantes que evalúan distintos parámetros de escalabilidad

Los participantes evaluaron videos con distintos niveles de escalabilidad en tres grupos:

- Grupo 1 (36 estudiantes): Evaluaron videos con los mejores parámetros de escalabilidad (QP bajo, FPS alto, mayor bitrate).
- Grupo 2 (20 estudiantes): Se les presentaron videos con parámetros intermedios.
- Grupo 3 (11 estudiantes): Evaluaron videos con parámetros de escalabilidad bajos (QP alto, FPS bajo, menor bitrate).

Todos los participantes tenían edades entre 19 y 24 años, de género masculino y femenino, y sin experiencia previa en evaluación de calidad de video, observando los videos

de manera natural, como cualquier espectador promedio. Cada grupo realizó la evaluación en sesiones independientes para evitar influencias cruzadas entre ellos.

Análisis comparativo

Los resultados subjetivos se compararon con los datos objetivos obtenidos de las métricas PSNR, SSIM y LPIPS, buscando relacionarse entre la percepción humana y las mediciones automáticas de calidad. Los datos de la evaluación subjetiva proporcionan información valiosa para validar cómo las métricas objetivas reflejan la percepción visual real.

Resultados y Discusión

Evaluación subjetiva

Los resultados de la evaluación subjetiva muestran diferencias significativas en la percepción de calidad según el tipo de escalabilidad: calidad, temporal y espacial. En la Figura 4, siendo escalabilidad de calidad, se observa que el video con un QP de 20 fue el mejor valorado, con un valor promedio de 4.32 en la escala MOS de 5 valores, mientras que la configuración con un QP de 50 obtuvo la peor puntuación (1.16). A medida que aumenta el QP, la calidad percibida disminuye, con un menor error estándar en configuraciones de alta compresión, lo que indica mayor consenso entre los participantes.

En la escalabilidad temporal (Figura 4), el video con 30 FPS alcanzó el mayor promedio de evaluación (4.89), mostrando una clara preferencia por configuraciones más fluidas. La disminución en los FPS redujo la percepción de calidad, siendo la configuración de 2 FPS la peor evaluada (1.19). La baja variabilidad en las evaluaciones de FPS altos refuerza el consenso sobre la superioridad visual en estas configuraciones.

Finalmente, en la escalabilidad espacial (Figura 4), los videos con bitrate de 400 kbps fueron los más valorados (4.7), mientras que los de 100 kbps recibieron las peores calificaciones (1.68). A mayor bitrate, mayor fue la calidad percibida, con menor variabilidad en las opiniones para configuraciones de mayor tasa.

Evaluación objetiva

Se realizaron evaluaciones con las métricas PSNR, SSIM y LPIPS, aplicando diferentes modelos de redes neuronales como AlexNet, SqueezeNet y VGG.

PSNR

La métrica PSNR se evaluó para tres tipos de escalabilidad: calidad, temporal y espacial. En general, los resultados muestran que:

- Escalabilidad de calidad (Figura 5): El PSNR disminuye progresivamente al aumentar el QP, mostrando que una mayor compresión reduce la calidad del video.
- Escalabilidad temporal (Figura 5): No se observan cambios significativos con diferentes tasas de FPS, aunque se evidencia una mayor consistencia a tasas altas.
- Escalabilidad espacial (Figura 5): Existe una relación directa entre el bitrate y la PSNR; videos con mayor bitrate presentan mejor calidad.

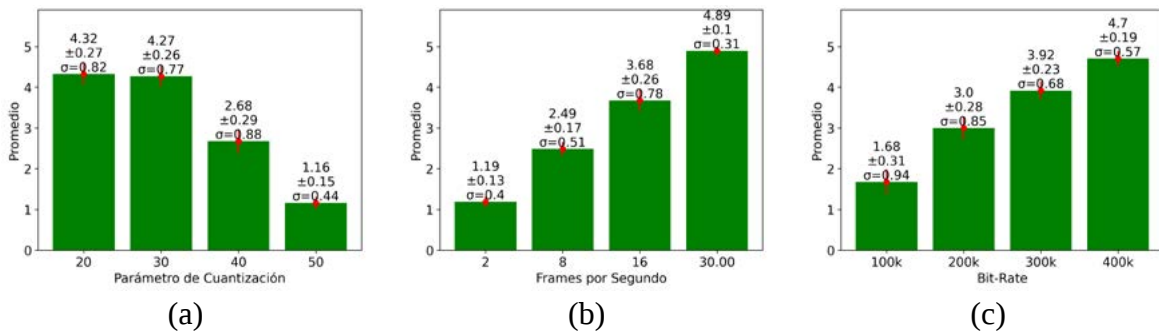
SSIM

El SSIM fue calculado de manera similar para los tres tipos de escalabilidad:

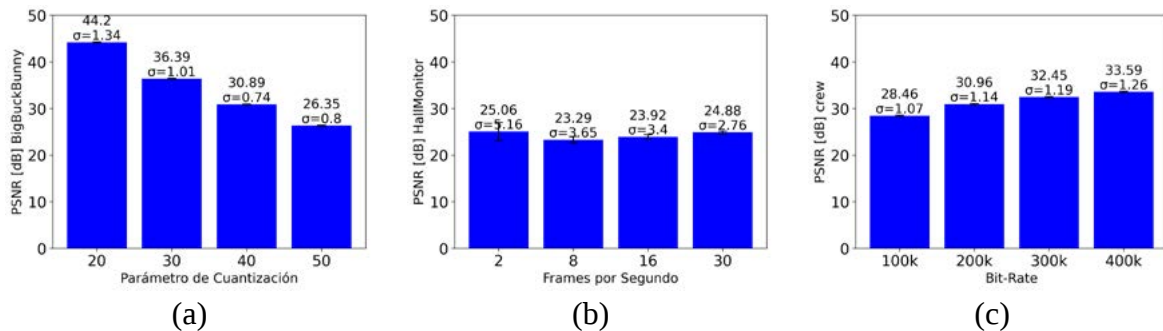
- Escalabilidad de calidad (Figura 6): La similitud estructural disminuye al aumentar el QP, reflejando pérdidas perceptibles en la estructura visual.
- Escalabilidad temporal (Figura 6): SSIM se mantiene relativamente estable, indicando consistencia en la percepción de calidad a distintas tasas de FPS.
- Escalabilidad espacial (Figura 6): Un mayor bitrate se traduce en mejoras en la calidad estructural del video.

Figura 4

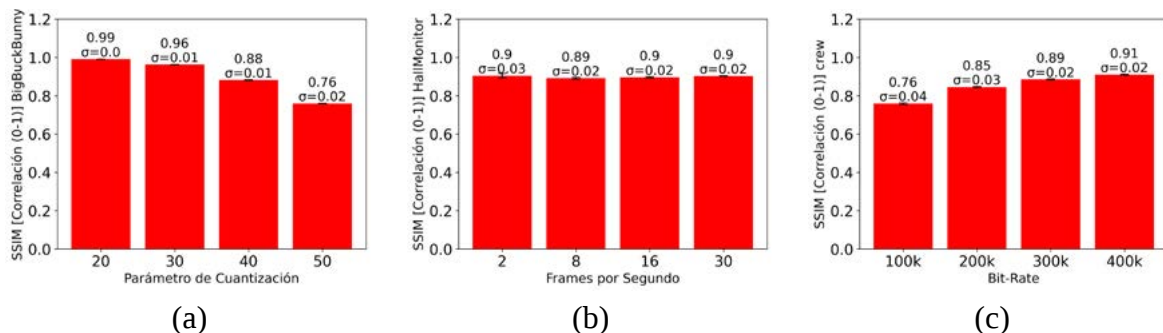
Descripción general de las gráficas de resultados para la evaluación subjetiva con diferentes tipos de escalabilidad: (a) calidad, (b) temporal, y (c) espacial

**Figura 5**

Resultados con la métrica PSNR para diferentes tipos de escalabilidad: (a) calidad, (b) temporal, y (c) espacial

**Figura 6**

Resultados con la métrica SSIM para diferentes tipos de escalabilidad: (a) calidad, (b) temporal, y (c) espacial



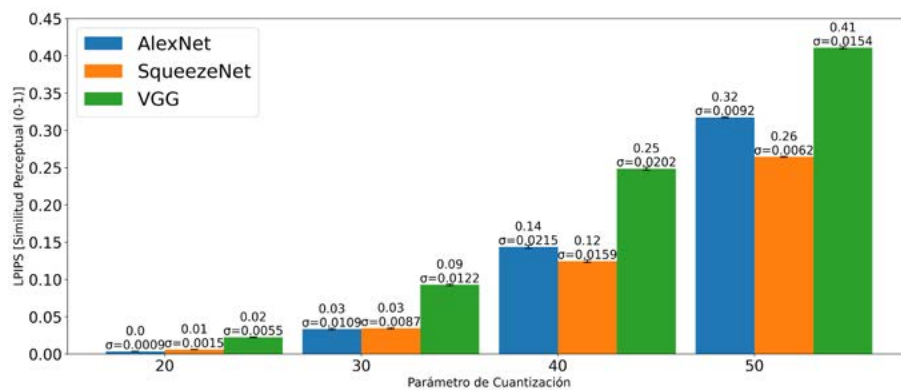
LPIPS

La métrica LPIPS, que se basa en redes neuronales profundas, también fue analizada para los diferentes modelos y parámetros:

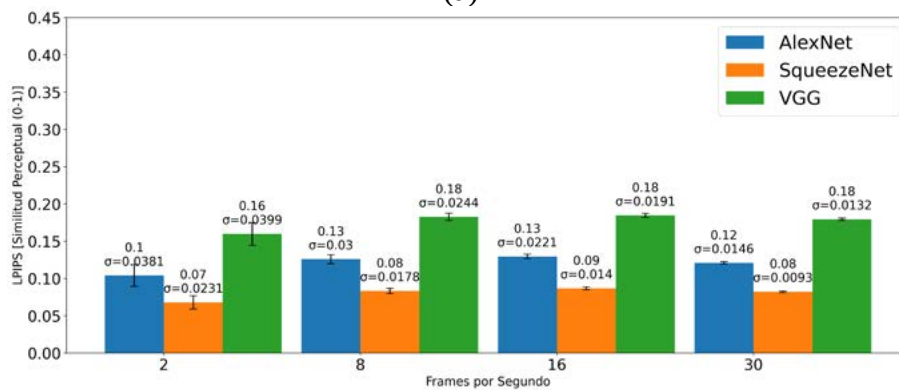
- Escalabilidad de calidad (Figura 7):
 - La métrica LPIPS aumenta con el QP, reflejando que la percepción de calidad disminuye a medida que se incrementa la compresión. VGG mostró la mayor sensibilidad, mientras que AlexNet y SqueezeNet capturan de manera consistente la degradación perceptual.
- Escalabilidad temporal (Figura 7):
 - Los valores de LPIPS se mantienen relativamente estables con distintas tasas de FPS, mostrando ligeras mejoras en la percepción a tasas altas.
- Escalabilidad espacial (Figura 7):
 - Un mayor bitrate se traduce en menor LPIPS, indicando una mejora en la calidad perceptual; la sensibilidad de los distintos modelos sigue la misma tendencia.

Figura 7

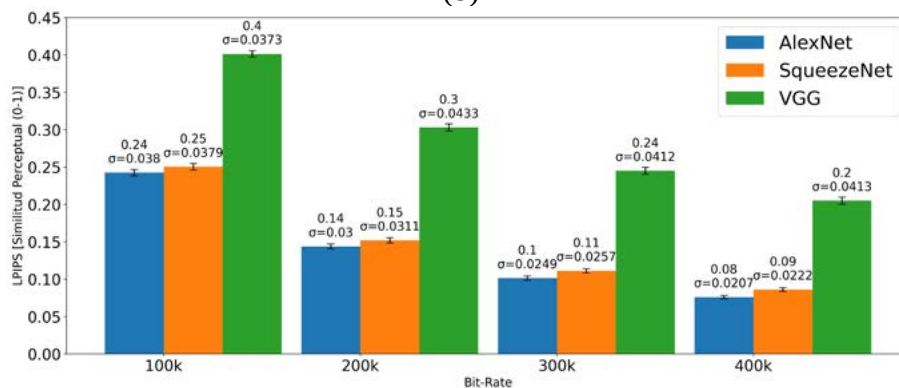
Resultados con la métrica LPIPS para diferentes tipos de escalabilidad: (a) calidad, (b) temporal y (c) espacial



(a)



(b)



(c)

En general, LPIPS confirma las tendencias observadas con PSNR y SSIM: la calidad percibida disminuye con mayor compresión (QP alto) y aumenta con mayores bitrates, mientras que los cambios en FPS tienen un efecto menor. Además, LPIPS refleja con mayor precisión las degradaciones perceptuales percibidas por los espectadores.

Comparación y análisis de las diferentes métricas

La comparación entre evaluaciones subjetivas y métricas objetivas revela una correspondencia notable en las escalabilidades de calidad y espacial, demostrando la efectividad de PSNR, SSIM y LPIPS para reflejar la percepción visual de los espectadores. Los resultados subjetivos fueron contrastados con los valores numéricos y la Figura 8, Figura 9 y Figura 10 ofrecen una referencia cualitativa detallada para cada métrica. Los valores objetivos se agruparon en cuatro niveles según su promedio, donde se seleccionaron las escalas inferiores en pobre-malo debido a los resultados obtenidos.

Relación en la escalabilidad de calidad

Las métricas PSNR y SSIM presentan una relación clara: a mayores valores, mejores calificaciones subjetivas, lo que indica una mayor retención de detalles. LPIPS, por su parte, también respalda esta tendencia, mostrando que los modelos de red más avanzados, como VGG, son más sensibles a las diferencias perceptuales.

Relación en la escalabilidad de calidad

La escalabilidad espacial sigue un patrón similar al de la calidad, con una correspondencia consistente entre valores objetivos (PSNR, SSIM) y percepciones subjetivas. LPIPS aporta un mayor nivel de discriminación, revelando variaciones en la percepción según el modelo de red neuronal utilizado.

Análisis de escalabilidad temporal

En cuanto a la escalabilidad temporal, en la Figura 5 y Figura 6 se observa poca variabilidad con valores más bajos en PSNR (25.06 dB a 23.29 dB) y SSIM (0.904 a 0.892), lo que refleja su limitación para evaluar la fluidez de movimiento. LPIPS, con valores cercanos a cero, también muestra baja variabilidad en la percepción de fluidez, lo que destaca su enfoque en la calidad estática. Sin embargo, sigue la tendencia de las métricas tradicionales, validando su uso como métrica complementaria.

Figura 8

Relación de las puntuaciones MOS con los valores de PSNR por escalabilidad

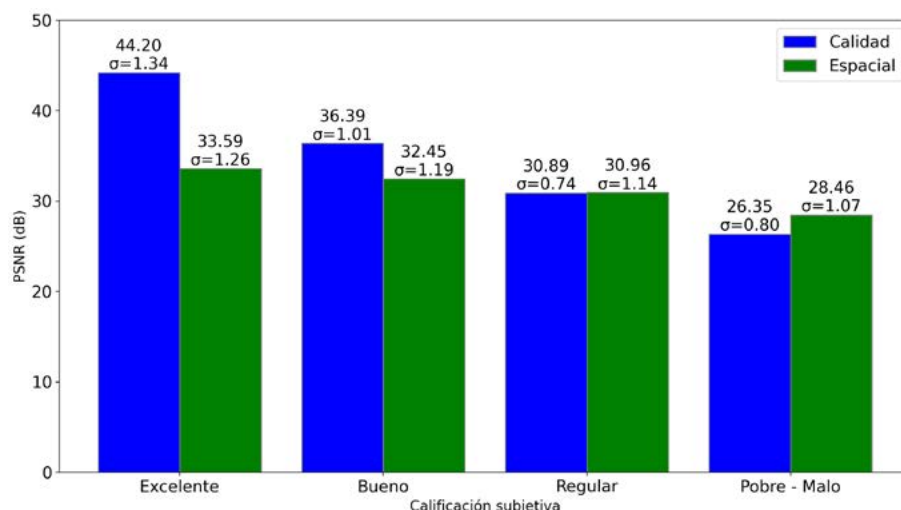
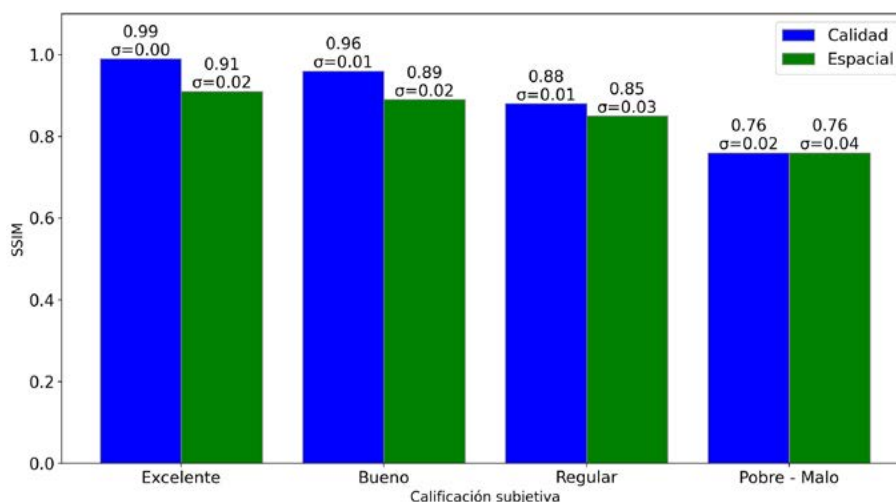
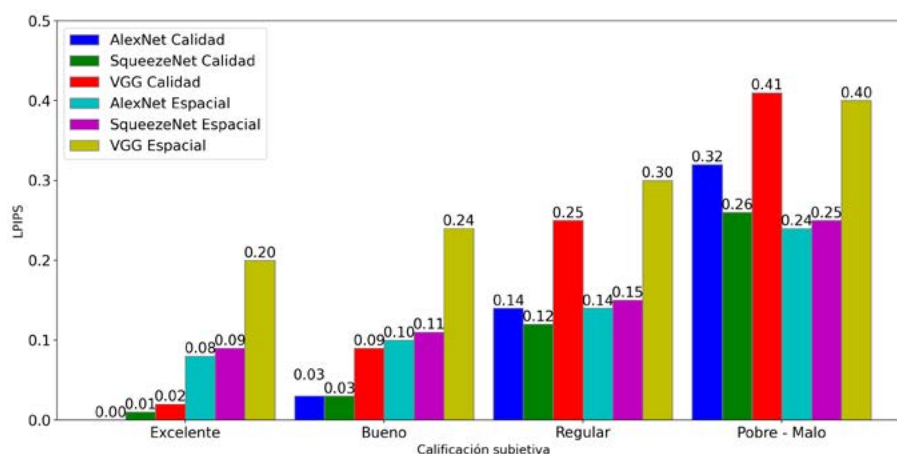


Figura 9*Relación de las puntuaciones MOS con los valores de SSIM por escalabilidad***Figura 10***Relación de las puntuaciones MOS con los valores de LPIPS por escalabilidad y modelo*

Preferencias de los usuarios

Después de los análisis previos, se llevó a cabo un estudio adicional para evaluar las preferencias de los participantes en tres categorías de contenido: animación, videovigilancia y aplicaciones en tiempo real. Se analizaron tres parámetros de escalabilidad: escalabilidad de calidad (qp), escalabilidad temporal (fps) y escalabilidad espacial ($bitrate$), utilizando valores fijos de $qp = 20$, $fps = 30$ y $bitrate = 400kbps$ para el primer conjunto de pruebas.

- Animación: Los participantes priorizaron la calidad visual, con $qp = 20$ recibiendo la puntuación más alta (promedio 4.11). La escalabilidad espacial y temporal obtuvo valores menores, reflejando que la fidelidad visual es el factor determinante en este tipo de contenido, como se muestra en la Figura 11.
- Videovigilancia: Las preferencias fueron más equilibradas, sin embargo, la escalabilidad espacial ($bitrate$) fue ligeramente más valorada (promedio 3.50), indicando que una mayor tasa de bits contribuye a la percepción de detalles importantes en este contexto, como se observa en la Figura 11.
- Aplicaciones en tiempo real: Se observó una clara preferencia por la escalabilidad temporal, priorizando la fluidez del video ($fps = 30$, promedio 3.83). Los participantes valoraron menos la calidad y el $bitrate$, coherente con la importancia de la continuidad de movimiento en estas aplicaciones. (ver Figura 11).

Las preferencias de los usuarios varían según el tipo de contenido: la calidad visual es clave en animación, la escalabilidad espacial es relevante en video vigilancia y la fluidez temporal domina en aplicaciones en tiempo real.

Se realizó una segunda evaluación utilizando valores de $qp = 30$, $fps = 16$ y $bitrate = 300kbps$. Los resultados fueron los siguientes:

Figura 11

Resultados con la calificación subjetiva regular evaluación 1 para diferentes tipos de categorías: (a) animación, (b) video vigilancia y (c) tiempo real

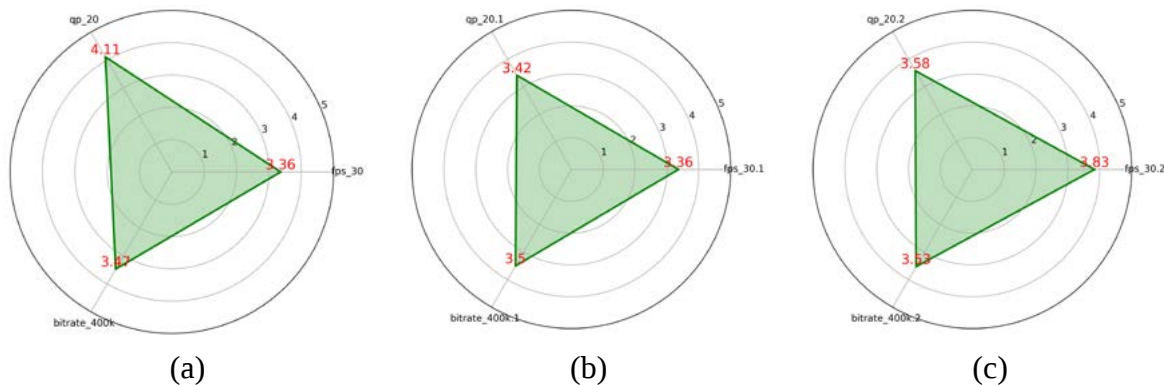


Figura 12

Resultados con la calificación subjetiva regular evaluación 2 para diferentes tipos de categorías: (a) animación, (b) video vigilancia, y (c) tiempo real

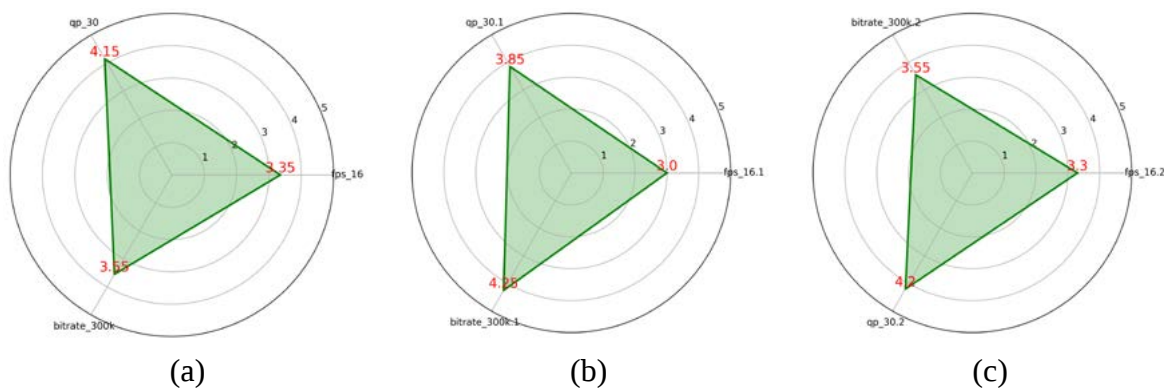
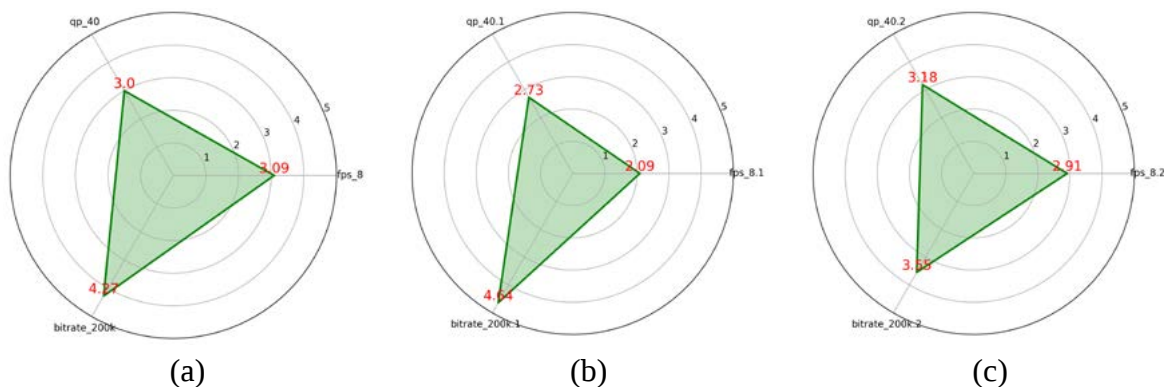


Figura 13

Resultados con la calificación subjetiva regular evaluación 3 para diferentes tipos de categorías: (a) animación, (b) video vigilancia y (c) tiempo real



- Animación: Los participantes continuaron priorizando la calidad visual; $qp = 30$ recibió la puntuación más alta (promedio 4.15), mientras que bitrate y fps fueron menos valorados, lo que confirma la importancia de la fidelidad visual en esta categoría (ver Figura 12).
- Videovigilancia: La escalabilidad espacial (bitrate) fue claramente preferida (promedio 4.25), superando a qp y fps, lo que indica que la percepción de detalles visuales es más relevante en este tipo de contenido (ver Figura 12).
- Aplicaciones en tiempo real: En esta condición de menor bitrate, la escalabilidad espacial se convirtió en el parámetro más valorado (promedio 4.20), mientras que qp y fps recibieron puntuaciones más bajas, lo que mostró que los usuarios priorizan mantener calidad visual sobre fluidez cuando los recursos son limitados (ver Figura 12).

Con una reducción de fps y bitrate, las preferencias de los participantes se ajustan: la calidad visual sigue siendo clave en animación, la escalabilidad espacial domina en videovigilancia y en aplicaciones en tiempo real, los usuarios priorizan la calidad espacial cuando los recursos son restringidos.

Finalmente, la evaluación se realizó con los parámetros de escalabilidad de $qp = 40$, $fps = 8$ y $bitrate = 200kbps$. Los resultados fueron los siguientes:

- Animación: Los participantes priorizaron la escalabilidad espacial (bitrate), con la puntuación más alta (promedio 4.27), lo que indica que la calidad espacial adquiere mayor relevancia cuando la calidad global disminuye (ver Figura 13).
- Videovigilancia: La escalabilidad espacial fue aún más destacada (promedio 4.64), superando ampliamente a qp y fps, lo que refleja la importancia crítica del bitrate para percibir detalles en este tipo de contenido (ver Figura 13).
- Aplicaciones en tiempo real: Aunque la fluidez sigue siendo importante, la escalabilidad espacial predominó (promedio 3.55), lo que mostró que cuando los recursos se reducen, mantener la calidad visual es más valorado que la tasa de cuadros o la calidad global (ver Figura 13).

En condiciones de menor calidad y recursos limitados, la escalabilidad espacial se convierte en el parámetro más relevante en todas las categorías de contenido, destacando su papel clave en la percepción de calidad cuando se prioriza la visibilidad de detalles sobre la fluidez o la calidad general.

Los resultados objetivamente muestran que PSNR y SSIM reflejan correctamente la degradación general de la calidad con cambios en qp y bitrate, lo que coincide con Huynh-Thu y Ghanbari (2012) e Izquierdo (2017). Sin embargo, su limitada sensibilidad a distorsiones perceptuales coincide con hallazgos de Hou et al. (2022) y J. Wang et al. (2023).

LPIPS demostró mayor alineación con la percepción humana, coherente con Prashnani et al. (2018), R. Zhang et al. (2018) y Gu et al. (2020). Las diferencias entre modelos de redes profundas reflejan observaciones similares en K. Zhang et al. (2021) y S. Zhang et al. (2023).

En las evaluaciones subjetivas, la preferencia por calidad visual en animación y por escalabilidad espacial en videovigilancia y aplicaciones en tiempo real coincide con estudios de Kastrulin et al. (2023) y Danier et al. (2022). Sin embargo, la prioridad de la escalabilidad espacial sobre fps en condiciones de bajo bitrate para aplicaciones en tiempo real muestra una

ligera discrepancia con trabajos previos que destacan la fluidez como más crítica, sugiriendo dependencia del tipo de contenido y del nivel absoluto de calidad (Danier et al., 2022; Li et al., 2019).

Validación de las métricas con la percepción humana

Antes de presentar los resultados, es importante definir cómo se calculan y se interpretan los valores porcentuales de sensibilidad utilizados en este experimento. Para evaluar qué métrica (LPIPS, PSNR, SSIM) es más sensible a la percepción humana ante diferentes tipos de distorsiones, la sensibilidad se calculó mediante la fórmula (7).

$$\text{Valor \%} = \left(\frac{\text{Métrica Distorsionada} - \text{Métrica Original}}{\text{Métrica Original}} \right) \times 100 \quad (7)$$

En esta ecuación, el valor porcentual representa el cambio relativo entre el valor de la métrica en una imagen distorsionada y su valor en la imagen original y se expresa en forma de porcentaje.

Valores porcentuales superiores al 100 % indican que la métrica detecta una distorsión mucho mayor que la esperada en comparación con la imagen original, lo que sugiere una alta sensibilidad a los cambios introducidos.

Valores negativos se interpretan como un resultado en el que la métrica percibe la imagen distorsionada como "mejor" o más similar a la original que la imagen base, lo que puede indicar que la métrica no es adecuada para detectar ese tipo de distorsiones.

Los resultados se presentan en la Figura 14, Figura 15 y Figura 16, donde se muestra un aumento gradual de la distorsión en el fotograma para los tres tipos de métricas evaluadas.

La Figura 14 muestra que LPIPS es considerablemente más sensible a distorsiones localizadas en elementos clave, como el rostro humano. En este caso, LPIPS detectó con mayor precisión las alteraciones en el rostro, presentando niveles de sensibilidad de 126.15 %, 19.83 %, 48.61 % y 73.64 % cuando solo se distorsionó el rostro. Para el fotograma completamente distorsionado, los valores fueron similares, mostrando 126.91 %, 17.54 %, 37.22 % y 48.21 %. Estos resultados sugieren que LPIPS es especialmente eficaz al identificar cambios en objetos reconocibles como rostros, lo que refleja una mayor sensibilidad de la métrica ante distorsiones que afectan áreas de importancia perceptual.

En contraste, las métricas tradicionales como PSNR y SSIM demostraron ser menos sensibles a este tipo de alteraciones. Para PSNR, los niveles de sensibilidad fueron menores, registrando valores de -9.88 %, -2.23 %, -4.78 % y -6.97 %, mientras que SSIM mostró valores de -1.33 %, -0.44 %, -1.10 % y -1.75 %. Esto indica que, aunque las distorsiones eran evidentes, PSNR y SSIM no lograron capturar con la misma precisión los cambios perceptuales relevantes, lo que sugiere, desde la perspectiva de estas métricas, que la imagen distorsionada sigue siendo similar a la original, en especial para elementos importantes como los rostros.

En la Figura 15 y Figura 16, que presentan las distorsiones de ruido Poisson y ruido de sal y pimienta, se observa una tendencia similar. LPIPS nuevamente mostró valores más altos, lo que indica mayor sensibilidad a estas distorsiones, tanto para el fotograma completamente distorsionado como para una parte específica de la imagen. En cambio, PSNR

y SSIM mantuvieron valores bajos y negativos en algunos casos, reflejando que estas métricas tradicionales no capturan adecuadamente las alteraciones perceptuales más finas.

Cabe mencionar que para estos experimentos se utilizó la red neuronal VGG en LPIPS, aunque también se realizaron pruebas con otras redes preentrenadas como AlexNet y SqueezeNet, obteniendo resultados similares. En todas las pruebas, LPIPS mostró mayor sensibilidad en comparación con las métricas tradicionales, lo que sugiere que las redes neuronales profundas capturan mejor las alteraciones perceptuales que afectan la percepción humana.

Figura 14

Resultado de la métricas para distintos tipos de distorsión: difuminado

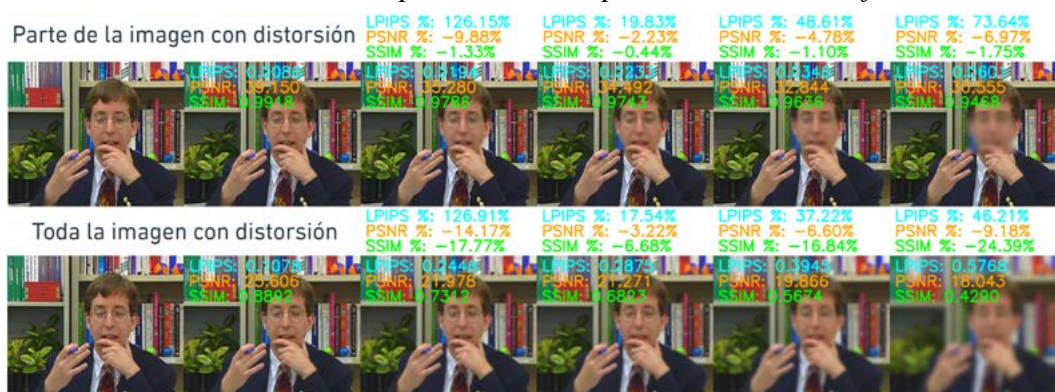


Figura 15

Resultado de la métricas para distintos tipos de distorsión: ruido de Poisson

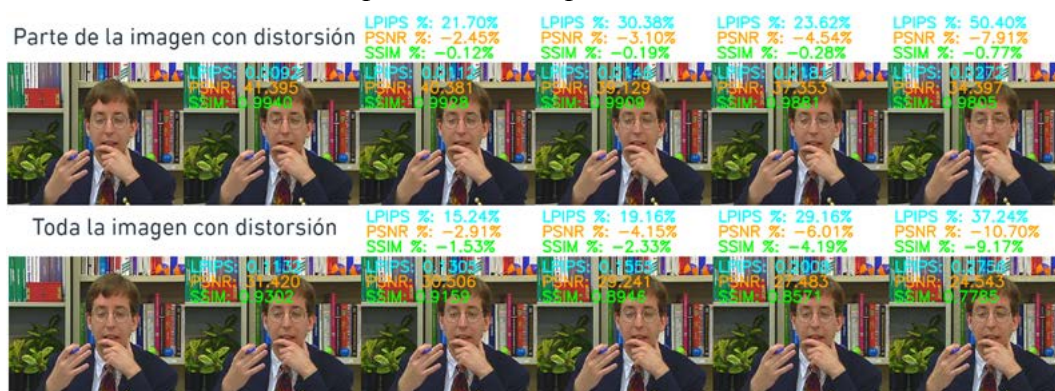


Figura 16

Resultado de la métricas para distintos tipos de distorsión: ruido sal y pimienta



Conclusiones

Este estudio presentó una herramienta para la evaluación de la calidad de video, enfocada en configuraciones de escalabilidad en calidad (qp, Quantization Parameter), resolución espacial (bitrate) y frecuencia temporal (Frames per Second, FPS). Una de las principales contribuciones de la herramienta es su interfaz gráfica de usuario (GUI, Graphical User Interface), que simplifica la carga de videos en formato YUV y permite a los usuarios seleccionar métricas de evaluación como Peak Signal-to-Noise *Ratio* (PSNR), Structural Similarity Index (SSIM) y Learned Perceptual Image Patch Similarity (LPIPS). Esto la hace accesible a usuarios con diferentes niveles de experiencia técnica y especialmente útil en escenarios donde se requiere evaluar la calidad bajo distintos parámetros de codificación.

En cuanto a los resultados de la evaluación subjetiva, se confirmó que PSNR y SSIM reflejan adecuadamente tendencias generales en la degradación de calidad, mientras que LPIPS mostró una mayor coherencia con la percepción humana, coincidiendo con trabajos recientes en el área. Estos hallazgos refuerzan la pertinencia de integrar métricas perceptuales basadas en aprendizaje profundo en herramientas de análisis de video.

Desde una perspectiva práctica, la herramienta tiene potencial aplicación en entornos de transmisión adaptativa de video (Adaptive Streaming), plataformas de videoconferencia, sistemas de videovigilancia y telemedicina, donde es crucial equilibrar calidad visual, fluidez y eficiencia en el uso del ancho de banda. Al permitir comparar configuraciones de escalabilidad y vincular métricas objetivas con la percepción de los usuarios, esta herramienta puede apoyar la toma de decisiones en la selección de parámetros de codificación más adecuados para cada contexto.

Finalmente, se identificó como limitación que las métricas empleadas no capturan de forma adecuada la fluidez del movimiento, ya que se centran en la comparación de cuadros individuales y no en la continuidad temporal. Esto resalta la necesidad de integrar métricas orientadas a la percepción del movimiento, como FloLPIPS, para optimizar la evaluación en escenarios donde la escalabilidad temporal sea determinante.

Reconocimientos y Declaraciones

Los autores agradecen al Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca por el apoyo y soporte brindado en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Los autores declaran que, en la elaboración del presente artículo, se ha utilizado la herramienta de IA ChatGPT (versión GPT-4o, OpenAI) únicamente como apoyo en la redacción y mejora del estilo de redacción en la sección de Introducción. El diseño de la investigación, la obtención y análisis de los resultados, así como las conclusiones, son responsabilidad exclusiva de los autores.

Los autores declaran la contribución y participación equitativa de roles de autoría para esta publicación.

Referencias

- Bowker, D. (2021). *Bitrate Defined: How It Impacts Video Quality*. <https://artlist.io/blog/what-is-bitrate/>
- Chen, Z., Hu, B., Niu, C., Chen, T., Li, Y., Shan, H., & Wang, G. (2023). *IQAGPT: Image Quality Assessment with Vision-language and ChatGPT Models*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.15663>
- Danier, D., Zhang, F., & Bull, D. (2022). Flo LPIPS: A bespoke video quality metric for frame interpolation. *2022 Picture Coding Symposium (PCS)*, 283–287. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.08119>
- Ding, K., Ma, K., Wang, S., & Simoncelli, E. P. (2020). Image quality assessment: Unifying structure and texture similarity. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 44(5), 2567–2581. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.07728>
- Ding, K., Zhong, R., Wang, Z., Yu, Y., & Fang, Y. (2023). Adaptive Structure and Texture Similarity Metric for Image Quality Assessment and Optimization. *IEEE Transactions on Multimedia*, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TMM.2023.3333208>
- FFmpeg Developers. (2024). *Introduction to FFmpeg*. FFmpeg. <https://ffmpeg.org/about.html>
- Flores, B. (2024). Evaluación calidad video [Repositorio en GitHub]. GitHub. https://github.com/Akilescasteo/Evaluacion_calidad_video
- Xiph Foundation. (2023). Xiph.org video test media [derf's collection]. <https://media.xiph.org/video/derf/>
- Gu, J., Cai, H., Chen, H., Ye, X., Ren, J., & Dong, C. (2020). *PIPAL: a Large-Scale Image Quality Assessment Dataset for Perceptual Image Restoration*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.12142>
- Gu, J., Cai, H., Dong, C., Ren, J. S., Timofte, R., Gong, Y., Lao, S., Shi, S., Wang, J., Yang, S., Wu, T., Xia, W., Yang, Y., Cao, M., Heng, C., Fu, L., Zhang, R., Zhang, Y., Wang, H., ... Tiwari, A. K. (2022). NTIRE 2022 Challenge on Perceptual Image Quality Assessment. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) Workshops*, 951–967. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.2206.11695>
- Hou, Q., Ghildyal, A., & Liu, F. (2022). A perceptual quality metric for video frame interpolation. *European Conference on Computer Vision*, 234–253. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.01879>
- Huynh-Thu, Q., & Ghanbari, M. (2012). The accuracy of PSNR in predicting video quality for different video scenes and frame rates. *Telecommunication Systems*, (49), 35–48. <https://doi.org/10.1007/s11235-010-9351-x>
- García Izquierdo, F. (2017). *Desarrollo de una herramienta para la medida de calidad de video* [Tesis de grado, Universidad de Sevilla]. <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/91129/fichero/Memoria+TFG+-+Desarrollo+de+una+herramienta+para+la+medida+de+calidad+de+video.pdf>
- Kastruulin, S., Zakirov, J., Pezzotti, N., & Dylov, D. V. (2023). Image Quality Assessment for Magnetic Resonance Imaging. *IEEE Access*, 11, 14154–14168. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3243466>
- Kotevski, Z., & Mitrevski, P. (2010). Experimental comparison of PSNR and SSIM metrics for video quality estimation. *International Conference on ICT Innovations*, 357–366. https://doi.org/10.1007/978-3-642-10781-8_37
- Kruglov, A. (2022). *Interpretation of Objective Video Quality Metrics*. Elecard: Video Compression Guru. https://www.elecard.com/page/article_interpretation_of_metrics
- Li, D., Jiang, T., & Jiang, M. (2019). Quality assessment of in-the-wild videos. *Proceedings of the 27th ACM International Conference on Multimedia*, 2351–2359. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.00375>
- Prashnani, E., Cai, H., Mostofi, Y., & Sen, P. (2018). PicAPP: Perceptual image-error assessment through pairwise preference. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1808–1817. <http://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00194>

- Richardson, I. E. G. (2003). *H.264 and MPEG-4 video compression: Video coding for next-generation multimedia* (2. ed.). Wiley. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/0470869615>
- Wang, J., Chan, K. C. K., & Loy, C. C. (2023). Exploring CLIP for assessing the look and feel of images. *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 37(2), 2555–2563. <https://doi.org/10.1609/aaai.v37i2.25353>
- Wang, L. (2021). *How Bitrate and Quantization Parameter (QP) Affect Video Quality*. <https://lesliewongcv.github.io/posts/2021/11/blog-post-1/>
- Watt, J. (2022). *6 Factors Decide Video Quality: Resolution, Bitrate, Frame Rate, CRF, Bit Depth*. <https://www.winxdvd.com/video-transcoder/6-factors-decide-video-quality-bitrate-resolution-framerate.htm>
- Zhang, K., Liang, J., Van Gool, L., & Timofte, R. (2021). Designing a Practical Degradation Model for Deep Blind Image Super-Resolution. *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV)*, 4791–4800. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.14006>
- Zhang, R., Isola, P., Efros, A. A., Shechtman, E., & Wang, O. (2018). The unreasonable effectiveness of deep features as a perceptual metric. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 586–595. <https://doi.org/https://doi.org/10.48550/arXiv.1801.03924>
- Zhang, S., Lin, Z., & Zhou, Y. (2023). *Accelerate diffusion based human image generation via consistency models*. <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4719919>

Digitalización inmersiva del Bosque Murocomba con técnicas de procesamiento de imágenes

Immersive digitization of the Murocomba Forest using image processing techniques

Diego Intriago-Rodríguez¹ <https://orcid.org/0000-0003-4829-0089>, Mathías Ortega-Rizzo¹ <https://orcid.org/0009-0007-9952-075X>, Carlos Belezaca-Pinargote¹ <https://orcid.org/0000-0002-3158-7380>, Edison Solano-Apuntes¹ <https://orcid.org/0000-0001-8158-0040>

¹Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Quevedo, Ecuador
dintriagor3@uteq.edu.ec, aortegar@uteq.edu.ec,
cbelezaca@uteq.edu.ec, esolano@uteq.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2025/06/29

Aceptado: 2025/08/24

Publicado: 2025/10/15

Resumen

Este artículo presenta el desarrollo de una solución tecnológica basada en procesamiento de imágenes para la digitalización inmersiva del Bosque Protector Murocomba, ubicado en la provincia de Los Ríos, Ecuador. La propuesta integra el uso de una cámara 360° para la captura de imágenes esféricas de alta calidad, que fueron procesadas digitalmente con el fin de optimizar su nitidez, corregir imperfecciones y facilitar su integración en un entorno virtual interactivo. Como parte del sistema, se implementó un modelo de inteligencia artificial con arquitectura YOLOv8, entrenado para detectar especies vegetales presentes en los senderos del bosque. Estas detecciones se incorporaron a una aplicación web que permite a los usuarios explorar el recorrido de manera remota, interactuar con el contenido e identificar la flora del lugar sin necesidad de presencia física. El proyecto busca ofrecer una alternativa para la conservación del ecosistema mediante el acceso digital a su biodiversidad, reduciendo el impacto humano directo y promoviendo la educación ambiental. Los resultados demuestran la efectividad de combinar tecnologías inmersivas y modelos de detección para representar entornos naturales con alto valor ecológico de forma accesible y sostenible.

Palabras clave: tecnologías interactivas, inteligencia artificial aplicada, ecosistemas tropicales, educación ambiental, sistemas de visualización remota.

Sumario: Introducción, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión y Conclusiones.

Cómo citar: Intriago-Rodríguez, D., Ortega-Rizzo, M., Belezaca-Pinargote, C. & Solano-Apuntes, E. (2025). Digitalización inmersiva del Bosque Murocomba con técnicas de procesamiento de imágenes. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 77-87. <https://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/view/1355>

Abstract

This paper presents the development of a technological solution based on image processing for the immersive digitization of the Murocomba Protected Forest, located in the province of Los Ríos, Ecuador. The proposal integrates the use of a 360° camera to capture high-quality spherical images, which were digitally processed to optimize their sharpness, correct imperfections, and facilitate their integration into an interactive virtual environment. As part of the system, an artificial intelligence model with YOLOv8 architecture was implemented, trained to detect plant species present in the forest trails. These detections were incorporated into a web application that allows users to explore the trail remotely, interact with the content, and identify the flora of the site without the need for physical presence. The project seeks to offer an alternative for the conservation of the ecosystem through digital access to its biodiversity, reducing direct human impact and promoting environmental education. The results demonstrate the effectiveness of combining immersive technologies and sensing models to represent natural environments with high ecological value in an accessible and sustainable way.

Keywords: Interactive technologies, applied artificial intelligence, tropical ecosystems, environmental education, remote visualization systems.

Introducción

La conservación de los ecosistemas naturales es uno de los retos más significativos de la actualidad, especialmente en áreas de elevada diversidad biológica como los bosques tropicales. Estos hábitats, fundamentales para sostener el equilibrio ambiental a escala global, se ven sometidos a presiones cada vez más intensas debido a actividades como la deforestación, el turismo descontrolado y el crecimiento de las zonas urbanas. En este escenario, resulta imperativo adoptar soluciones tecnológicas que faciliten la investigación, el seguimiento y la divulgación de estos entornos sin generar un impacto negativo en su estructura ecológica ni en su funcionamiento.

En este marco, las tecnologías inmersivas, junto con el procesamiento de imágenes digitales y los modelos de entrenamiento, emergen como una opción viable para conectar a diversas audiencias con la riqueza de los ecosistemas naturales, eliminando la necesidad de alterar físicamente dichos espacios. La captura de entornos mediante cámaras 360° posibilita una representación fiel y detallada de los paisajes naturales, lo que permite desarrollar recorridos virtuales que no solo fomentan la educación ambiental, sino que también incentivan una mayor apreciación de la biodiversidad y su importancia.

El estudio tiene como eje central el Bosque Protector Murocomba, situado en la provincia de Los Ríos, Ecuador. Este ecosistema se distingue por su notable diversidad vegetal y, al mismo tiempo, por su susceptibilidad a las perturbaciones derivadas de la actividad humana. Dado que actualmente no existen instrumentos suficientes para su exploración a distancia, este trabajo propone la creación de un recorrido virtual inmersivo, complementado con un sistema inteligente de reconocimiento de especies vegetales basado en la arquitectura YOLOv8.

Este estudio busca cumplir un doble objetivo: por un lado, aprovechar las herramientas digitales para promover la educación y la conservación; por otro, ofrecer a investigadores, estudiantes y al público en general la posibilidad de interactuar con el ecosistema de manera no invasiva, preservando su sostenibilidad a largo plazo. Así, el proyecto se posiciona como una alternativa que armoniza el avance tecnológico con el compromiso ambiental, contribuyendo tanto a la protección de la biodiversidad como al fortalecimiento de la conciencia ecológica en la sociedad.

Materiales y Métodos

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque exploratorio y no experimental, orientado al diseño e implementación de una solución tecnológica sin manipulación directa de las variables del entorno. El estudio se efectuó en el sendero del Bosque Protector Murocomba, ubicado en el cantón Valencia, provincia de Los Ríos, Ecuador, que inicia en las coordenadas longitud -79.164583 , latitud -0.637222 y finaliza en longitud -79.144083 , latitud -0.646583 , a una altitud promedio de 526 m. s. n. m. En una primera fase se realizó un reconocimiento del terreno con el fin de identificar el sendero ecoturístico más representativo del área, tomando en cuenta la diversidad vegetal observable y las condiciones de accesibilidad para la captura de datos. A lo largo de un recorrido de 3.73 km, se capturaron 61 panoramas 360° con una cámara Insta360 ONE X2, seleccionada por su capacidad de capturar imágenes esféricas en alta resolución, resistente a condiciones climáticas adversas. Las imágenes fueron procesadas utilizando software especializado con el fin de mejorar la calidad visual, corregir distorsiones y preparar el material para su integración en entornos digitales inmersivos. Posteriormente, se construyó un recorrido virtual a partir de las imágenes 360° capturadas previamente, mediante la herramienta Pano2VR, permitiendo vincular escenas y agregar puntos interactivos.

Figura 1

Ubicación del Bosque Protector Murocomba

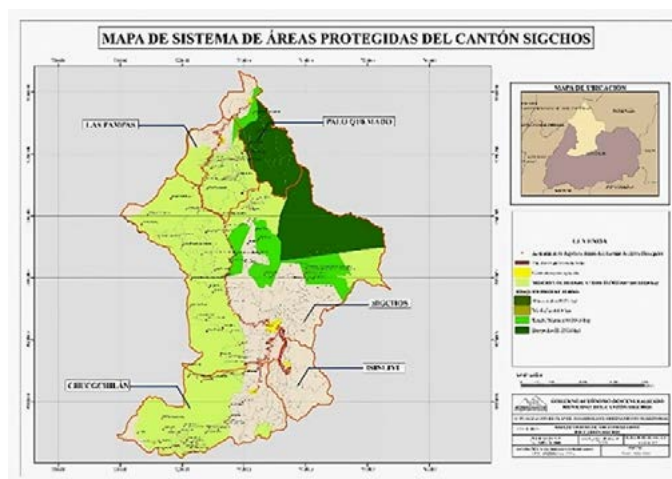
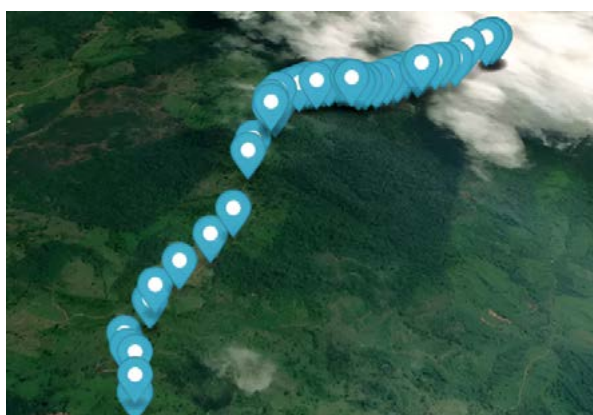


Figura 2

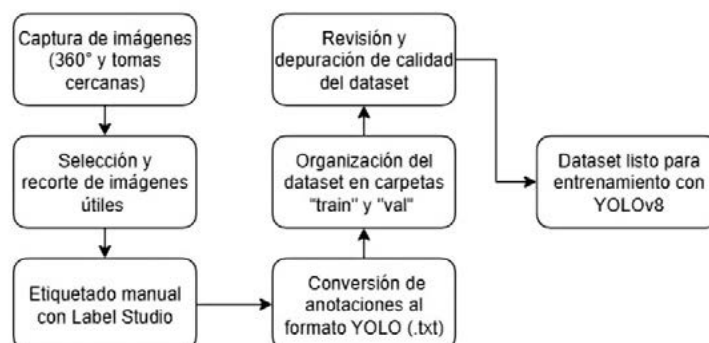
Ruta seguida para la captura de datos



Paralelamente, se elaboró un conjunto de datos compuesto por 793 imágenes etiquetadas manualmente, en las que se identificaron seis especies vegetales características del bosque. Estas imágenes fueron divididas en subconjuntos de entrenamiento y validación, y utilizadas

para entrenar un modelo de detección basado en la arquitectura YOLOv8. El proceso incluyó técnicas de aumento de datos, configuración de hiperparámetros y validación del rendimiento del modelo mediante métricas como la precisión promedio (mAP).

Figura 3
Diagrama del proceso de captura y tratamiento de imágenes



Finalmente, se integró el recorrido virtual y el sistema de detección en una aplicación web interactiva desarrollada con tecnologías estándar como HTML, JavaScript y ONNX, optimizando su rendimiento para dispositivos de distintas características. Esta metodología combinó la observación directa, el procesamiento digital de imágenes y el desarrollo de interfaces web con el propósito de ofrecer una experiencia inmersiva accesible, educativa y orientada a la conservación ambiental.

Resultados y Discusión

Identificación de senderos ecoturísticos

La primera etapa consistió en una exploración física detallada del Bosque Protector Murocomba, con el propósito de hallar el camino ecoturístico que mejor representara el área desde tres perspectivas principales: la biológica, la paisajística y la técnica. Este esfuerzo inicial fue clave para garantizar que la experiencia inmersiva que se desarrolló refleje la riqueza natural del bosque, sin poner en riesgo su delicado equilibrio ecológico. Se buscó virtualizar un trayecto que no solo fuera funcional, sino que también mostrara la esencia del lugar de una manera auténtica y respetuosa.

Para lograr esto, se llevó a cabo varios recorridos por las zonas transitables del bosque, usando como referencia aspectos como la variedad de plantas, la facilidad para el desplazamiento, la estabilidad del suelo y el valor educativo que el entorno ofrece. En este proceso, fue crucial contar con expertos locales que compartieron su conocimiento profundo del área. Además, se hizo uso de herramientas prácticas como un GPS para registrar ubicaciones importantes, y una cámara Insta360 ONE X2 para grabar videos y tomar fotos esféricas. La elección de esta cámara se debe a su alta resolución, costo accesible y capacidad de resistencia a las condiciones cambiantes del clima en el bosque.

A lo largo del recorrido presencial del lugar, se fueron recolectando datos geoespaciales que resultaron fundamentales para decidir qué partes del bosque se incluirían finalmente en el recorrido virtual. El enfoque estuvo principalmente en áreas donde existe amplia variedad de especies vegetales, y en lugares donde las plantas estaban en diferentes etapas de crecimiento. Esto permitió armar un trayecto que muestra la diversidad del ecosistema de forma realista y completa, para que quienes lo recorran digitalmente puedan apreciarlo tal y como es.

Figura 4
Reconocimiento presencial del terreno



El uso de la cámara 360 tuvo la finalidad de capturar imágenes esféricas a lo largo de las rutas elegidas. Estas imágenes sirvieron para el desarrollo y diseño posterior de la virtualización del sendero, así como para extraer de ellas a las especies que serán parte del modelo de reconocimiento. Además, se complementó con la toma de fotos tradicionales realizadas de forma cercana a cada especie, para complementar la creación del dataset necesario para el entrenamiento futuro del modelo.

Gracias a la ayuda de los expertos, se redujo el número de especies vegetales que formarán parte del modelo de entrenamiento, basando la elección principalmente en especies que tienen mayor presencia dentro de las zonas seleccionadas para la virtualización. Las seis especies seleccionadas se detallan a continuación:

Tabla 1
Inventario de especies seleccionadas

NOMBRE COMÚN	DENOMINACIÓN CIENTÍFICA	GRUPO TAXONÓMICO
Palma jardinera	Chamaedorea chapana	Arecaceae
Colca	Minonia crocea	Melastomataceae
Azulciza	Faramea suerrensis	Rubiaceae
Mursuelo	Browneopsis disepala	Fabaceae
Tumbiliyo	Bubbia semecarpoides	Monimiaceae
Zarzaparrilla	Smilax bona-nox	Smilacaceae

Diseño del recorrido virtual

Tras seleccionar el sendero ecoturístico más representativo del Bosque Protector Murocomba, se diseñó el recorrido virtual inmersivo utilizando técnicas de procesamiento digital de imágenes (PDI) y herramientas especializadas para transformar el material capturado en una experiencia interactiva y fiel al entorno.

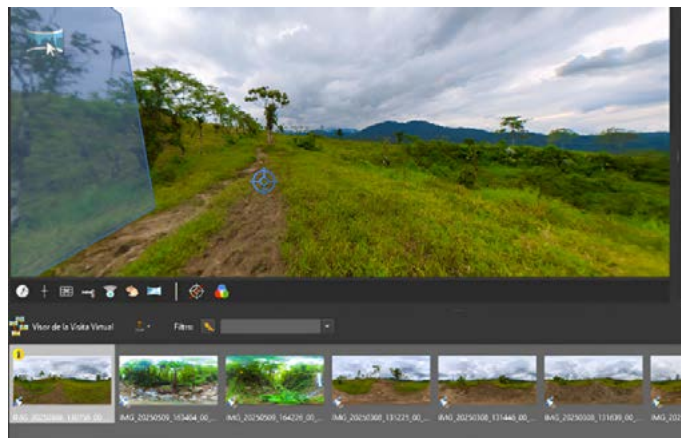
El proceso comenzó con el tratamiento de las imágenes esféricas capturadas por la cámara Insta360 ONE X2. Se corrigieron distorsiones del lente gran angular, se ajustó el horizonte y se

convirtieron las imágenes a formato equirectangular, asegurando una visualización fluida y sin defectos en el entorno virtual. La corrección de distorsión y conversión a formato equirectangular mejoró la calidad visual de los panoramas, obteniéndose valores promedio de PSNR 32.8 dB y SSIM 0.947, lo que asegura una proyección más nítida en el recorrido virtual.

Para construir el recorrido, se utilizó el software Pano2VR, que permitió organizar las imágenes panorámicas según su ubicación real y conectarlas mediante nodos interactivos. Cada escena se alineó con el trayecto definido en el trabajo de campo, garantizando una navegación lógica y coherente.

Figura 5

Diseño y organización del recorrido



Un aspecto clave fue la integración de hotspots poligonales, que delimitaron áreas irregulares en las imágenes 360° para resaltar especies vegetales. Estos hotspots activaban ventanas con datos como el nombre común, científico y familia botánica, enriqueciendo la experiencia con un enfoque educativo y científico.

Figura 6

Delimitación de polígonos por especie



La interfaz de navegación se diseñó para ser intuitiva, con menús contextuales, controles de movimiento, puntos de referencia y zoom, optimizada para funcionar en dispositivos móviles y navegadores de escritorio. Para mejorar el rendimiento, se implementó carga progresiva con imágenes en múltiples resoluciones, adaptándose al ancho de banda del usuario sin sacrificar calidad.

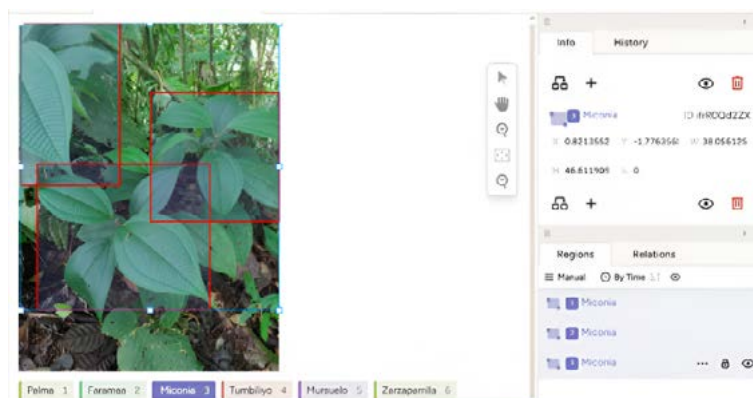
Figura 7
Fragmento del recorrido virtual



Desarrollo y evaluación de un modelo de entrenamiento para detectar especies vegetales

Para enriquecer el recorrido virtual del Bosque Protector Murocomba, se implementó un modelo de inteligencia artificial basado en YOLOv8, diseñado para identificar especies vegetales en el entorno inmersivo. Este modelo se entrenó con un dataset de 793 imágenes etiquetadas manualmente usando Label Studio, organizadas en seis clases de especies ecológicamente relevantes, divididas en 80 % para entrenamiento y 20 % para validación.

Figura 8
Etiquetado de imágenes y asignación de clases



Configuración del modelo

Se seleccionó YOLOv8n por su equilibrio entre precisión y eficiencia, ideal para navegadores web. Se aplicaron técnicas de aumento de datos, como inversión horizontal, desenfoque y ajustes de exposición, para adaptarse a las variaciones de luz y perspectiva del bosque. Los parámetros clave del entrenamiento se resumen a continuación:

Tabla 2
Principales hiperparámetros usados en el entrenamiento

PARÁMETRO	VALOR
Arquitectura	YOLOv8n
Número de clases	6
Tamaño de imagen	640x640 px
Número de épocas	100
Batch size	16
Learning rate inicial	0.001
Aumento de datos	Sí (flip, blur, exposure)

Rendimiento del modelo

Tras 100 épocas, el modelo mostró un desempeño sólido en el conjunto de validación, con métricas que confirman su capacidad para detectar especies bajo condiciones variables:

Tabla 3
Métricas de evaluación del modelo YOLOv8n

MÉTRICA	RESULTADO (%)
Precisión	91.3
Recall	88.6
mAP0.5	92.7
mAP0.5:0.95	73.4
F1-Score	89.9

La evaluación del modelo YOLOv8n mostró un desempeño robusto en la identificación de especies vegetales. Con una precisión del 91.3 %, el modelo acertó en la mayoría de sus detecciones, mientras que el *recall* (porcentaje de verdaderos positivos entre los casos reales) del 88.6 % indica que identificó casi todos los ejemplares reales en las imágenes. El F1-Score del 89.9 % refleja un balance sólido entre ambas métricas. El valor de mAP0.5 (92.7 %) corresponde al promedio de precisión para todas las clases, considerando una superposición mínima del 50 % entre la predicción y la anotación real. Por su parte, el mAP0.5:0.95 (73.4 %) representa el promedio de precisión calculado a lo largo de múltiples umbrales (desde 0.5 hasta 0.95), ofreciendo una evaluación más exigente. En conjunto, estas métricas confirman que el modelo YOLOv8n logró generalizar adecuadamente, manteniendo eficiencia y exactitud en un entorno con variabilidad natural como el bosque.

Tabla 4
Comparación de principales métricas entre dos modelos

MODELO	mAP@0.5 (%)	F1-score (%)	PRECISIÓN
YOLOv5n	89.6	86.7	88.0
YOLOv8n	96.4	96.6	91.3

Como referencia comparativa, se evaluó YOLOv5n en el mismo dataset, alcanzando un mAP@0.5 de 89.6 % y F1-score de 86.7 %, valores inferiores a los obtenidos por YOLOv8n. El rendimiento del dataset en estos dos modelos muestra una evidente diferencia, ratificando la razón de la elección del modelo mencionado.

Exportación y despliegue

Una vez completado el proceso de entrenamiento, el modelo fue exportado al formato ONNX, lo que permitió su ejecución directa en el navegador dentro del aplicativo web. Esta elección técnica representó una ventaja en términos de portabilidad, interoperabilidad y eficiencia, ya que ONNX está diseñado para funcionar en múltiples entornos sin necesidad de convertir el modelo a otros formatos específicos de *framework*.

El principal beneficio del despliegue en ONNX radica en que el modelo se ejecuta completamente de forma local en el navegador, sin requerir servidores externos ni procesamiento en la nube. Esto permitió mejorar los tiempos de respuesta, evitar la transmisión de datos sensibles y garantizar una mayor autonomía del sistema, permitiendo su funcionamiento incluso en contextos con conectividad limitada.

El aplicativo web fue probado en dispositivos de gama media: un PC portátil (Intel i5, 16 GB RAM) y en un smartphone Android (Snapdragon 778G). Se obtuvo una latencia promedio de 62 ms y 86 ms, respectivamente, con un rendimiento de 26 y 24 FPS. El tamaño total de descarga de la aplicación fue de ~42 MB, considerando a la experiencia de usuario como “buena” al no presentar caídas de fotogramas ni retardos al moverse entre panoramas.

Discusión

Nazare et al., (2024) sostiene que las plataformas de virtualización de ecosistemas facilitan la interacción con entornos naturales sin desplazamiento físico, contribuyendo a su preservación. Debido a esto, se considera que el proceso de identificación de senderos en el Bosque Protector Murocomba mediante imágenes 360° optimiza la digitalización del entorno sin afectar su conservación. Este proceso define puntos estratégicos para capturar imágenes en 360°, permitiendo crear un recorrido virtual que refleja la biodiversidad y características geográficas del bosque. La selección de senderos considera accesibilidad, atractivo visual y riqueza ecológica, priorizando rutas con alta diversidad de flora para entrenar un modelo de entrenamiento que identificará especies vegetales. La calidad de los datos es clave, ya que una selección inadecuada limitaría la precisión del modelo. Se enfrentaron a desafíos para equilibrar la representación del ecosistema con la viabilidad técnica de la captura, usando herramientas de geolocalización para trazar rutas eficientes.

Vongpaxa (2024) destaca que la tecnología WebVR documenta espacios patrimoniales, fomentando su conservación y accesibilidad. El recorrido virtual del Bosque Protector Murocomba, desarrollado con imágenes 360° y Pano2VR, se alinea con esta idea al permitir una exploración remota inmersiva sin impactar el ecosistema.

Usando Pano2VR por su compatibilidad multiplataforma, se procesaron imágenes RAW y JPEG, corregidas para eliminar distorsiones y convertidas a formato equirectangular, asegurando una visualización fluida. Las escenas, organizadas por ubicación real, se conectaron con nodos para transiciones suaves, mientras que hotspots interactivos añadieron datos educativos sobre especies vegetales. La interfaz optimizada y la exportación en HTML5/WebVR garantizan accesibilidad universal.

Cabe destacar que, aunque se lograron transiciones fluidas entre panoramas, las limitaciones por la gran cantidad de contenido multimedia que es necesaria para representar de manera fiel al ecosistema fueron una limitante, a diferencia de los entornos simulados que propone el autor antes mencionado, lo que destaca una necesidad de optimización para una virtualización de entornos reales.

Cho y Park (2023) destacan que las redes neuronales en entornos digitales optimizan la identificación visual, potenciando el aprendizaje automatizado. En este marco, el modelo YOLOv8n integrado en el recorrido virtual del Bosque Protector Murocomba demuestra su eficacia al identificar especies vegetales con precisión, enriqueciendo la exploración remota del ecosistema.

La aplicación web combina el modelo de reconocimiento con un recorrido inmersivo, permitiendo a los usuarios visualizar en tiempo real datos sobre especies, como clasificación y distribución, sin impactar el bosque. Esta integración fomenta la conservación y el estudio ecológico. La capacidad del sistema para procesar imágenes rápidamente apoya el monitoreo ambiental, aunque su precisión depende de la calidad del dataset y las condiciones del entorno. Incorporar validación manual o ajustes finos podría reducir errores.

Además, la interfaz intuitiva amplía el uso de la herramienta más allá de la investigación, beneficiando a estudiantes y ecoturistas interesados en la biodiversidad del bosque, alineándose con el potencial educativo y científico señalado por Cho y Park.

Conclusiones

La identificación de senderos ecoturísticos en el Bosque Protector Murocomba se logró exitosamente, asegurando una representación precisa del ecosistema en el recorrido virtual. La selección estratégica de rutas permitió capturar imágenes en 360°, documentando la biodiversidad del bosque y facilitando su posterior digitalización. Esta base sólida contribuirá a futuras iniciativas de conservación y monitoreo ambiental. Sin embargo, el desafío de equilibrar la representatividad del ecosistema con las limitaciones técnicas sugiere la necesidad de refinar las técnicas de captura en futuras expediciones, incorporando métodos que reduzcan la dependencia de condiciones ambientales variables.

La construcción del recorrido virtual inmersivo a través de imágenes 360° y su integración con Pano2VR proporcionó una experiencia interactiva y accesible. La correcta estructuración de escenas y la implementación de hotspots enriquecieron la exploración digital del bosque, optimizando la visualización de su biodiversidad y fomentando su uso educativo y científico. El diseño del recorrido virtual representa un paso adelante en la accesibilidad remota, gracias a ser exportado en formato HTML5. Esta solución multiplataforma permite a los usuarios explorar el bosque de manera inmersiva sin impacto directo. La optimización para una visualización fluida ha sido un logro notable, aunque la carga de contenido multimedia plantea retos de rendimiento, especialmente en dispositivos de baja capacidad. Para superar esta limitación, se propone explorar técnicas de compresión avanzadas y adaptaciones específicas para entornos móviles, asegurando que el recorrido sea una herramienta inclusiva y sostenible a largo plazo.

El entrenamiento del modelo YOLOv8n y su despliegue en la aplicación web han consolidado un sistema efectivo para la identificación de especies vegetales, superando enfoques previos con una mayor precisión y fluidez en la detección. La integración del modelo en el recorrido virtual enriquece la experiencia educativa, ofreciendo información en tiempo real sobre la flora del bosque y apoyando el monitoreo ecológico sin intervención física. A pesar de su éxito, la dependencia de la calidad del dataset y las condiciones del entorno indica la necesidad de expandir la diversidad de especies analizadas y refinar la interfaz para usuarios no expertos. Como siguiente paso, se sugiere incorporar detección de fauna, realizar evaluaciones extensivas con diversos públicos y colaborar con entidades locales para un monitoreo continuo, fortaleciendo así el impacto conservacionista y educativo del proyecto.

Reconocimientos y Declaraciones

Los autores declaran la contribución y participación equitativa de roles de autoría para esta publicación.

Los autores declaran que, en la elaboración del presente artículo, se ha utilizado herramientas de la IA.

Referencias

Cho, Y., & Park, K. S. (2023). Designing Immersive Virtual Reality Simulation for Environmental Science Education. *Electronics* 2023, 12(2), 315. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS12020315>

- Guo, K., Fan, A., Lehto, X., & Day, J. (2021). Immersive Digital Tourism: The Role of Multisensory Cues in Digital Museum Experiences. *Journal of Hospitality & Tourism Research*, 47(6), 1017–1039. <https://doi.org/10.1177/10963480211030319>
- Schöne, B., Kisker, J., Lange, L., Gruber, T., Sylvester, S., & Osinsky, R. (2023). The reality of virtual reality. *Frontiers in Psychology*, 14. <https://doi.org/10.3389/FPSYG.2023.1093014>
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). *Deep Residual Learning for Image Recognition* (pp. 770–778). <http://image-net.org/challenges/LSVRC/2015/>
- Nazare, A.-K., Moldoveanu, A., & Moldoveanu, F. (2024). Virtual Journeys, Real Engagement: Analyzing User Experience on a Virtual Travel Social Platform. *Information*, 15(7), 396. <https://doi.org/10.3390/info15070396>
- Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., & Farhadi, A. (2016). *You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection* (pp. 779–788). <http://pjreddie.com/yolo/>
- Rodríguez-Lira, D.-C., Córdova-Esparza, D.-M., Álvarez-Alvarado, J. M., Romero-González, J.-A., Terven, J., & Rodríguez-Reséndiz, J. (2024). Comparative Analysis of YOLO Models for Bean Leaf Disease Detection in Natural Environments. *AgriEngineering*, 6(4), 4585-4603. <https://doi.org/10.3390/agriengineering6040262>
- Shorten, C., & Khoshgoftaar, T. M. (2019). A survey on Image Data Augmentation for Deep Learning. *Journal of Big Data*, 6(1), 1–48. <https://doi.org/10.1186/S40537-019-0197-0/FIGURES/33>
- Vongpaxa, V. (2024). Application of WebVR Technology for 360-Panoramic Heritage Exploration: A Case Study of Wat Phou Heritage, Laos. *Engineering and Technology Journal*, 09(11). <https://doi.org/10.47191/ETJ/V9I11.01>

Sistema de Detección y Alerta de Incendios Forestales Basado en Procesamiento de Imágenes e IA

Forest Fire Detection and Alert System Based on Image Processing and AI

Erick Alexander Castillo Matamoros¹ <https://orcid.org/0009-0004-2558-5962>, Robert Sebastián Chalco Montalván¹ <https://orcid.org/0009-0001-3982-845X>, Santiago Renán González Martínez¹ <https://orcid.org/0000-0001-6604-889X>

¹Universidad de Cuenca, Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones, Cuenca, Ecuador

ericka.castillo@ucuenca.edu.ec, roberts.chalco@ucuenca.edu.ec, santiago.gonzalezm@ucuenca.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2025/06/27

Aceptado: 2025/08/20

Publicado: 2025/10/15

Resumen

El objetivo del presente trabajo se enfoca en el diseño e implementación de un sistema inteligente de bajo costo para la detección temprana de incendios forestales, utilizando tecnologías de IoT (*Internet of Things*) e IA (Inteligencia Artificial). La metodología diseñada implicó el desarrollo y la evaluación comparativa de múltiples algoritmos, divididos en dos enfoques: técnicas basadas en el análisis de espacios de color (RGB, YCbCr, HSI, HSV y PjF) y modelos de IA (CNN, YOLOv8 y Haar Cascade). A partir de este análisis, se seleccionó una arquitectura híbrida que integra los dos métodos de mayor rendimiento: un detector de objetos basado en YOLOv8 (Método 9) y un algoritmo cromático que fusiona los espacios PjF, RGB y YCbCr (Método 12). Este sistema visual se complementa con un sensor de partículas PM2.5 para validar la presencia de humo y módulos GPS/4G para emitir alertas georreferenciadas. Como resultado clave, el prototipo final validado en condiciones controladas alcanzó métricas destacadas como un 99.82 % de exactitud, 99.64 % de sensibilidad y 100 % de especificidad bajo condiciones de alta iluminación. También demostró eficiencia energética y estabilidad térmica mediante monitoreo continuo de CPU, RAM y consumo de corriente. La principal contribución del trabajo consiste en una solución de campo validada, cuya arquitectura híbrida demuestra ser precisa, eficiente y adaptable, confirmando su viabilidad para ser implementada en contextos de emergencia.

Sumario: Introducción, Trabajos Relacionados, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión, Conclusiones.

Cómo citar: Castillo, E., Chalco, R. & González, S. (2025). Sistema de Detección y Alerta de Incendios Forestales Basado en Procesamiento de Imágenes e IA. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 88-111.
<https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1352>

Palabras clave: sistemas embebidos, detección de incendios, monitoreo automatizado, reconocimiento de patrones, visión por computadora, inteligencia artificial.

Abstract

The objective of this work focuses on the design and implementation of a low-cost intelligent system for the early detection of forest fires, using IoT (Internet of Things) and AI (Artificial Intelligence) technologies. The designed methodology involved the development and comparative evaluation of multiple algorithms, divided into two approaches: techniques based on the analysis of color spaces (RGB, YCbCr, HSI, HSV, and PJF) and AI models (CNN, YOLOv8, and Haar Cascade). From this analysis, a hybrid architecture was selected that integrates the two highest-performing methods: an object detector based on YOLOv8 (Method 9) and a chromatic algorithm that fuses the PJF, RGB, and YCbCr spaces (Method 12). This visual system is complemented by a PM2.5 particle sensor to validate the presence of smoke and GPS/4G modules to issue georeferenced alerts. As a key result, the final prototype validated under controlled conditions achieved outstanding metrics such as 99.82% accuracy, 99.64% sensitivity, and 100.00% specificity under high illumination conditions. It also demonstrated energy efficiency and thermal stability through continuous monitoring of CPU, RAM, and current consumption. The main contribution of this work consists of a validated field solution, whose hybrid architecture proves to be accurate, efficient, and adaptable, confirming its feasibility for implementation in emergency contexts.

Keywords: embedded systems, fire detection, automated monitoring, pattern recognition, computer vision, artificial intelligence.

Introducción

Los incendios forestales constituyen una amenaza creciente para la sostenibilidad ambiental, la seguridad humana y el desarrollo económico de numerosas regiones. Su recurrencia se ha intensificado debido al cambio climático, la deforestación y la expansión urbana descontrolada. A nivel global, las sequías prolongadas y las olas de calor, reconocidas por organismos como la OMM (Organización Meteorológica Mundial), han incrementado significativamente el riesgo de incendios (Organización Meteorológica Mundial, 2024). Ecuador no ha sido la excepción; según el INAMHI, en 2024 se atravesó la peor sequía en más de seis décadas, particularmente en la región Sierra, lo que ha derivado en la pérdida de miles de hectáreas de vegetación, afectación a la biodiversidad y daños a comunidades vulnerables (Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, 2024; Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos, 2025).

La mayoría de estos eventos son provocados por actividades humanas, lo que subraya la urgencia de implementar soluciones tecnológicas para su prevención y detección oportuna. En muchas zonas rurales del país, la falta de sistemas automatizados de monitoreo agrava el impacto de estos desastres. Aunque se han impulsado medidas de capacitación y sensibilización ciudadana, estas deben complementarse con tecnologías emergentes como el IoT, la visión por computadora y la IA. Las soluciones basadas en sistemas inteligentes capaces de operar en tiempo real, validar condiciones ambientales, así como emitir alertas georreferenciadas, pueden transformar la gestión de riesgos, ofreciendo una respuesta más rápida y precisa ante focos incipientes de incendio.

En este contexto, se propone una arquitectura híbrida que integra algoritmos de visión por computadora y de IA para un análisis visual robusto. Esta detección se complementa con

sensores ambientales para validar la presencia de humo y con módulos de comunicación para la emisión de alertas georreferenciadas en tiempo real, todo implementado sobre hardware de bajo consumo energético.

El resto del artículo se encuentra organizado de la siguiente forma. En la sección de Trabajos Relacionados, se revisan los enfoques más relevantes para la detección de incendios basados en procesamiento de imágenes, IoT e IA. Posteriormente, en la sección Materiales y Métodos, se detalla la metodología seguida para el desarrollo del sistema, incluyendo la implementación de los algoritmos y la integración de sensores. A continuación, en la sección Resultados y Discusión, se presentan las métricas de evaluación obtenidas, tanto a nivel de precisión como del rendimiento operativo del sistema. Finalmente, se exponen las principales conclusiones del estudio.

Trabajos Relacionados

La creciente frecuencia de desastres ambientales ha impulsado la integración de tecnologías emergentes para desarrollar sistemas de monitoreo más eficientes. Por un lado, el IoT ha transformado la interacción entre dispositivos y entornos, habilitando el monitoreo continuo y la comunicación autónoma que son esenciales en aplicaciones ambientales (Xing et al., 2024). Por otro lado, la IA, especialmente las CNN (Redes Neuronales Convolucionales), ha revolucionado el procesamiento de imágenes al permitir la extracción automática de características y la identificación de patrones en tiempo real (Koschan y Abidi, 2008). La sinergia de estas tecnologías es hoy un pilar en las ciencias ambientales; investigaciones recientes demuestran un crecimiento exponencial de publicaciones en áreas como la monitorización de la calidad del aire y agua, y la gestión de desastres (Alotaibi y Nassif, 2024). Esta convergencia ha facilitado sistemas integrados que utilizan redes de sensores, drones y satélites para aplicar aprendizaje profundo en la detección activa de fuego (Yang et al., 2024; Dilshad et al., 2024).

Impulsados por el aumento en el poder computacional y la democratización de plataformas de bajo costo como Raspberry Pi, los avances en aprendizaje profundo han mejorado significativamente la detección de incendios. Se han integrado modelos como YOLO para la detección en tiempo real, U-Net para la segmentación precisa y redes híbridas (CNN-LSTM) para el análisis temporal, logrando reducir falsos positivos en entornos complejos (Vasconcelos et al., 2024). Estos desarrollos permiten una identificación temprana de incendios, contribuyendo a mitigar sus impactos ecológicos y humanos. A pesar del progreso en la precisión de los modelos predictivos y la analítica en tiempo real, persisten desafíos importantes como la calidad de los datos, la interoperabilidad de los sistemas y diversas consideraciones éticas (Miller et al., 2025).

Un primer conjunto de soluciones para la detección de incendios se basa en el análisis de imágenes utilizando espacios de color básicos. En concreto, en el espacio de color RGB se implementan reglas heurísticas como identificar regiones con tonalidades características del fuego. Una de estas reglas se basa en la relación entre los canales de color, expresada como:

$$(R(x,y) > G(x,y) > B(x,y))$$

Estas reglas se utilizan para identificar regiones con tonalidades características del fuego, como rojos y naranjas intensos (Buza y Akagic, 2022). A continuación, dichas reglas se complementan con umbrales de intensidad para filtrar falsas detecciones causadas por objetos brillantes o reflejos. Sin embargo, la sensibilidad a las variaciones de iluminación natural, como la luz solar o las sombras, limita la eficacia de estas propuestas, generando tasas elevadas de

falsos positivos en entornos no controlados (Celik et al., 2007). Para abordar estas deficiencias, existen soluciones que exploran espacios de color alternativos como YCbCr, que separa la luminancia (Y) de la crominancia (Cb, Cr). En este enfoque, se definen condiciones como la siguiente:

$$(Y(x,y) > Cb(x,y))$$

Y se incorpora lógica difusa para evaluar la probabilidad de presencia de fuego, mejorando la adaptabilidad a condiciones ambientales cambiantes (Celik et al., 2007). Adicionalmente, en (Wu et al., 2024) se propone combinar el espacio de color RGB con el espacio HSI (Tono, Saturación, Intensidad), utilizando parámetros como la saturación y la tasa de crecimiento de las llamas donde la tasa de crecimiento (α) se define como:

$$\left(\alpha = \frac{Y_{i+1}}{Y_i} \right)$$

Este método reduce significativamente los errores al analizar el comportamiento temporal de las llamas. Un hito en este ámbito fue el desarrollo del espacio de color PJF, específicamente diseñado para optimizar la detección de fuego. Este espacio mejora la representación cromática de las llamas, alcanzando una precisión del 99.8 % en entornos controlados, aunque su rendimiento disminuye en escenarios reales con interferencias (Hamida et al., 2022). En tal contexto, en la literatura se propone integrar técnicas de procesamiento de imágenes como la umbralización adaptativa para segmentar regiones de interés, el filtrado mediano para eliminar ruido, las operaciones morfológicas para refinar contornos y la segmentación por regiones para analizar áreas complejas. Adicionalmente, se destaca el uso del coeficiente de correlación de Pearson para validar la presencia de fuego mediante el análisis de cambios entre fotogramas consecutivos, aumentando la confiabilidad en entornos dinámicos (Anh et al., 2022). A pesar de estos avances, los métodos tradicionales siguen enfrentando desafíos en condiciones de iluminación variable y confusión con objetos de colores similares, como luces artificiales o reflejos solares.

Por otra parte, la llegada de la IA marcó un cambio radical en la detección de incendios forestales, al introducir modelos capaces de aprender y adaptarse a patrones complejos sin depender de reglas predefinidas. Una aplicación destacada de estas técnicas es el análisis de imágenes satelitales, donde se utilizan datos de instrumentos como Sentinel-1, Sentinel-2 y MODIS para la segmentación de áreas quemadas a gran escala (Rashkovetsky et al., 2021). Si bien estos sistemas son potentes, enfrentan limitaciones como la cobertura de nubes, lo que ha llevado a proponer la fusión de datos de sensores ópticos y de radar para garantizar la detección. En sistemas terrestres, las CNN destacan por su capacidad para extraer automáticamente características jerárquicas de las imágenes, como bordes, texturas y formas, eliminando la necesidad de diseñar manualmente descriptores visuales. En el estudio Altowaijri et al. (2021), propone integrar CNN con sistemas IoT para monitoreo en tiempo real, utilizando descriptores binarios robustos que optimizan el procesamiento en dispositivos de bajo costo y conservan la privacidad al evitar el almacenamiento de imágenes crudas. Modelos preentrenados como ResNet50, ajustados mediante *transfer learning*, han demostrado precisiones superiores al 99.0 % en la identificación de fuego, incluso en datasets con alta diversidad (Moreno Rubio, 2021).

El algoritmo YOLO, conocido por su eficiencia en detección en tiempo real, ha sido ampliamente adoptado en este campo. En un caso práctico, se implementó en una Raspberry Pi

con cámaras tipo ojo de pez, logrando un procesamiento rápido y preciso en entornos forestales, ideal para despliegues de bajo costo (Lee et al., 2023). La versión de YOLOv8 ha demostrado una alta efectividad, alcanzando precisiones del 97.1 % para la detección de fuego en entornos de ciudades inteligentes (Talaat y ZainEldin, 2023) y precisiones de clasificación del 92.6 % en sistemas montados en UAVs (Bhargav y Singh, 2025). En otra propuesta se plantea combinar YOLO con sensores IoT, como el MQ-2 para detectar humo, integrando datos visuales y químicos para aumentar la robustez de las detecciones (Avazov et al., 2023). Por su parte, el clasificador en cascada de Haar, basado en características *Haar-like*, ha ofrecido resultados prometedores en aplicaciones específicas. En el estudio (Pranamurti et al., 2019), se combinó con IoT para generar alertas en tiempo real, mientras que otra implementación (Shrestha, 2020), optimizada con AdaBoost, alcanzó una precisión del 92 %, aunque mostró limitaciones en detecciones a larga distancia debido a la pérdida de resolución. Estos enfoques avanzados han elevado los estándares de precisión y velocidad en la detección de incendios. Sin embargo, persisten retos como la optimización del consumo energético en dispositivos IoT, la cobertura en áreas remotas sin infraestructura de red y la integración efectiva de múltiples fuentes de datos (visuales, térmicas y químicas) para minimizar falsos negativos. La combinación de IA e IoT está sentando las bases para sistemas más resilientes y adaptables.

Materiales y Métodos

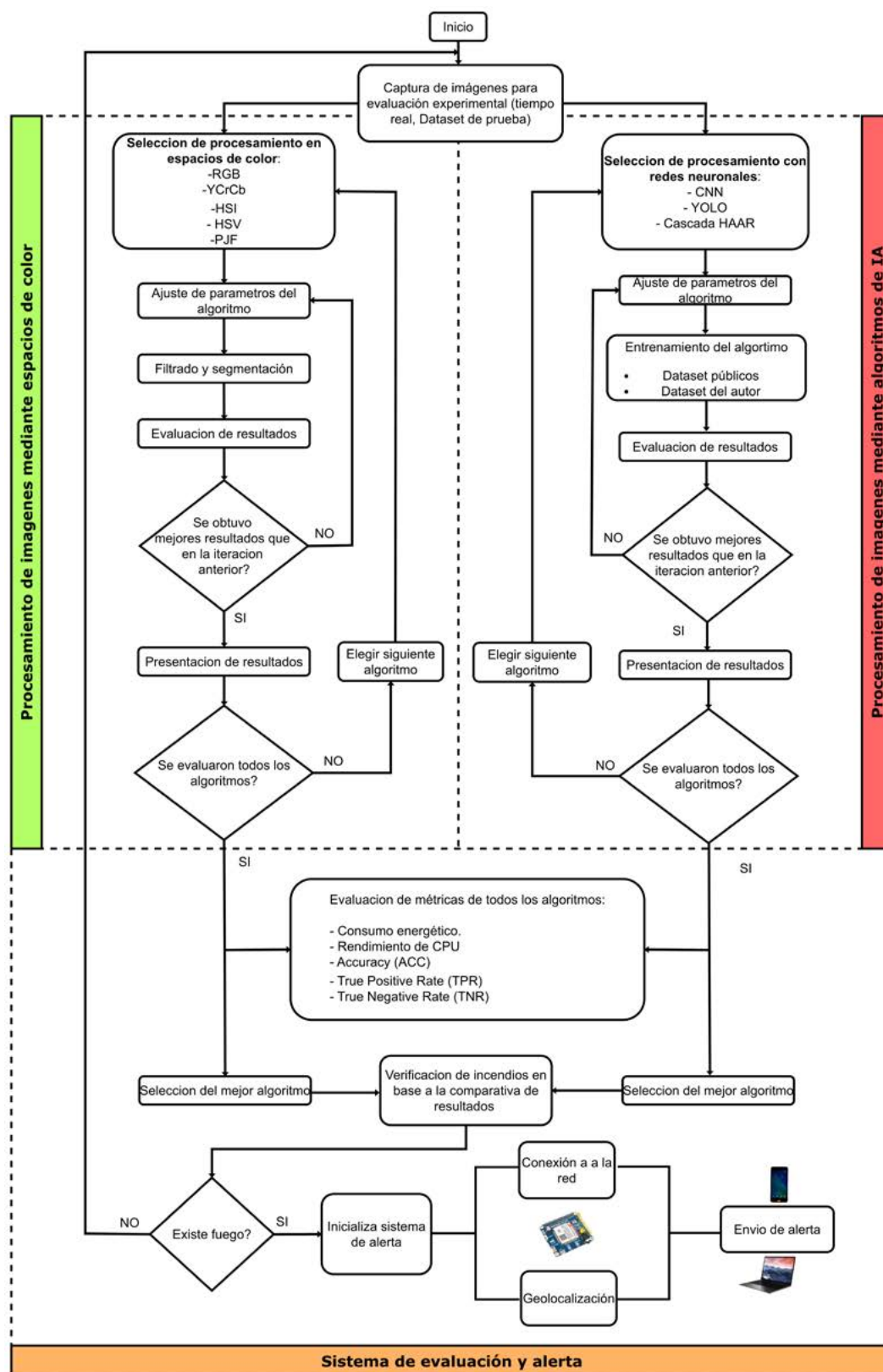
La Figura 1 presenta el diagrama metodológico diseñado para el desarrollo del sistema, el cual se estructura en tres etapas. La primera etapa corresponde al procesamiento de imágenes mediante algoritmos basados en espacios de color, incluyendo el diseño, implementación y evaluación comparativa de distintos métodos de segmentación cromática aplicados a la detección de fuego. La segunda etapa abarca el procesamiento de imágenes mediante algoritmos basados en IA, en particular las CNN optimizadas para tareas de clasificación y detección de objetos, cuya efectividad también fue evaluada a través de métricas específicas. Finalmente, la tercera etapa corresponde al análisis integral de las métricas obtenidas por los algoritmos desarrollados y la integración de un sistema automatizado de generación de alertas, el cual valida la presencia de un incendio mediante parámetros visuales y ambientales antes de emitir notificaciones georreferenciadas.

Procesamiento de imágenes mediante espacios de color

En la primera etapa de la metodología se desarrollaron algoritmos de procesamiento de imágenes basados en espacios de color, específicamente los métodos del 1 al 7. Estos algoritmos fueron diseñados tomando como base referencias del estado del arte en detección de fuego, empleando modelos cromáticos como RGB (*Red, Green, Blue*), YCbCr (*Luma, Blue-difference Chrominance, Red-difference Chrominance*), HSV (*Hue, Saturation, Value*) y PJF (*Brightness, Red-Green, Yellow-Blue*). No obstante, cada uno de ellos fue objeto de ajustes estructurales y parametrización experimental, con el fin de adaptarlos a las condiciones particulares del entorno de despliegue y optimizar su rendimiento frente a variaciones de iluminación y presencia de elementos visualmente similares al fuego. La Tabla 1 resume las principales características de estos algoritmos. Como resultado de una evaluación comparativa de estos métodos en escenarios controlados, se identificó que el Método 7, basado en el espacio de color PJF, ofrecía una de las mejores tasas de detección en términos de sensibilidad y especificidad. A partir de este hallazgo, y con el objetivo de mejorar aún más el rendimiento de los enfoques cromáticos, se desarrollaron los métodos 11 al 14, los cuales integran operaciones adicionales como validación por canales RGB, segmentación lógica en YCbCr y HSI, así como técnicas de fusión de máscaras y filtrado morfológico. Estas versiones fueron construidas como combinaciones estructuradas que amplían las capacidades del Método 7, priorizando la detección robusta y la reducción de falsos positivos en condiciones ambientales diversas.

Figura 1

Esquema de la metodología desarrollada para la detección y alerta de incendios forestales en tiempo real



Procesamiento de imágenes mediante algoritmos de IA

En esta etapa se abordó el desarrollo de algoritmos de detección basados en IA, correspondientes a los métodos 8, 9 y 10. Esta fase incluyó el diseño y entrenamiento de modelos

como CNN, el algoritmo de detección en tiempo real YOLO y el clasificador en cascada de Haar. Con el propósito de asegurar una generalización adecuada y evitar problemas de sobreajuste, cada modelo fue sometido a un proceso de calibración mediante pruebas preliminares, evaluando el equilibrio entre sensibilidad y especificidad en distintos niveles de entrenamiento. Para ello se utilizaron bases de datos públicas como RoboFlow (Roboflow, 2020) y Kaggle (Kaggle, s/f), las cuales fueron complementadas con un conjunto de imágenes generado mediante la simulación controlada de un entorno real de incendio. Esta estrategia permitió incluir condiciones visuales locales, mejorar la representación de variabilidad en los datos y ajustar los modelos a los desafíos propios del entorno de despliegue. La Tabla 1 detalla las especificaciones técnicas de estos métodos, su estructura operativa y el tipo de entrada que utilizan, permitiendo visualizar su complementariedad frente a los algoritmos cromáticos desarrollados en la primera etapa.

Tabla 1
Características principales de los algoritmos desarrollados, basados en espacios de color e IA

MÉTODO 1	
Espacio de Color	RGB
Preprocesamiento	Extracción de canales R, G, B; cálculo de Rmedia
Filtrado	Cinco condiciones lógicas sobre R, G, B
Segmentación	Binarización, detección de contornos, filtrado por área mínima, agrupación de regiones
MÉTODO 2	
Espacio de Color	RGB
Preprocesamiento	Supresión de valores < media geométrica de cada canal
Filtrado	Ajuste de canal rojo; umbralización global Otsu para máscara γ ; umbrales adaptativos locales en 6 franjas
Segmentación	Refinado de máscara (morfología, eliminación de ruido); intersección de máscaras horizontales y verticales
MÉTODO 3	
Espacio de Color	YCbCr
Preprocesamiento	Conversión a YCbCr; máscara heurística preliminar
Filtrado	Cálculo de diferencia entre canales; sistema de inferencia difusa
Segmentación	Mapa de probabilidad; umbralización difusa; contornos y agrupación
MÉTODO 4	
Espacio de Color	Paralelo en RGB y YCbCr
Preprocesamiento	Conversión a ambos espacios; cálculo de medias
Filtrado	RGB: umbrales fijos; YCbCr: condiciones lógicas vs. medias
Segmentación	Intersección de máscaras; morfología; contornos
MÉTODO 5	
Espacio de Color	Paralelo en RGB y HSI
Preprocesamiento	Extracción de canales H, S, I; cálculo de saturación media
Filtrado	Condiciones lógicas mixtas "RGB-HSI"; dilatación morfológica
Segmentación	Detección de contornos y filtrado por área mínima
MÉTODO 6	
Espacio de Color	HSV
Preprocesamiento	Conversión a HSV; normalización de rangos
Filtrado	Generación de dos máscaras via inRange para H, S, V
Segmentación	Unión (OR) de máscaras; contornos; agrupación de área mínima
MÉTODO 7	
Espacio de Color	PJF
Preprocesamiento	Cálculo de componentes P, J, F
Filtrado	Máscaras fijas elementales: $P > 220$, $J > 60$, $F > 230$
Segmentación	Combinación lógica ($P*J + F*J$); detección de contornos y agrupación de áreas mínimas.

MÉTODO 8	
Tipo de modelo	Clasificador binario
Algoritmo de IA	CNN
Procedimiento	1. Recolectar imágenes y etiquetarlas como “fuego” o “no fuego”. 2. Separar los datos en conjuntos de entrenamiento, validación y prueba. 3. Aplicar transformaciones (rotaciones, recortes) para aumentar la variedad. 4. Definir la arquitectura de la red y sus capas. 5. Entrenar el modelo ajustando pesos en cada pasada.
Datasets	Imágenes usadas para el entrenamiento: 1828 con fuego y 3015 sin fuego.
Épocas entrenadas	28
MÉTODO 9	
Tipo de modelo	Detector de objetos
Algoritmo de IA	YOLOv8
Procedimiento	1. Reunir imágenes con y sin fuego, etiquetando posición en las positivas 2. Organizar carpetas según formato YOLO (imágenes y etiquetas). 3. Generar el archivo de configuración data.yaml. 4. Dividir el conjunto en entrenamiento, validación y prueba. 5. Ejecutar el entrenamiento con YOLOv8.
Datasets	Imágenes usadas para el entrenamiento: 1828 con fuego y 914 sin fuego.
Épocas entrenadas	25
MÉTODO 10	
Tipo de modelo	Detector de objetos
Algoritmo de IA	Clasificador en cascada Haar
Procedimiento	1. Generar listados de imágenes con y sin fuego en archivos de texto. 2. Crear el archivo de muestras posi.vec con la herramienta de OpenCV. 3. Entrenar el clasificador en varias etapas con OpenCV. 4. Dividir el conjunto en entrenamiento, validación y prueba. Ajustar parámetros de etapas, tamaño de ventana y memoria asignada. 5. Ejecutar el entrenamiento del modelo
Datasets	Imágenes usadas para el entrenamiento: 1006 con fuego y 3015 sin fuego.
Épocas entrenadas	17
MÉTODO 11	
Espacio de Color	PJF + RGB
Preprocesamiento	Conversión al espacio PJF y extracción de canales R, G, B
Filtrado	Aplicación de condiciones lógicas combinadas sobre canales RGB y máscaras del Método 7
Segmentación	Máscaras refinadas por contorno y área mínima, combinadas lógicamente
MÉTODO 12	
Espacio de Color	PJF + RGB + YCbCr
Preprocesamiento	Conversión simultánea a ambos espacios de color
Filtrado	Umbrales específicos para canales RGB; condiciones lógicas sobre YCbCr (Método 4)
Segmentación	Fusión de máscaras de ambos espacios; morfología para refinar
MÉTODO 13	
Espacio de Color	PJF + HSV
Preprocesamiento	Conversión a HSV y cálculo de componentes del modelo PJF
Filtrado	Aplicación de condiciones sobre saturación y máscaras HSV
Segmentación	Combinación lógica con máscara PJF; refinamiento por contornos y área
MÉTODO 14	
Espacio de Color	PJF + RGB + HSI
Preprocesamiento	Extracción de canales R, G, B, y cálculo de H, S, I (Método 5)
Filtrado	Condiciones sobre saturación y factor de ajuste K; combinación con máscaras RGB
Segmentación	Operaciones morfológicas (dilatación) y fusión final de máscaras

Sistema de evaluación y alerta

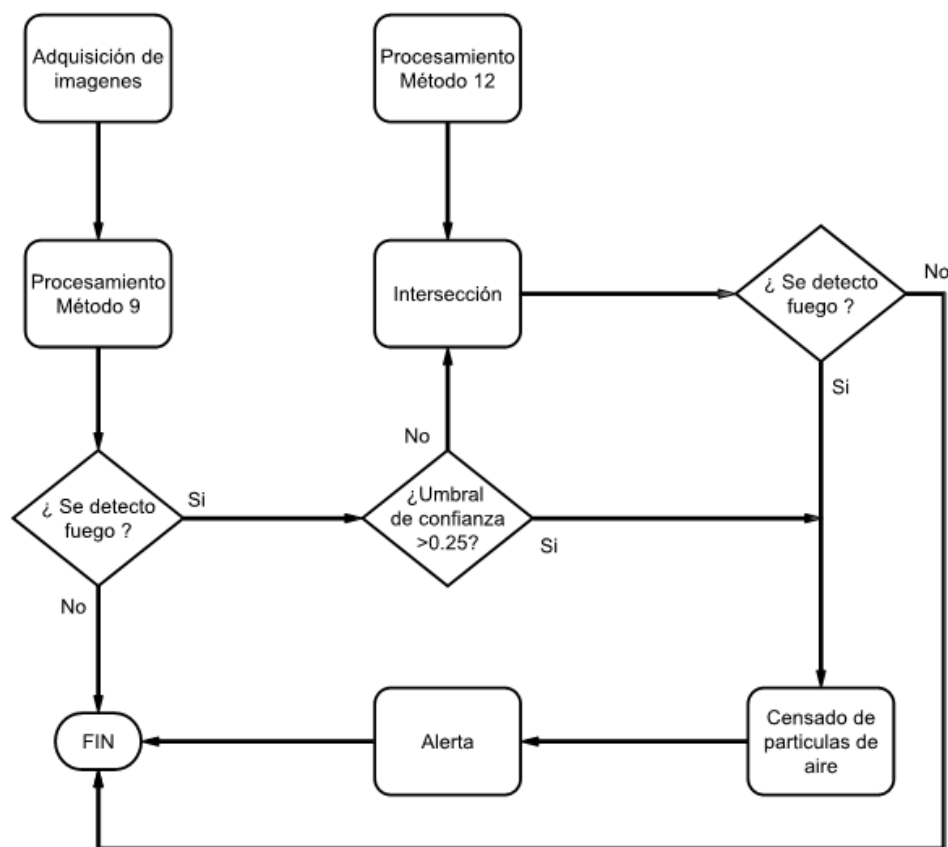
Para evaluar el desempeño general del sistema desarrollado, se definieron dos categorías de métricas: las métricas de evaluación del modelo y las métricas de rendimiento del sistema. En el primer grupo se consideraron indicadores clásicos como la exactitud (ACC, *Accuracy*),

la tasa de verdaderos positivos (TPR, *True Positive Rate*) y la tasa de verdaderos negativos (TNR, *True Negative Rate*). Estas métricas permiten cuantificar la capacidad del sistema para detectar correctamente tanto la presencia como la ausencia de eventos de incendio, y fueron calculadas a partir de pruebas controladas bajo diferentes condiciones ambientales. En cuanto al rendimiento operativo, se monitorearon parámetros como la corriente de operación en miliamperios, el porcentaje de uso del CPU, el consumo de memoria RAM y la temperatura del procesador durante el funcionamiento continuo. Para esta última categoría se utilizó un módulo INA219 (Texas Instruments, 2008), encargado de realizar mediciones en tiempo real del consumo eléctrico del sistema. Este componente, integrado físicamente dentro del encapsulado electrónico, se visualiza en el esquema de la Figura 4 y fue fundamental para asegurar la eficiencia energética del sistema en condiciones reales de despliegue.

El sistema final implementado integra una lógica híbrida de verificación que combina el Método 9, basado en IA, y el Método 12, basado en segmentación cromática. El flujo de decisión inicia con el análisis visual mediante ambos métodos; si el Método 9 detecta fuego con un nivel de confianza superior a 0.25, se activa directamente la siguiente fase de validación.

Figura 2

Diagrama de funcionamiento de la solución integral (sistema final) desarrollado, desde la adquisición de imágenes en tiempo real hasta la generación de la alerta



En caso contrario, se evalúa si el Método 12 también identifica fuego y si existe una coincidencia espacial significativa entre ambas segmentaciones. Solo si se cumple esta condición se considera la detección como válida. Una vez superada esta verificación visual, el sistema ejecuta una etapa adicional mediante el sensor PMS5003 (Zhou y Zheng, 2016), encargado de medir la concentración de partículas PM2.5 en el aire. Si dicha concentración supera el

umbral de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ definido experimentalmente, el sistema confirma la presencia del siniestro y se procede con la activación del sistema de alerta. La lógica detallada de esta arquitectura se representa en la Figura 2, donde se esquematiza el flujo completo desde la adquisición de imágenes hasta la validación ambiental. Para corroborar la funcionalidad del sistema en un entorno representativo, se realizó una implementación de campo simulando condiciones reales de incendio. La Figura 3 muestra el montaje final del prototipo, evidenciando la disposición de los sensores, la orientación de la cámara y la operación autónoma en condiciones naturales.

Figura 3

Montaje del escenario final en un entorno real controlado

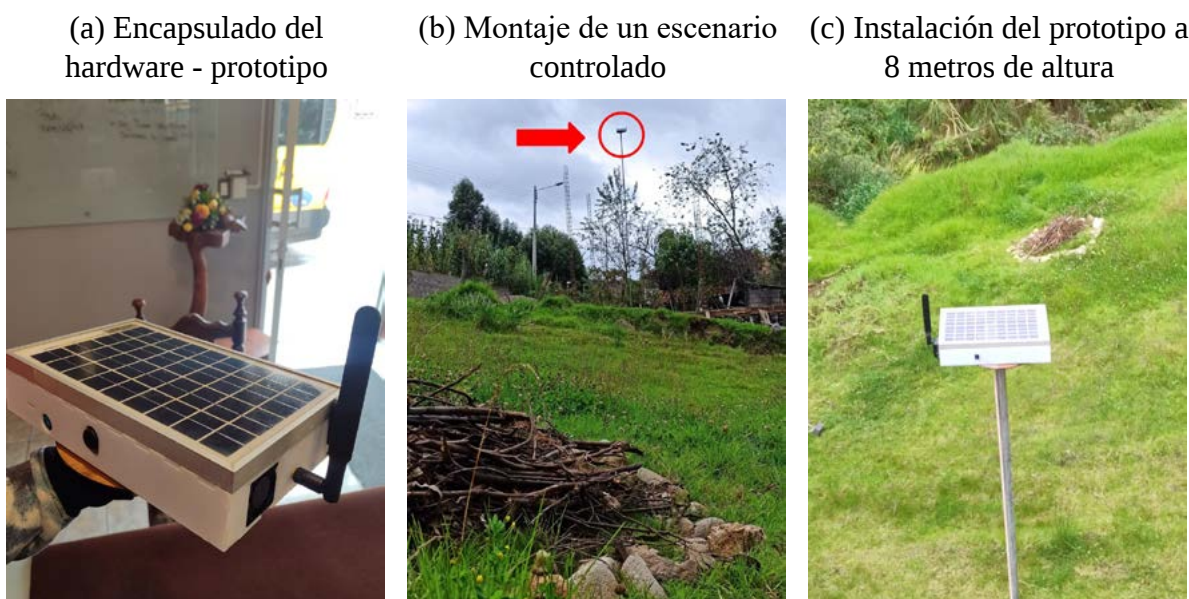
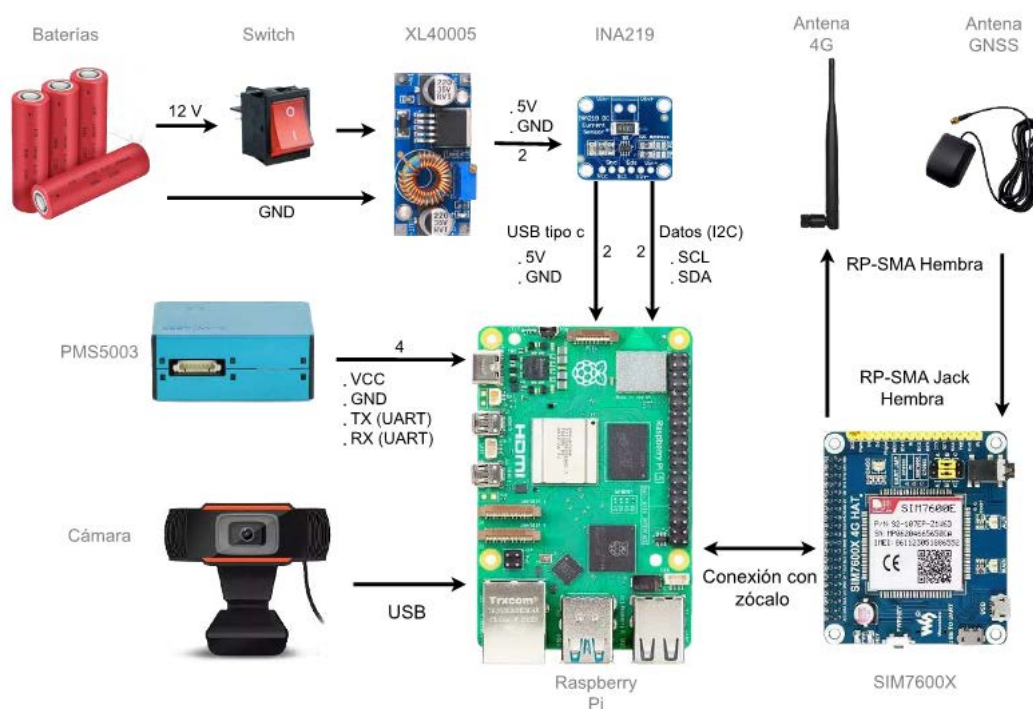


Figura 4

Esquema de conexiones de todos los componentes que conforman el hardware del prototipo



El sistema de alerta fue diseñado para emitir notificaciones automáticas en tiempo real una vez confirmada la presencia de un incendio. Estas notificaciones incluyen una imagen del evento detectado, las coordenadas geográficas obtenidas mediante el módulo GPS y un enlace a Google Maps para facilitar la localización remota del siniestro. El mensaje es enviado a través de la red celular 4G mediante el módulo SIM7600X (Waveshare, 2021) hacia un grupo de Telegram configurado como canal de alerta. Esta funcionalidad garantiza una respuesta rápida por parte de las autoridades o personal designado, incluso en zonas sin infraestructura de red fija. Todos los componentes, incluyendo la Raspberry Pi 4B, la cámara digital, el sensor PMS5003, el módulo GPS, el módulo SIM7600X y el INA219, están organizados dentro de un encapsulado compacto y resistente, diseñado para soportar condiciones ambientales adversas. La disposición física y lógica de estos elementos se detalla en el esquema eléctrico y de conexión presentado en la Figura 4.

Resultados y Discusión

La presente sección expone los resultados obtenidos tras la evaluación del sistema propuesto, abordando tanto el desempeño de los algoritmos de detección como las condiciones operativas del sistema en un entorno de prueba. Para una mejor organización, los resultados se presentan en tres bloques principales: primero, se analizan las métricas de evaluación de los algoritmos desarrollados en dos escenarios controlados; posteriormente, se detallan las métricas de rendimiento del sistema desde el punto de vista energético y computacional; y finalmente, se describe el comportamiento operativo del sistema final durante su despliegue en un entorno simulado.

Métricas de evaluación del modelo

Con base en el flujo metodológico descrito en la Figura 1, esta sección presenta los resultados obtenidos tras la aplicación de los algoritmos desarrollados a distintos escenarios de prueba. En el escenario 1 se evalúan los métodos del 1 al 14, considerando tanto algoritmos basados en espacios de color como técnicas de IA. Esta evaluación se realiza sobre un conjunto mixto compuesto por imágenes de bases públicas y registros obtenidos en simulaciones controladas. Por otro lado, el escenario 2 corresponde a pruebas realizadas exclusivamente en un entorno real, en el cual se evalúa el desempeño del sistema final implementado, ya integrado con su lógica híbrida de decisión y validación ambiental.

Escenario 1

Al analizar este primer escenario, los resultados presentados en la Tabla 2 revelan un claro contraste en el rendimiento de los algoritmos. Entre los enfoques basados en espacios de color, el Método 12 se posiciona como el más robusto, alcanzando una exactitud del 99.37 %. Por su parte, el Método 9, basado en YOLOv8, lidera entre las técnicas de IA con un 99.21 % de exactitud.

El éxito del Método 12 radica en su arquitectura de fusión multiespacio, que hereda y combina las estrategias más efectivas de otros métodos. Su base es el Método 7, utilizando el espacio de color PJF que está específicamente diseñado para resaltar las características de luminancia (P) y cromaticidad (J, F) del fuego; sobre este, aplica una segmentación inicial mediante umbrales fijos y una combinación lógica de máscaras. A esta detección primaria, el Método 12 le superpone la lógica del Método 4, realizando un filtrado dual: primero, en el espacio RGB, aplica umbrales cromáticos fijos para validar el perfil de color de un incendio; y segundo, en el espacio YCbCr, utiliza condiciones lógicas que comparan los valores de los canales contra sus promedios para añadir robustez frente a variaciones de iluminación. Es la

fusión final mediante la intersección de estas máscaras lo que le otorga su alta precisión; un píxel solo se clasifica como fuego si cumple simultáneamente los criterios en los tres dominios analíticos, reduciendo drásticamente los falsos positivos.

Tabla 2

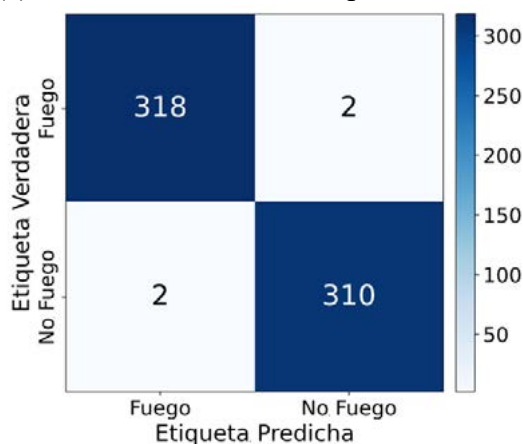
Resumen de las métricas estadísticas obtenidas en la evaluación de los algoritmos basados en espacios de color, IA y algoritmos combinados en el escenario 1

	MÉTODO	ACCURACY (ACC)	TRUE POSITIVE RATE (TPR)	TRUE NEGATIVE RATE (TNR)
Espacios de color	1	96.20 %	97.50 %	94.87 %
	2	90.66 %	85.00 %	96.47 %
	3	72.63 %	49.69 %	96.15 %
	4	95.25 %	97.81 %	92.63 %
	5	86.87 %	79.06 %	94.87 %
	6	92.09 %	88.75 %	95.51 %
	7	97.31 %	99.69 %	94.87 %
IA	8	98.58 %	98.44 %	98.72 %
	9	99.21 %	99.69 %	98.72 %
	10	72.94 %	63.12 %	83.01 %
Espacios de color	11	96.99 %	94.38 %	99.68 %
	12	99.37 %	99.38 %	99.36 %
	13	83.70 %	68.44 %	99.36 %
	14	94.15 %	88.75 %	99.68 %

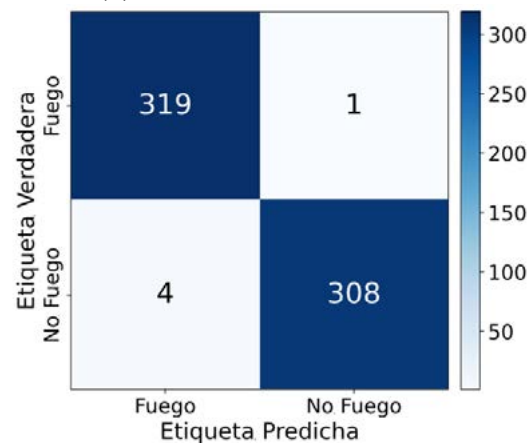
Figura 5

Matrices de confusión de los métodos con mejor desempeño en el escenario 1

(a) Método 12 basado en espacios de color



(b) Método 9 basado en IA



En contraste, el Método 9 (YOLOv8) destaca por una razón diferente: su capacidad de aprender características jerárquicas y contextuales directamente de los datos. A diferencia de los métodos basados en reglas fijas (ej. $R > G > B$), YOLOv8 no solo identifica el color, sino también patrones más abstractos como la textura, la forma y la distribución espacial que caracterizan una llama, lo que le confiere una capacidad de generalización superior. Por otro lado, métodos con menor rendimiento como el Método 3 (Lógica Difusa) y el Método 10 (Haar Cascade) mostraron dificultades. El primero, a pesar de su sofisticación, depende de funciones de membresía predefinidas que pueden no ajustarse a la variabilidad del entorno simulado, mientras que el segundo utiliza características rectangulares simples, poco adecuadas para detectar fenómenos amorfos y de textura variable como el fuego.

Estos resultados adquieren especial relevancia dado que el conjunto de validación

incorpora imágenes capturadas en un entorno realista simulado, confirmando la robustez y capacidad de generalización de los algoritmos líderes. Para complementar este análisis, la Figura 5 presenta las matrices de confusión del Método 12 y el Método 9. Ambas reflejan un alto grado de precisión; el Método 12 clasificó correctamente 318 imágenes con fuego y 310 sin fuego (4 errores), mientras que el Método 9 detectó 319 con fuego y 308 sin fuego (5 errores). La baja cantidad de fallos en ambos enfoques confirma su fiabilidad y justifica plenamente su selección para ser integrados en la arquitectura del sistema final.

Escenario 2

Los resultados obtenidos durante la validación de este escenario se presentan en la Tabla 3 y se ilustran comparativamente en la Figura 6, permitiendo evaluar el desempeño del Método 9 basado en IA, el Método 12 basado en espacios de color y la solución integrada (sistema final) frente a las variaciones de este escenario, como se presenta en la Figura 7. En dicha figura se visualizan las tres condiciones representativas consideradas: (a) alta iluminación donde predomina la incidencia solar directa, característico de una época de estiaje en la zona de interés; (b) interferencia visual, caracterizada por elementos de colores similares al fuego, como objetos o ropa de color rojo; y (c) escenario estándar, que representa condiciones normales de un día en la ciudad de Cuenca. Estas variaciones permiten analizar el comportamiento del sistema frente a escenarios reales con distintos niveles de complejidad visual. Cabe destacar que para esta validación se utilizaron un total de 6600 imágenes, distribuidas equitativamente en cada condición con 1100 imágenes con fuego y 1100 sin fuego por variación.

Figura 6

Métricas estadísticas del método 9, método 12 y solución integral (sistema final) frente a diferentes desafíos del escenario 2

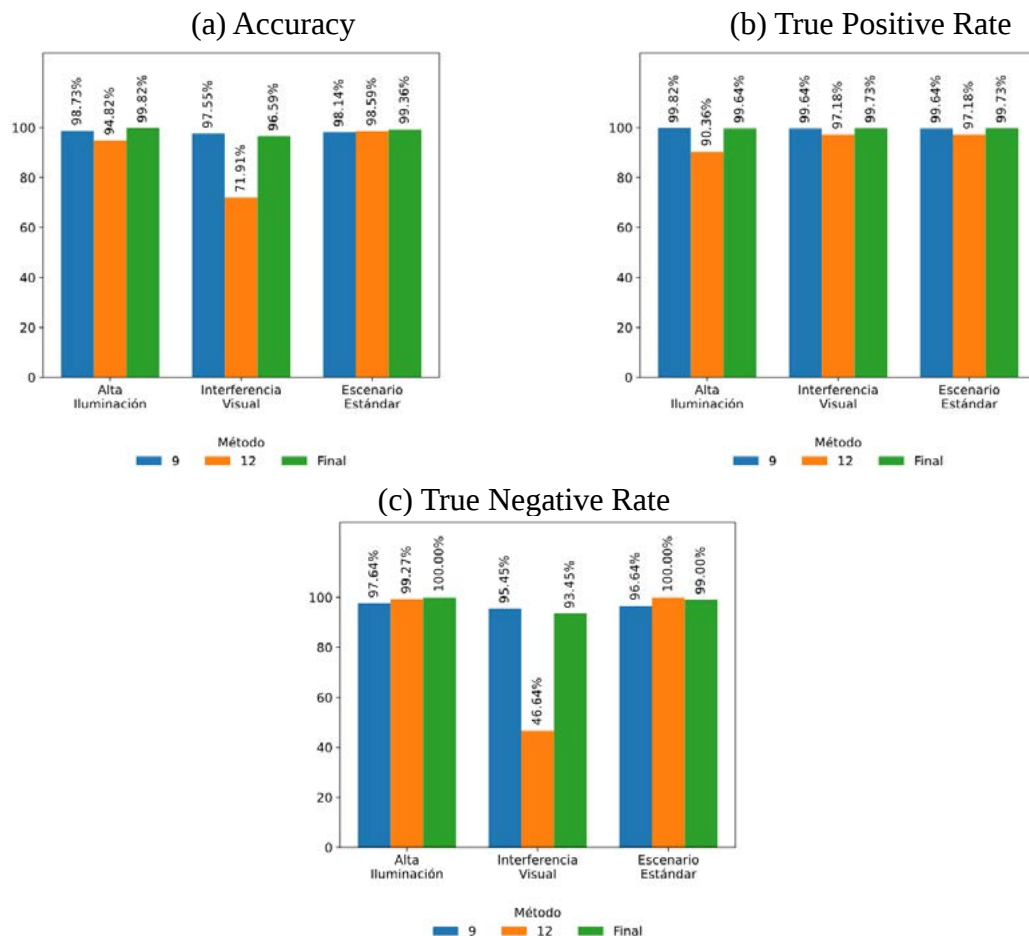


Tabla 3

Resumen de las métricas estadísticas del método 9, método 12 y solución integral (sistema final) frente a diferentes desafíos del escenario 2

	MÉTODO	ACCURACY (ACC)	TRUE POSITIVE RATE (TPR)	TRUE NEGATIVE RATE (TNR)
Alta iluminación	9	98.73 %	99.82 %	97.64 %
	12	94.82 %	90.36 %	99.27 %
	Sistema Final	99.82 %	99.64 %	100.00 %
Interferencia visual	9	97.55 %	99.64 %	95.45 %
	12	71.91 %	97.18 %	46.64 %
	Sistema Final	96.59 %	99.73 %	99.45 %
Condiciones estándar	9	98.14 %	99.64 %	96.64 %
	12	98.59 %	97.18 %	100.00 %
	Sistema Final	99.36 %	99.73 %	99.00 %

Figura 7

Imágenes capturadas en cada variación del escenario 2

(a) Escenario con alta iluminación solar



(b) Escenario con interferencia visual presente



(c) Escenario con condiciones estándar (iluminación media)



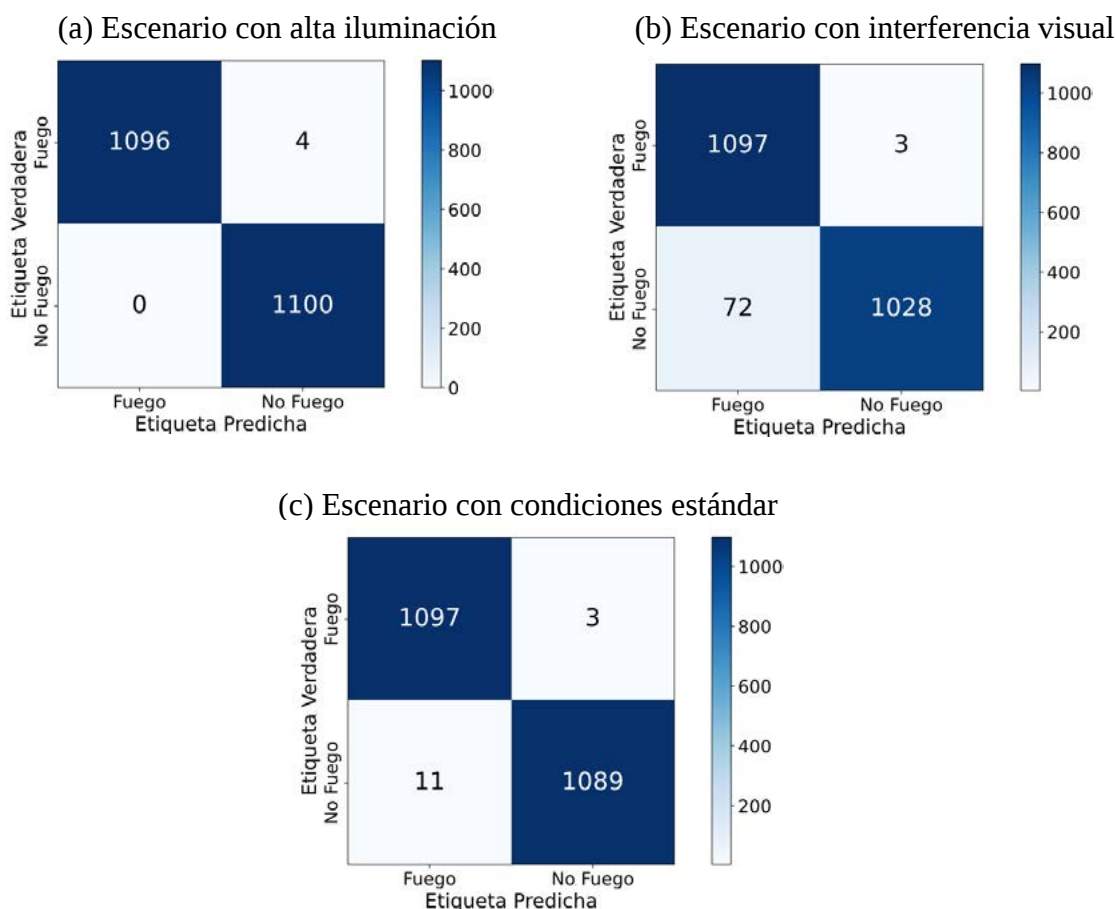
El sistema final híbrido demostró una notable robustez y un rendimiento superior al de sus componentes individuales en las tres condiciones evaluadas, tal como se resume en la Tabla 3. En el escenario de alta iluminación, crítico para contextos de sequía, el sistema alcanzó un desempeño casi perfecto, con una exactitud del 99.82 % y una especificidad del 100 %. La matriz de confusión (Figura 8a) confirma esta fiabilidad, al no registrar un solo falso positivo y únicamente 4 falsos negativos entre 2200 imágenes, validando su eficacia ante la alta radiación solar.

Para el desafío de interferencia visual, la arquitectura híbrida demostró su principal ventaja: la mitigación de falsos positivos. Mientras que el Método 12 basado en color falló (especificidad del 46.64 %), el sistema final lo compensó eficazmente, alcanzando una especificidad del 93.45 %. La Figura 8b evidencia esta corrección, mostrando cómo el sistema redujo drásticamente los errores para identificar correctamente 1028 imágenes sin fuego, lo que valida la complementariedad de los enfoques.

Finalmente, en condiciones estándar, el sistema mantuvo una operación estable y precisa con una exactitud del 99.36 %. En este caso, priorizó una alta sensibilidad del 99.73 % para garantizar la detección de casi todos los eventos reales (1097 de 1100, ver Figura 8c), a cambio de un número mínimo y aceptable de falsas alarmas (11). Esta compensación es estratégicamente deseable en aplicaciones de seguridad, donde es preferible una alerta de más a omitir un evento real.

Figura 8

Matrices de confusión de las pruebas del sistema final en cada variación del escenario 2



Es relevante contextualizar el sistema propuesto frente a los enfoques basados en satélites, que, si bien son fundamentales para el monitoreo de incendios a gran escala, presentan limitaciones para la detección temprana debido a la latencia en sus visitas y a la obstrucción por nubes o humo. En este contexto, el sistema terrestre desarrollado no busca reemplazar a los satélites, sino actuar como una solución complementaria de alta resolución para la detección inmediata de la ignición en zonas críticas. Mientras los sistemas satelitales son invaluable para el seguimiento a macroescala de la propagación de grandes incendios, este prototipo ofrece la ventaja táctica de generar una alerta en segundos tras la aparición de las primeras llamas, habilitando una respuesta rápida para extinguir el fuego antes de que se extienda y llenando así un vacío crítico que la tecnología satelital no puede cubrir.

Adicionalmente, es importante destacar que la validación del sistema se centró en condiciones controladas, diseñadas para simular los escenarios de alta luminosidad diurna más comunes durante la época de estiaje en la región de estudio. En consecuencia, los umbrales fijos empleados en los algoritmos basados en espacios de color fueron optimizados para estas condiciones específicas. Si bien este enfoque garantiza un alto rendimiento en el contexto evaluado, se reconoce que una generalización a otros entornos con diferente vegetación o clima requeriría un reajuste de dichos parámetros. Asimismo, el alcance del presente estudio no incluyó pruebas en condiciones de baja iluminación o nocturnas, lo que constituye una línea de trabajo futuro. Finalmente, para escenarios donde la visibilidad se vea reducida por humo denso, el sistema mitiga la dependencia visual mediante la integración del sensor de partículas PM2.5, que actúa como un mecanismo de confirmación no visual de la combustión.

Métricas de rendimiento del sistema

Para complementar el análisis de precisión, a continuación se evalúa la eficiencia operativa de cada algoritmo. Se monitorearon métricas clave como el consumo de CPU, uso de RAM, temperatura del procesador y consumo de corriente para identificar los métodos más adecuados para un sistema embebido de bajos recursos.

Evaluación de los algoritmos desarrollados

El gráfico correspondiente a la Figura 9 exhibe el porcentaje de uso de CPU registrado durante la ejecución de cada uno de los algoritmos evaluados. Se observa que el Método 10, correspondiente al clasificador Haar, alcanza un valor significativamente alto (84.5 %), lo que indica una alta demanda computacional y lo posiciona como una opción menos adecuada para sistemas embebidos. En contraste, el resto de los métodos muestra un uso de CPU considerablemente más bajo y estable, con valores que oscilan entre el 15.3 % y el 37.3 %, lo que los convierte en alternativas más eficientes y apropiadas para entornos con recursos limitados, al minimizar el riesgo de sobrecarga del procesador.

En cuanto al consumo de corriente, en la Figura 10 se observa que la mayoría de los métodos mantiene un consumo dentro del rango de 311 mA a 335 mA, lo cual resulta adecuado para sistemas con suministro energético limitado. No obstante, destacan tres métodos con consumos más elevados: el Método 8 (345.9 mA), el Método 9 (351.4 mA) y especialmente el Método 10, que alcanza los 419 mA. Este último representa una carga considerablemente mayor, lo que puede comprometer la autonomía energética en contextos remotos o alimentados por batería. Por tanto, algoritmos como los Métodos 6, 7 y 11 resultan más favorables para implementaciones eficientes desde el punto de vista energético.

Respecto al uso de memoria RAM, en la Figura 11 se evidencia que el Método 10 destaca por su elevado consumo, alcanzando un 45.7 %, lo cual puede representar una limitante en sistemas embebidos con recursos restringidos. Le siguen el Método 9 (39.9 %) y el Método 8 (37.0 %), ambos significativamente por encima del promedio general. En contraste, los métodos restantes mantienen un perfil de uso más moderado, entre 22 % y 32 %, lo que los convierte en opciones más eficientes para dispositivos con capacidad limitada de memoria volátil.

Finalmente, la Figura 12 presenta el comportamiento térmico del sistema, mostrando la temperatura de la CPU. Se observa un comportamiento térmico estable en la mayoría de los métodos, con valores promedio entre 31.4 °C y 35.8 °C. La única excepción notable es el Método 10, que alcanza una temperatura máxima de 40.6 °C, reflejo de su mayor exigencia computacional. Esta estabilidad térmica general resulta fundamental para garantizar la fiabilidad del sistema en aplicaciones de operación continua, y contribuye a preservar la integridad del hardware en entornos embebidos.

Con base en los resultados, se confirma que la selección de los Métodos 12 y 9 representa un balance deliberado entre precisión y eficiencia computacional. Se reconoce que el Método 9 (YOLOv8) presenta una de las demandas más altas de recursos, con un consumo de 351.4 mA y un 39.9 % de uso de RAM. Si bien este costo es manejable para la Raspberry Pi 4B del prototipo, sería un factor decisivo en dispositivos más limitados. No obstante, la arquitectura híbrida del sistema final está diseñada para mitigar esta carga, ya que no depende exclusivamente del modelo YOLOv8, sino que lo complementa con el Método 12, computacionalmente más ligero. Para un futuro despliegue en microcontroladores de menor capacidad, se podrían aplicar técnicas de optimización como la cuantización del modelo o el uso de versiones más ligeras para asegurar la viabilidad energética y de procesamiento.

Figura 9
Uso de CPU mediante la ejecución de cada algoritmo

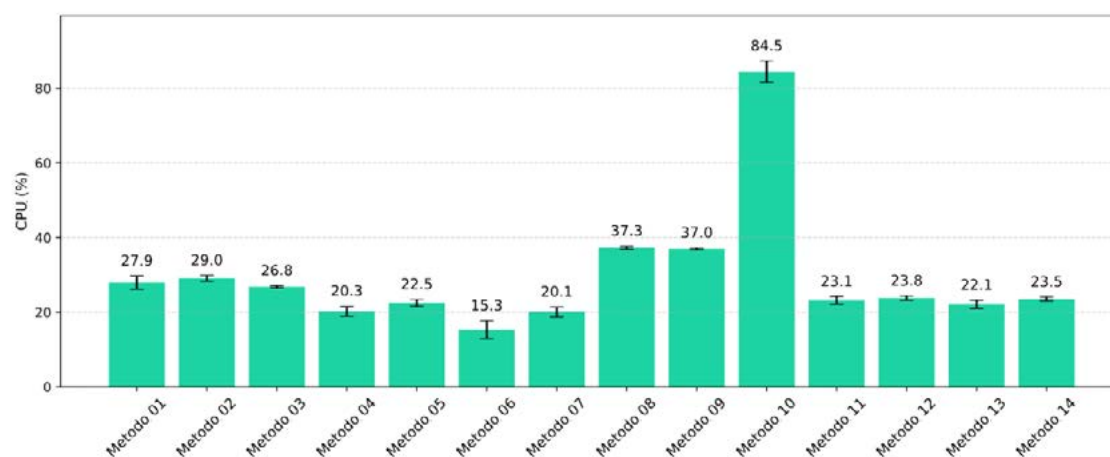


Figura 10
Corriente consumida por el sistema mediante la ejecución de cada algoritmo

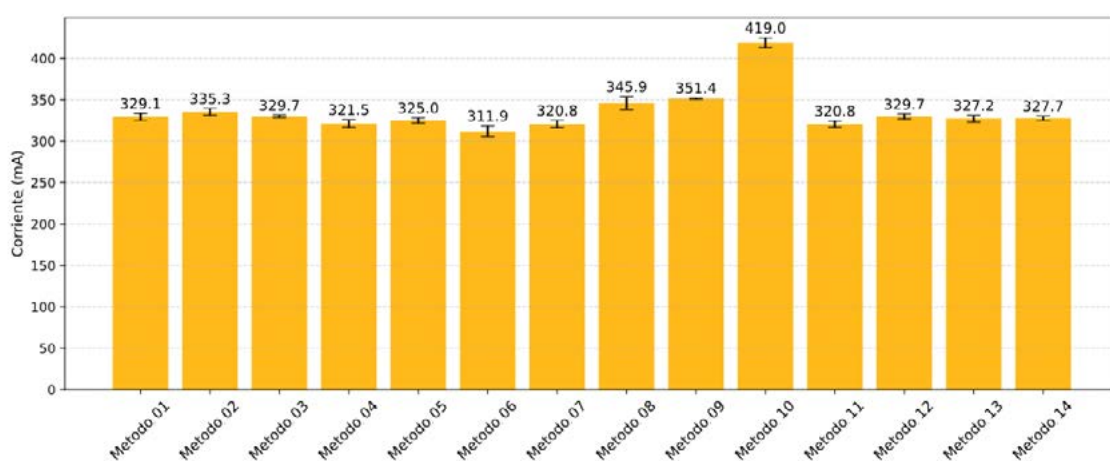


Figura 11
Uso de memoria RAM mediante la ejecución de cada algoritmo

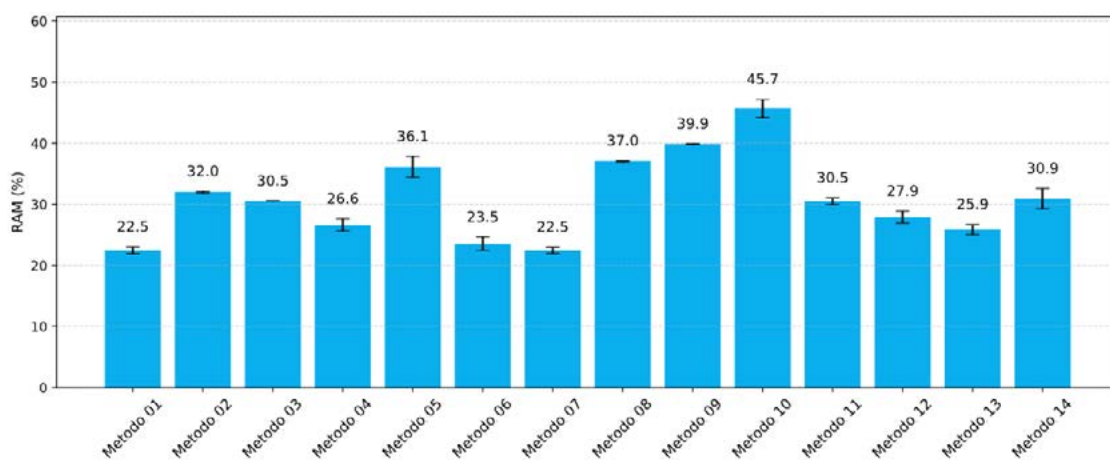
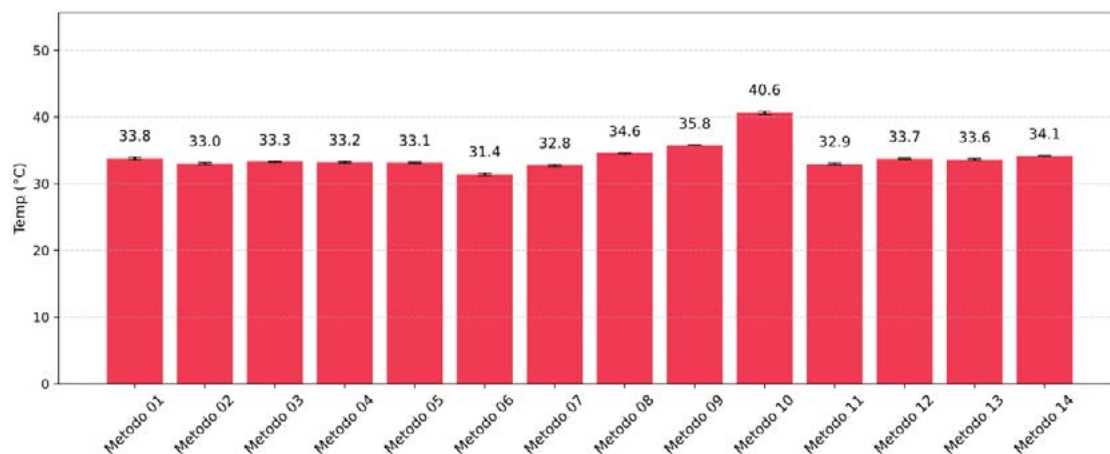


Figura 12
Temperatura de la CPU mediante la ejecución de cada algoritmo

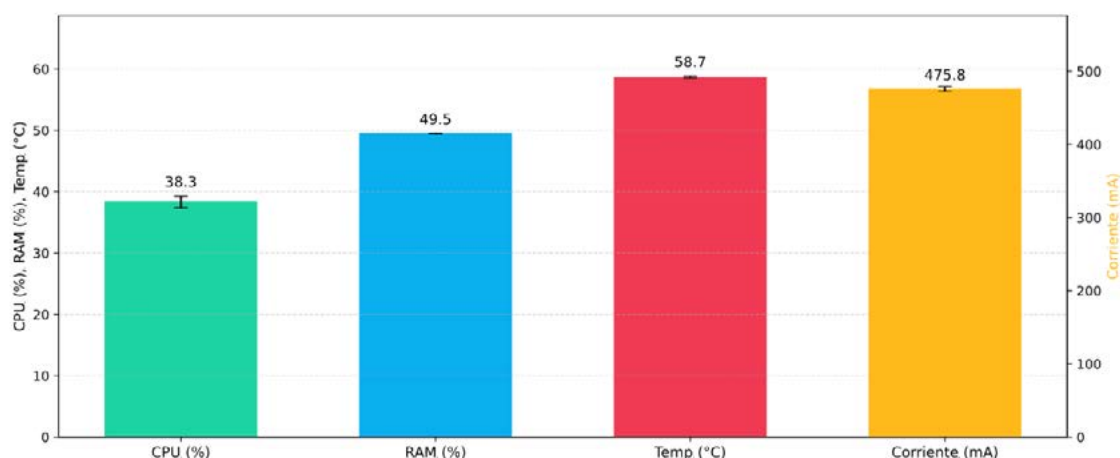


Evaluación del sistema final

Para este apartado se evaluó el rendimiento operativo del sistema final en condiciones reales, considerando todos los módulos activos descritos en la Figura 4. Adicionalmente, se incorporó un sistema de ventilación automática, el cual se activa cuando la temperatura de la CPU supera los 60 °C, con el objetivo de preservar condiciones térmicas seguras durante la operación continua del sistema.

Las figuras 13 y 14 resumen las métricas obtenidas bajo dos configuraciones: con ventilación desactivada (Figura 13) y con ventilación activada (Figura 14). En ambos casos se monitorearon las métricas de uso de CPU, uso de RAM, temperatura del sistema y consumo de corriente. En la configuración sin ventilación, el sistema final presentó un uso de CPU del 38.3 %, RAM del 49.5 %, temperatura promedio de 58.7 °C y corriente de 475.8 mA. Si bien estos valores se mantienen dentro de márgenes aceptables, la temperatura se acerca al umbral de seguridad térmica.

Figura 13
Métricas de rendimiento del sistema integral con el sistema de ventilación desactivado

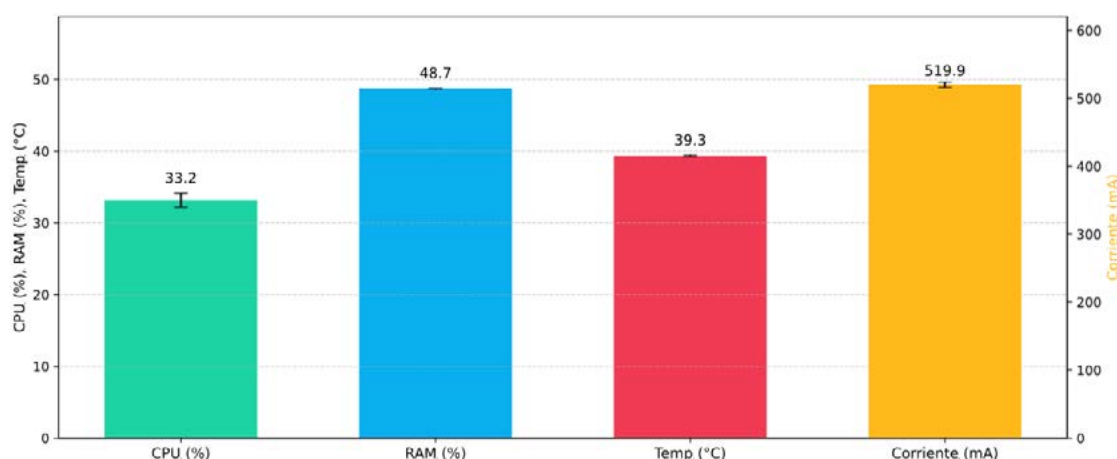


Una vez activada la ventilación, la temperatura del sistema se redujo drásticamente hasta 39.3 °C, asegurando una operación estable y prolongada. El resto de los parámetros se mantuvieron similares: el uso de CPU fue de 33.2 %, la RAM se estabilizó en 48.7 % y el

consumo de corriente aumentó levemente a 519.9 mA debido al funcionamiento del ventilador. Esta compensación resulta razonable considerando la mejora térmica obtenida.

Figura 14

Métricas de rendimiento del sistema integral con el sistema de ventilación activado



Al comparar estos valores con los obtenidos en el escenario 1, se observa que la integración del sistema final, pese a añadir nuevos módulos como el sensor de partículas, el GPS y la conectividad 4G, mantiene un perfil de consumo equilibrado. De hecho, el uso de recursos sigue siendo menor o comparable al de métodos individuales, lo cual confirma la viabilidad de implementar esta solución en entornos reales. En conjunto, el sistema final no solo destaca por su precisión, sino también por su eficiencia operativa y robustez en condiciones prolongadas.

Funcionamiento del sistema final

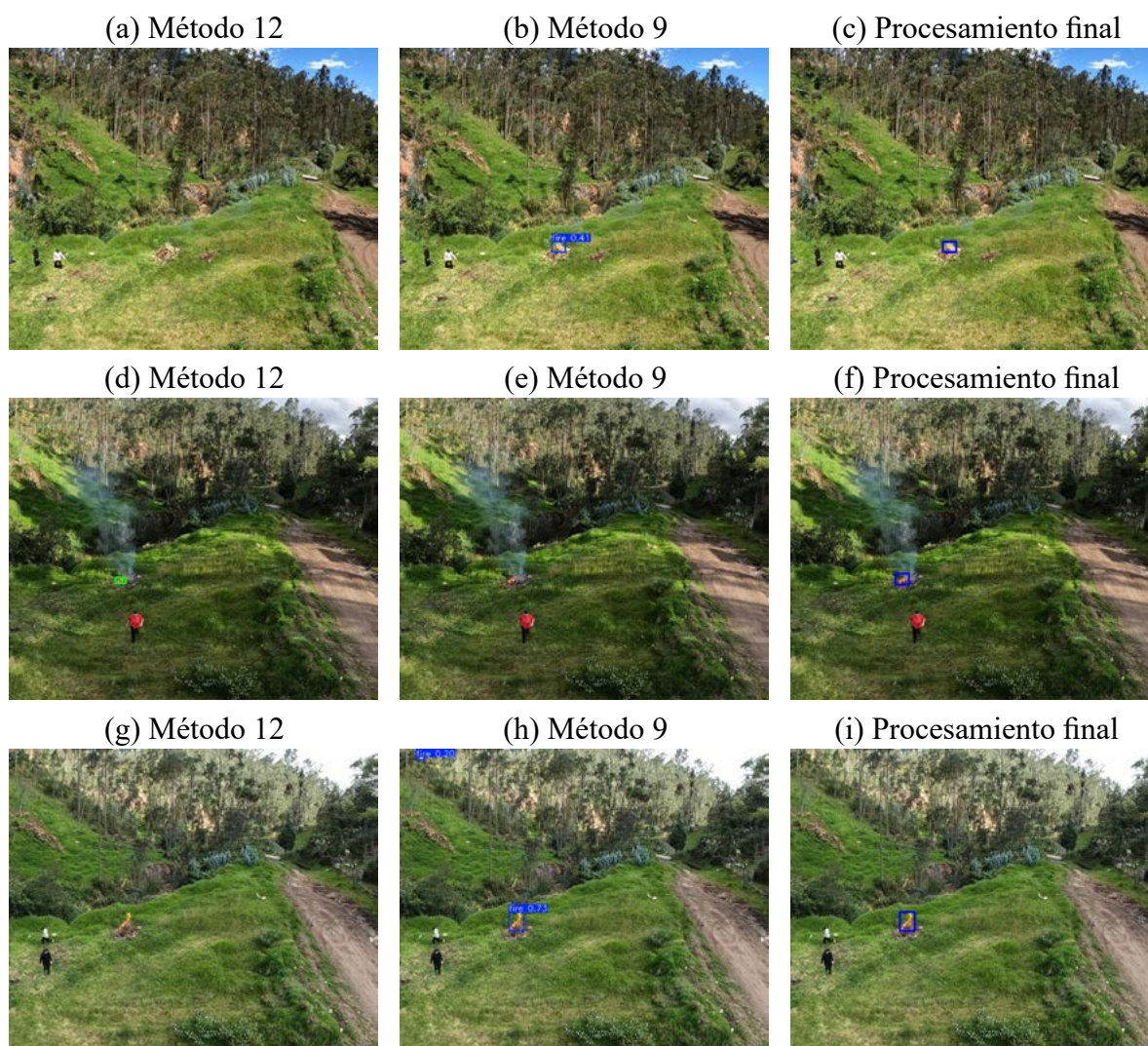
El sistema final implementado integra múltiples componentes que trabajan de manera conjunta para detectar incendios forestales y generar alertas en tiempo real. El proceso se inicia con la adquisición continua de imágenes mediante una cámara instalada en el encapsulado del sistema. Las imágenes, capturadas cada 3 segundos, tienen una resolución de 960×720 píxeles. Esta configuración fue seleccionada de forma empírica, ya que proporciona un equilibrio adecuado entre fluidez de procesamiento y calidad de imagen. La alta definición es especialmente importante debido a la ubicación elevada de la cámara, lo cual exige un nivel de detalle suficiente para permitir la detección temprana de focos de incendio, incluso cuando las llamas aún son pequeñas. En la Figura 7 se muestra una imagen capturada de cada variación del escenario.

Una vez adquiridas las imágenes, estas son procesadas por los algoritmos de detección. En esta etapa, se evalúan tres enfoques distintos: el procesamiento mediante el Método 12 basado en espacios de color, el Método 9 fundamentado en IA con YOLOv8 y, finalmente, el procesamiento combinado implementado en el sistema final.

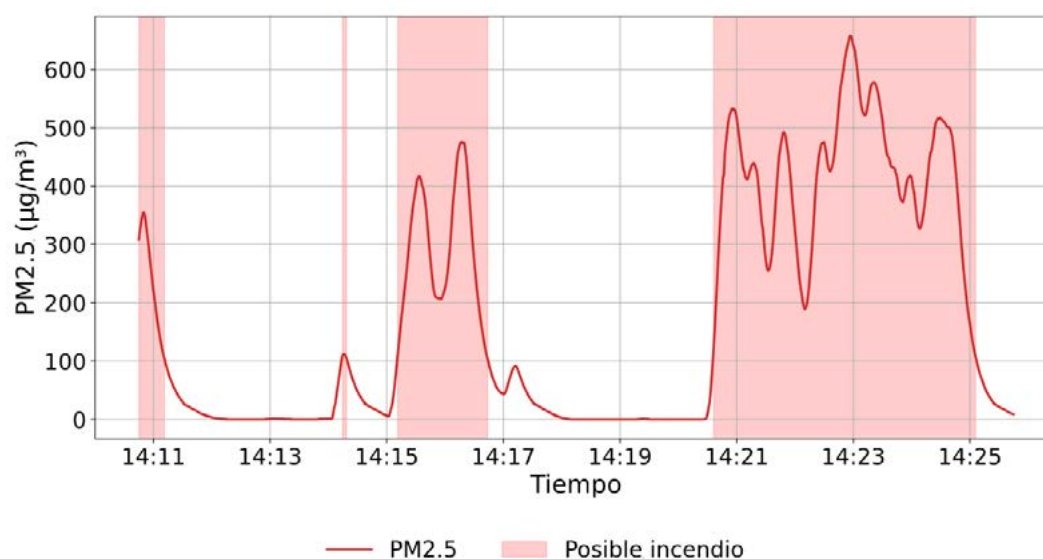
La Figura 15 muestra ejemplos representativos del comportamiento de cada uno de estos métodos frente a las tres variaciones del escenario evaluado. Se puede observar que, si bien los métodos individuales presentan ciertos errores, como omisiones en la detección por parte del algoritmo de espacios de color o detecciones erróneas en el modelo de IA, la combinación de ambos en el sistema final permite una corrección de estas inconsistencias. Esto se debe a la lógica de fusión implementada, la cual refuerza las detecciones únicamente cuando ambos métodos coinciden o cuando se detecta una región de fuego dominante por uno de los algoritmos y es respaldada parcialmente por el otro. Una vez detectado visualmente un posible foco de incendio, el sistema procede a validar dicha alerta mediante la medición de partículas en el aire.

Figura 15

Imágenes obtenidas mediante el procesamiento del método 9, método 12 y solución integral en cada variación del escenario 2

**Figura 16**

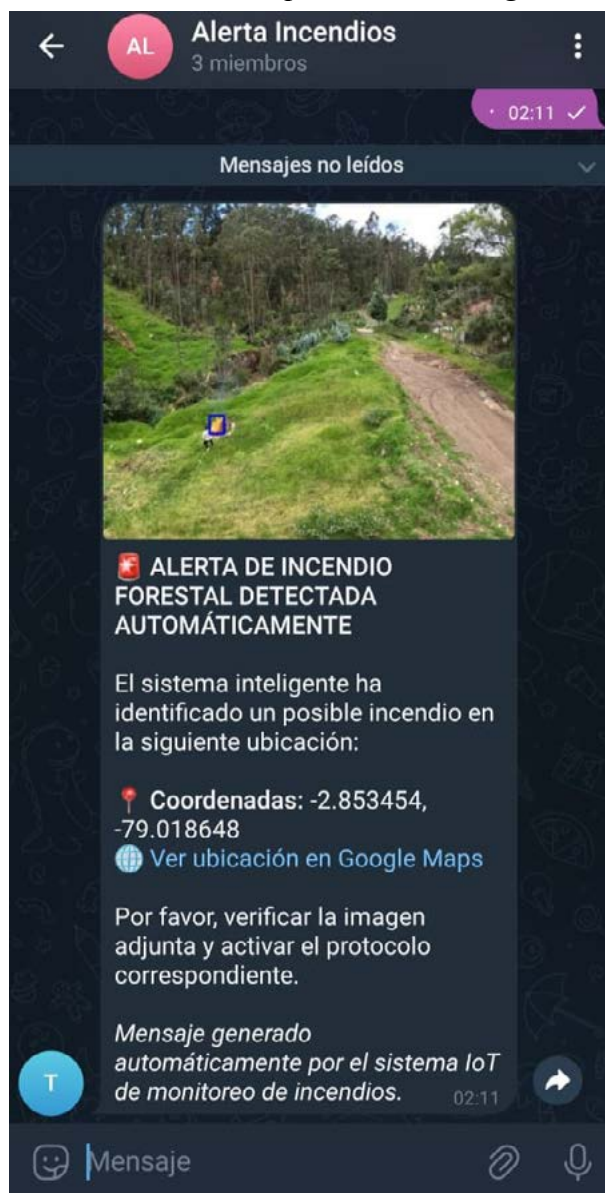
Registro del censado de partículas finas en el aire en el momento del incendio



La Figura 16 presenta la evolución de la concentración de partículas PM_{2.5} posterior a la detección por procesamiento de imágenes. Si bien los incrementos registrados no alcanzan niveles extremos, sí se observan picos que superan el umbral establecido de 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, confirmando la presencia de humo en el entorno.

Figura 17

Alerta generada automáticamente por el sistema final una vez detectado y confirmado el siniestro hacia la aplicación de Telegram



Esta variabilidad en las mediciones se explica tanto por la distancia entre el foco de fuego y el encapsulado como por la acción del viento, que en ciertos momentos alejaba la concentración de humo del sensor. No obstante, cuando la dirección del viento coincidió con la ubicación del encapsulado, se registraron concentraciones significativamente elevadas. Estas coincidencias temporales entre las detecciones visuales y los picos de material particulado refuerzan la fiabilidad del sistema final para validar siniestros en tiempo real.

Finalmente, una vez verificada la presencia de un incendio, el sistema procede a emitir una alerta en tiempo real a través de la aplicación de mensajería Telegram. La Figura 17 muestra

un ejemplo de este mensaje automático, el cual incluye una imagen del evento detectado, las coordenadas geográficas exactas del siniestro y un enlace directo para visualizar la ubicación en Google Maps. Esta funcionalidad, soportada por el módulo GPS, permite una respuesta rápida y precisa por parte de los equipos encargados de la atención de emergencias, facilitando la verificación visual y la activación del protocolo correspondiente.

Conclusiones

Este trabajo presentó el desarrollo y la validación de un sistema inteligente de detección y alerta temprana de incendios forestales, basado en tecnologías IoT e IA. En la etapa de desarrollo se diseñaron y evaluaron 14 algoritmos distintos, abarcando enfoques basados en espacios de color y modelos de inteligencia artificial. A partir de esta evaluación comparativa, se consolidó una arquitectura híbrida que integra los métodos de mayor desempeño: un detector de objetos YOLOv8 (Método 9) y un algoritmo cromático multiespacio (Método 12), empleando una lógica de verificación cruzada. La validación del sistema final en escenarios realistas demostró su alta robustez, logrando una precisión del 99.82 % y una especificidad del 100 % en condiciones críticas de alta iluminación, superando significativamente el rendimiento de los métodos individuales.

Más allá de la precisión visual, la fiabilidad del sistema se ve reforzada por un mecanismo de doble verificación que utiliza un sensor de partículas PM2.5 para confirmar la presencia de humo, reduciendo eficazmente los falsos positivos. Su utilidad práctica se maximiza con la integración de módulos GPS y 4G, que permiten emitir alertas georreferenciadas en tiempo real a través de Telegram. Operativamente, el prototipo demostró ser viable para despliegues en campo, manteniendo un consumo energético moderado (519.9 mA) y una temperatura estable (39.3 °C) durante sesiones prolongadas. Estas métricas confirman la viabilidad de una solución precisa, eficiente y adaptable a otras aplicaciones de monitoreo ambiental.

Es fundamental reconocer que la efectividad de la funcionalidad de alerta en tiempo real depende de la disponibilidad de cobertura 4G, una limitación en áreas rurales remotas donde la infraestructura de telecomunicaciones es a menudo inexistente. Para superar esta barrera y abordar la escalabilidad para un despliegue masivo, el sistema actual ha sido concebido como un nodo concentrador dentro de una futura arquitectura de red de sensores distribuida.

Como trabajo a futuro, se planea expandir la solución mediante la implementación de múltiples nodos sensores de bajo consumo que se comuniquen a través de la tecnología LoRaWAN, integrando en cada uno el sensor INA219 para un monitoreo constante de su rendimiento energético, tal como se validó en la sección de resultados de este estudio. En este esquema, los nodos periféricos realizarían la captura de datos y enviarían alertas preliminares al nodo concentrador (el prototipo actual), el cual se encargaría del procesamiento avanzado, la confirmación del evento y la conexión con un punto lejano con cobertura para así emitir la alerta a las entidades pertinentes. Para asegurar la durabilidad y el bajo mantenimiento en dicho despliegue, se propone el uso de encapsulados con certificación IP67, protegiendo el hardware de condiciones ambientales adversas y reduciendo la frecuencia de las revisiones técnicas, un factor clave en áreas de difícil acceso.

Reconocimientos y Declaraciones

Los autores agradecen al Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca (DEET), por el apoyo brindado durante el desarrollo del presente trabajo de investigación.

Los autores declaran que, en la elaboración del presente artículo, se han utilizado herramientas de inteligencia artificial, como Gemini 2.5 Flash, de forma complementaria. Su uso ha sido sutil, principalmente para la reducción de texto en la sección de trabajos relacionados, con el fin de cumplir la normativa de extensión del artículo, y para estructurar de manera más clara las ideas en la sección de introducción.

Los autores declaran la contribución y participación equitativa de roles de autoría para esta publicación.

Referencias

- Alotaibi, E., & Nassif, N. (2024). Artificial intelligence in environmental monitoring: in-depth analysis. *Discover Artificial Intelligence*, 4(1), 1–26. <https://doi.org/10.1007/s44163-024-00198-1>
- Altowaijri, A. H., Alfaifi, M. S., Alshawhi, T. A., Ibrahim, A. B., & Alshebeili, S. A. (2021). A Privacy-Preserving Iot-Based Fire Detector. *IEEE Access*, 9, 51393–51402. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069588>
- Anh, N. D., Van Thanh, P., Lap, D. T., Khai, N. T., Van An, T., Tan, T. D., An, N. H., & Dinh, D. N. (2022). Efficient Forest Fire Detection using Rule-Based Multi-color Space and Correlation Coefficient for Application in Unmanned Aerial Vehicles. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 16(2), 381–404. <https://doi.org/10.3837/TIIS.2022.02.002>
- Avazov, K., Hyun, A. E., Sami S, A. A., Khaitov, A., Abdusalomov, A. B., & Cho, Y. I. (2023). Forest Fire Detection and Notification Method Based on AI and IoT Approaches. *Future Internet*, 15(2). <https://doi.org/10.3390/FI15020061>
- Bhargav, R., & Singh, P. (2025). Efficient UAV-Based Forest Fire Detection Using CNN and YOLOv8 Integration. *2025 6th International Conference on Recent Advances in Information Technology (RAIT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/RAIT65068.2025.11089330>
- Buza, E., & Akagic, A. (2022). Unsupervised Method for Wildfire Flame Segmentation and Detection. *IEEE Access*, 10, 55213–55225. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3176724>
- Celik, T., Ozkaramanli, H., & Demirel, H. (2007). Fire Pixel Classification using Fuzzy Logic and Statistical Color Model. *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - ICASSP '07*, 1, I-1205–I-1208. <https://doi.org/10.1109/ICASSP.2007.366130>
- Dilshad, N., Khan, S. U., Alghamdi, N. S., Taleb, T., & Song, J. S. (2024). Toward Efficient Fire Detection in IoT Environment: A Modified Attention Network and Large-Scale Data Set. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(8), 13467–13481. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3336931>
- Hamida, A. B., Amar, C. B., & Albagory, Y. (2022). A New Color Model for Fire Pixels Detection in PJF Color Space. *Intelligent Automation and Soft Computing*, 33, 1607–1621. <https://doi.org/10.32604/iasc.2022.024939>
- Kaggle. (s/f). *Find Open Datasets and Machine Learning Projects*. Recuperado el 20 de noviembre de 2024, de <https://www.kaggle.com/datasets>
- Koschan, A., & Abidi, M. A. (2008). *Digital color image processing*. Wiley-Interscience. <https://doi.org/10.1002/9780470230367>
- Lee, C. H., Lee, W. H., & Kim, S. M. (2023). Development of IoT-Based Real-Time Fire Detection System Using Raspberry Pi and Fisheye Camera. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 8568, 13(15), 8568. <https://doi.org/10.3390/APP13158568>
- Miller, T., Durlík, I., Kostecka, E., Kozłowska, P., Łobodzińska, A., Sokołowska, S., & Nowy, A. (2025). Integrating Artificial Intelligence Agents with the Internet of Things for Enhanced Environmental Monitoring: Applications in Water Quality and Climate Data. *Electronics* 2025, Vol. 14, Page 696, 14(4), 696. <https://doi.org/10.3390/ELECTRONICS14040696>

- Moreno Rubio, I. (2021). *Detección de incendios en áreas forestales usando algoritmos de deep learning* [Tesis de Grado, Universidad de Jaén]. <http://crea.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/20283>
- Organización Meteorológica Mundial. (2024, noviembre 11). *El año 2024 va camino de ser el más cálido jamás registrado en un momento en que el calentamiento supera transitoriamente el umbral de 1,5 °C*. Organización Meteorológica Mundial. <https://wmo.int/es/news/media-centre/el-ano-2024-va-camino-de-ser-el-mas-calido-jamas-registrado-en-un-momento-en-que-el-calentamiento>
- Pranamurti, H., Murti, A., & Setianingsih, C. (2019). Fire Detection Use CCTV with Image Processing Based Raspberry Pi. *Journal of Physics: Conference Series*, 1201(1), 012015. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1201/1/012015>
- Rashkovetsky, D., Mauracher, F., Langer, M., & Schmitt, M. (2021). Wildfire Detection from Multisensor Satellite Imagery Using Deep Semantic Segmentation. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 7001–7016. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3093625>
- Roboflow. (2020). *Roboflow: Computer vision tools for developers and enterprises*. <https://roboflow.com/>
- Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2024). *Incendios Forestales 2024*. Gobierno de Ecuador – Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/incendios-forestales-2024/>
- Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. (2025, febrero 24). *Niveles de alertas y declaratorias vigentes establecidas por la SNGR*. Gobierno de Ecuador – Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/niveles-de-alertas-y-declaratorias-vigentes-establecidas-por-la-sgr/>
- Shrestha, B. (2020). *Fire Detection Using Image Processing*. <http://www.theseus.fi/handle/10024/312830>
- Talaat, F. M., & ZainEldin, H. (2023). An improved fire detection approach based on YOLO-v8 for smart cities. *Neural Computing and Applications*, 35(28), 20939–20954. <https://doi.org/10.1007/s00521-023-08809-1>
- Texas Instruments. (2008). *INA219*. www.ti.com
- Vasconcelos, R. N., Franca Rocha, W. J. S., Costa, D. P., Duverger, S. G., Santana, M. M. M. de, Cambui, E. C. B., Ferreira-Ferreira, J., Oliveira, M., Barbosa, L. da S., & Cordeiro, C. L. (2024). Fire Detection with Deep Learning: A Comprehensive Review. *Land*, 13(10), 1696. <https://doi.org/10.3390/land13101696>
- Waveshare. (2021). *SIM7600X 4G & LTE Cat-1 HAT*. https://www.waveshare.com/wiki/SIM7600X_4G_%26_LTE_Cat-1_HAT
- Wu, Y., Wang, Z., Liu, S., Zhou, Y., Liu, G., & Xie, G. (2024). Flame detection method and application based on RGB-HSI model and initial flame growth characteristics. *Journal of Physics: Conference Series*, 2752(1), 012231. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2752/1/012231>
- Xing, X., Murdoch, S., Tang, C., Papanastasiou, G., Cross-Zamirski, J., Guo, Y., Xiao, X., Schönlieb, C. B., Wang, Y., & Yang, G. (2024). Can generative AI replace immunofluorescent staining processes? A comparison study of synthetically generated cellpainting images from brightfield. *Computers in Biology and Medicine*, 182, 109102. <https://doi.org/10.1016/J.COMPBIOMED.2024.109102>
- Yang, S., Huang, Q., & Yu, M. (2024). Advancements in remote sensing for active fire detection: A review of datasets and methods. *Science of The Total Environment*, 943, 173273. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2024.173273>
- Zhou, Yong, & Zheng, H. (2016). *Digital universal particle concentration sensor PMS5003 series data manual*. https://www.aqmd.gov/docs/default-source/aq-spec/resources-page/plantower-pms5003-manual_v2-3.pdf

Modelado Semántico de Emergencias del ECU 911 con NLP y Ontologías

Semantic Modeling of ECU 911 Emergencies Using NLP and Ontologies

Danny Leonardo Paltin Chica¹ <https://orcid.org/0009-0007-2668-6134>, Juan Diego Mejía Mendieta¹ <https://orcid.org/0009-0008-7388-3576>, Marcos Orellana¹ <https://orcid.org/0000-0002-3671-9362>, Jorge Luis Zambrano-Martínez¹ <https://orcid.org/0000-0002-5339-7860>

¹Universidad del Azuay, Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Informática (LIDI), Cuenca, Ecuador

danny.paltin@es.uazuay.edu.ec, juanmejiamen@es.uazuay.edu.ec,
marore@uazuay.edu.ec, jorge.zambrano@uazuay.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2025/06/27

Aceptado: 2025/08/20

Publicado: 2025/10/15

Resumen

Este estudio propone un marco híbrido novedoso para la representación del conocimiento en emergencias, integrando procesamiento del lenguaje natural (PLN), ontologías OWL y reglas SWRL para procesar datos no estructurados del Servicio de Seguridad Integrado de Ecuador (ECU 911). La principal aportación radica en la combinación única de modelos avanzados de PLN como BERT para reconocimiento de entidades nombradas y XLM-RoBERTa para clasificación semántica sin entrenamiento previo, con un modelo ontológico formalmente validado desarrollado en Protégé y una implementación lógica paralela en Prolog utilizando el paradigma objeto-atributo-valor. A diferencia de trabajos anteriores, este enfoque aborda específicamente el reto de transformar las transcripciones crudas de llamadas de emergencia en conocimiento accionable mediante: (1) la automatización de la extracción de entidades (localizaciones, personas) y la categorización semántica de incidentes, (2) la generación de reglas de decisión interpretables a través de árboles de decisión y (3) la habilitación de la interoperabilidad entre paradigmas mediante motores de inferencia sincronizados en OWL/SWRL y Prolog. La validación experimental con consultas SPARQL/SQWRL y el razonador Pellet demostró una precisión del 96.7 % en la inferencia de prioridades de emergencia, como emergencias médicas, superando a métodos independientes basados en PLN o en ontologías.

Sumario: Introducción, Trabajos Relacionados, Materiales y Métodos, Resultados y Discusión, Conclusiones.

Cómo citar: Paltin, D., Mejía, J., Orellana, M. & Zambrano-Martínez, J. (2025). Modelado Semántico de Emergencias del ECU 911 con NLP y Ontologías. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 112-125.
<https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1351>

Este trabajo avanza en la inteligencia artificial semántica para la respuesta ante emergencias, al unir el análisis de textos no estructurados con el razonamiento formal, ofreciendo una solución escalable para el apoyo a la toma de decisiones en escenarios críticos.

Palabras clave: procesamiento del lenguaje natural, ontologías OWL, gestión de emergencias, reglas SWRL, inferencia semántica.

Abstract

This study proposes a novel hybrid framework for knowledge representation in emergencies, integrating Natural Language Processing (NLP), OWL ontologies, and SWRL rules to process unstructured data from Ecuador's Integrated Security Service (ECU 911). The key contribution lies in the unique combination of advanced NLP models such as BERT for Named Entity Recognition and XLM-RoBERTa for zero-shot semantic classification, with a formally validated ontological model developed in Protégé and a parallel logical implementation in Prolog using the Object-Attribute-Value paradigm. Unlike prior works, this approach specifically addresses the challenge of transforming raw emergency call transcripts into actionable knowledge by (1) automating entity extraction (locations, persons) and semantic categorization of incidents, (2) generating interpretable decision rules via decision trees, and (3) enabling cross-paradigm interoperability through synchronized OWL/SWRL and Prolog inference engines. Experimental validation with SPARQL/SQWRL queries and the Pellet reasoner demonstrated 96.7% accuracy in inferring emergency priorities such as medical emergencies, outperforming standalone NLP or ontology-based methods. This work advances semantic AI for emergency response by bridging unstructured text analysis with formal reasoning, offering a scalable solution for real-time decision support in critical scenarios.

Keywords: Natural Language Processing, OWL ontologies, emergency management, SWRL rules, semantic reasoning.

Introducción

En la era digital contemporánea, la tecnología ha transformado la gestión de emergencias; sin embargo, persiste una brecha crítica en la integración de los datos no estructurados, como las transcripciones de llamadas de emergencia, con sistemas de decisión en tiempo real. Centros de atención de emergencias, como el Servicio Integrado de Seguridad (ECU 911), enfrentan el desafío crítico de procesar volúmenes masivos de datos no estructurados, provenientes principalmente de llamadas y mensajes de los ciudadanos, así como información textual heterogénea de manera automática, interpretable y semánticamente interoperable. Esta desconexión limita su aplicabilidad en escenarios operativos donde la velocidad y precisión son críticas. Por lo tanto, la explotación efectiva de esta información, mediante su extracción, estructuración y análisis, podría optimizar significativamente la toma de decisiones y la eficiencia operativa en contextos de emergencia (Imran et al., 2015).

En este escenario, el procesamiento del lenguaje natural o Natural Language Processing (NLP) emerge como una herramienta indispensable para el tratamiento automatizado de textos. Técnicas como el reconocimiento de entidades nombradas o Named Entity Recognition (NER) y la clasificación textual permiten identificar componentes semánticos clave como ubicaciones geográficas, tipos de incidentes y actores involucrados, en flujos de datos heterogéneos (Rudra et al., 2015; Young et al., 2018). No obstante, la mera extracción de información resulta insuficiente sin un marco formal que facilite su integración, interpretación y reutilización. Es aquí donde

la gestión del conocimiento adquiere relevancia, al proveer metodologías para organizar el conocimiento mediante estructuras computables, como las ontologías (Schreiber, 2008). Estas no solo modelan conceptos y sus relaciones jerárquicas, sino que también permiten inferir nuevo conocimiento a través de razonadores lógicos (Staab y Studer, 2013).

El presente artículo propone un enfoque híbrido que combina técnicas avanzadas de NLP con representación ontológica para modelar escenarios de emergencia reportados al ECU 911. A partir de un conjunto de datos o dataset, compuesto por identificadores de llamadas y transcripciones de alertas, se aplicaron modelos de NLP preentrenados para generar un corpus estructurado, enriquecido mediante árboles de decisión que identifican patrones y reglas de clasificación. Posteriormente, estas reglas se formalizaron en una ontología desarrollada en Protégé, implementando además un módulo de razonamiento automático en Prolog bajo el paradigma objeto-atributo-valor (OAV).

La contribución fundamental de este trabajo radica en demostrar cómo la sinergia entre NLP y ontologías puede transformar datos textuales no estructurados en bases de conocimiento dinámicas, capaces de soportar inferencias automáticas y mejorar la eficacia en la gestión de emergencias. Este avance no solo tiene implicaciones prácticas inmediatas para sistemas como el ECU 911, sino que también sienta bases metodológicas para futuras aplicaciones en inteligencia artificial (IA) semántica.

Este artículo se organiza de la siguiente manera: en la sección 2 se revisan los antecedentes y contribuciones previas en el ámbito de la representación del conocimiento para emergencias. En la sección 3 se detalla la metodología propuesta, describiendo las fases de procesamiento de datos, modelado ontológico e implementación de reglas de inferencia. Posteriormente, en la sección 4 se analizan los resultados obtenidos, validando la eficacia mediante pruebas experimentales y consultas semánticas. Finalmente, en la sección 5 se sintetizan las conclusiones derivadas del estudio y se proponen líneas futuras de investigación para extender las capacidades del modelo.

Trabajos Relacionados

La revisión sistemática de la literatura constituye un pilar fundamental para contextualizar investigaciones en el ámbito de la IA aplicada a emergencias. En los últimos años, la convergencia entre NLP y representación del conocimiento ha emergido como un paradigma transformador para la gestión de crisis, particularmente en el análisis de datos no estructurados provenientes de ciudadanos.

El trabajo de Imran et al. (2015) estableció un marco de referencia para el análisis de redes sociales en desastres, demostrando cómo técnicas de NLP como clasificación de mensajes y NER permiten identificar eventos, ubicaciones geográficas y tipos de incidentes en tiempo real. Avances recientes en modelos del lenguaje han elevado la precisión de estas tareas. Thodupunuri et al. (2025) implementaron una arquitectura basada en representaciones de codificador bidireccional de transformers o Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) optimizada con *AdamW*, logrando un 83.32 % de exactitud en la clasificación de tuits sobre desastres. Su enfoque integraba NER para extraer entidades críticas y las visualizaba en mapas interactivos mediante *Streamlit*, complementado con un chatbot para asistencia inmediata.

En cuanto a NER, Keraghel et al. (2024) realizaron una evaluación comparativa de modelos transformer y modelos grandes del lenguaje o Large Language Models (LLMs),

utilizando el corpus *CoNLL-2003* como punto de referencia o *benchmark*. Sus hallazgos coinciden con Hu et al. (2024), quienes enfatizan que, pese al surgimiento de técnicas de aprendizaje profundo o *deep learning*, conjuntos de datos anotados manualmente siguen siendo esenciales para validar la generalización de los modelos en dominios específicos como emergencias.

La representación formal del conocimiento ha sido explorada mediante ontologías de dominio. Le et al. (2024) propusieron un sistema basado en el lenguaje de ontologías web o Web Ontology Language (OWL) que integra datos históricos de desastres de la base de datos de eventos de emergencia o Emergency Events Database (EM-DAT) con minería de similitud semántica, permitiendo identificar patrones entre crisis pasadas y emergencias activas. Su ontología no solo organiza jerárquicamente conceptos, sino que también facilita la recuperación de casos análogos mediante métricas de similitud.

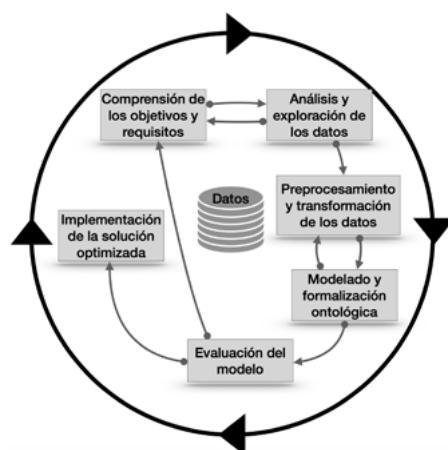
La capa inferencial ha sido abordada por Shukla et al. (2023) mediante ontología de gestión de desastres o Disaster Management Ontology (DMO), que combina una base estática en OWL con un módulo dinámico del lenguaje de reglas para la web semántica o Semantic Web Rule Language (SWRL). Este diseño bifásico permite, por un lado, codificar conocimiento taxonómico y, por otro, ejecutar inferencias para asignar responsabilidades o priorizar acciones durante una crisis.

Si bien los estudios revisados demuestran avances significativos, persisten desafíos en la integración de flujos de datos heterogéneos y la validación de ontologías en escenarios operativos reales. Por lo tanto, a través de este trabajo se analizan aquellas limitaciones mediante una metodología que combina modelos NER y de clasificación con una ontología en Protégé, enriquecida con reglas lógicas en Prolog. A diferencia de propuestas anteriores, este enfoque se centra en transcripciones de los audios de emergencia del ECU 911, lo que permite validar la capacidad inferencial del sistema mediante casos de uso concretos.

Materiales y Métodos

El diseño de este trabajo se basó en una metodología sistemática estructurada en seis fases iterativas, como se puede observar en la Figura 1, que comprende: i) comprensión de los objetivos y requisitos, ii) análisis y exploración de los datos, iii) preprocesamiento y transformación de los datos, iv) modelado y formalización ontológica, v) evaluación de resultados y vi) implementación de la solución optimizada. A continuación, se describen las etapas ejecutadas en este trabajo.

Figura 1
Cronograma de ensayo de prueba de campo



Comprensión de los objetivos y requisitos

El presente estudio tuvo como objetivo principal desarrollar un marco metodológico para estructurar y representar conocimiento a partir de datos textuales no estructurados provenientes de llamadas de emergencia recibidas por el ECU 911. Esta iniciativa buscó mejorar la comprensión del dominio de las llamadas de emergencias a través de la implementación de técnicas de NLP y representación del conocimiento, con el fin de facilitar inferencias automáticas que respalden la toma de decisiones.

Para alcanzar este propósito, se estableció un enfoque multidisciplinario que integró las siguientes etapas: i) identificación automática de entidades nombradas a partir del texto transcrito de los audios por parte de los alertantes; ii) clasificación semántica de las emergencias mediante modelos de aprendizaje automático; iii) generación de reglas de decisión basadas en árboles de clasificación implementados en RapidMiner; y iv) representación formal del conocimiento mediante una ontología OWL desarrollada en Protégé, utilizando un marco de descripción de recursos o Resource Description Framework (RDF) como modelo de datos.

Adicionalmente, el proyecto incorporó el uso de reglas SWRL para inferir de forma automática la gravedad primordial de cada emergencia, así como una representación alternativa del conocimiento en formato Objeto-Atributo-Valor (OAV) implementada en Prolog, lo que permite comparar los resultados de diferentes enfoques de representación. Finalmente, se diseñó un protocolo de validación basado en razonadores semánticos y consultas estructuradas para evaluar la consistencia y precisión de las inferencias automáticas generadas por el sistema. Este enfoque integral permitió transformar datos textuales no estructurados en conocimiento formalizado.

Análisis y exploración de los datos

El conjunto de datos utilizado para este estudio proviene de la transcripción de las llamadas de emergencia que tienen en el ECU 911 de la coordinación zonal seis y son datos sensibles, lo que implica consideraciones éticas críticas respecto a la privacidad, confidencialidad y anonimización de la información personal. De este modo, mil llamadas transcritas se utilizaron como un conjunto inicial compuesto por tres atributos fundamentales (Orellana et al., 2025): i) TRA_ID, que corresponde a un identificador único para cada llamada; ii) el texto del alertante, que contiene la descripción narrativa del incidente registrada por el operador del ECU 911; y iii) la clave del incidente, que representa la clasificación asignada a cada emergencia, y está dividida en dos categorías, siendo los incidentes con alertas de alta prioridad o rojas y los incidentes con alertas bajas que incluyen a llamadas de emergencia con prioridad amarilla, naranja y verde (Orellana, Molina Pinos et al., 2025). Cabe destacar que, si bien el dataset incluía esta última variable, su utilidad se limitó a servir como etiqueta supervisada durante el entrenamiento del modelo de árbol de decisión, en lugar de emplearse directamente como fuente de conocimiento.

Un análisis preliminar del texto de los alertantes permitió identificar la presencia de información semánticamente relevante para la estructura del conocimiento, menciones a entidades clave como personas, ubicaciones geográficas y categorías específicas de emergencias. Siendo así, se justificó la implementación de técnicas avanzadas de NLP, cuyo objetivo fue enriquecer los datos originales mediante la identificación y extracción sistemática de elementos semánticos. La transformación de datos textuales no estructurados en información normalizada y categorizada constituyó un paso primordial para generar representaciones formales del conocimiento.

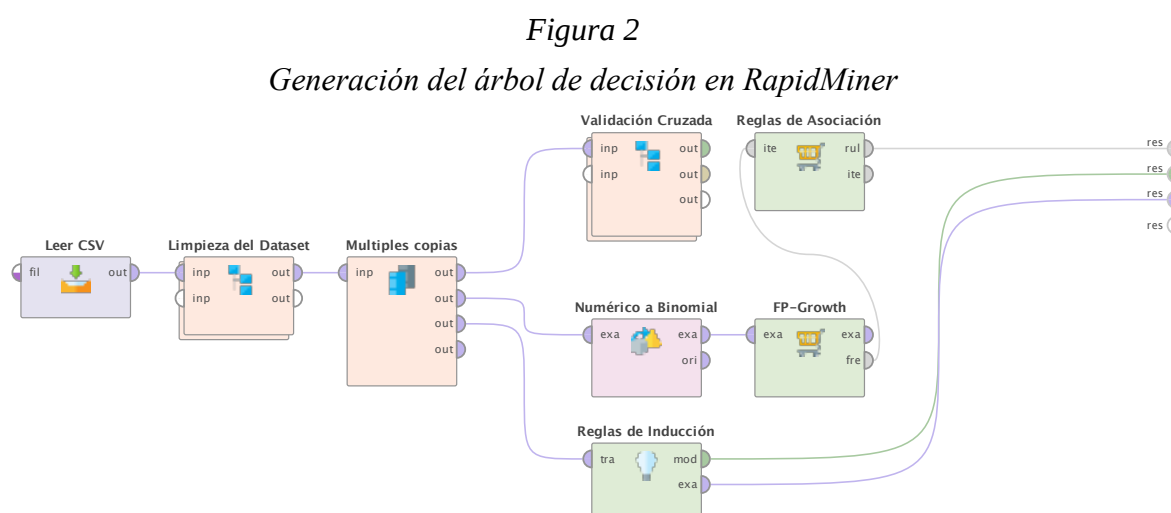
Preprocesamiento y transformación de los datos

El proceso de preparación de datos fue orientado hacia el enriquecimiento semántico del conjunto de datos original a través de la implementación de dos modelos de aprendizaje automático preentrenados. De este modo, se aplicó un modelo de NER propio denominado *dannyLeo16/ner_model_bert_base*¹, basado en la arquitectura BERT para español. Se escogió este modelo por su capacidad de comprensión contextual, en particular por la habilidad para identificar y clasificar entidades según su significado dentro del texto, independientemente de su forma superficial. A través de este modelo propio, se garantiza que los datos sean anonimizados para evitar la identificación de individuos involucrados en situaciones de crisis. La configuración de este modelo fue de 2e-5 para la ratio de aprendizaje, 8 de batch size y 3 épocas, siendo las típicas configuraciones para NER (Young et al., 2018). Este proceso permitió la extracción sistemática de entidades relevantes, como personas (PER) y ubicaciones (LOC), que posteriormente fueron integradas al conjunto de datos.

Después, se implementó un modelo de clasificación semántica basado en la arquitectura *XLNet-RoBERTa* con el nombre de *joeddav/xlm-roberta-large-xnli*, utilizando un enfoque de clasificación *zero-shot* con un umbral de ≥ 0.7 para categorizar emergencias con alta confianza estadística. Esta técnica resultó adecuada para el dominio de emergencias, debido a que permitió categorizar cada texto de alerta en las clases predefinidas como asalto, emergencia médica, accidente, entre otras alertas, sin requerir un proceso de entrenamiento específico con datos etiquetados. La combinación de los dos modelos preentrenados proporcionó una capa de información semántica estructurada que facilitó los procesos posteriores de modelado y representación del conocimiento.

Modelado y formalización ontológica

El proceso de modelado se implementó mediante un enfoque sistemático que combinó técnicas de minería de datos y representación del conocimiento. Inicialmente, se aplicó un algoritmo de árbol de decisión utilizando la plataforma *RapidMiner* sobre el conjunto de datos enriquecido, lo que permitió identificar patrones significativos y extraer reglas interpretables basadas en las características semánticas previamente inferidas del texto.



Previo al entrenamiento del modelo, se ejecutó una fase de limpieza y normalización de datos que incluyó la eliminación de símbolos especiales y corrección de errores de tokenización

¹ https://huggingface.co/dannyLeo16/ner_model_bert_base

originados por los modelos NER, la consolidación de entidades fragmentadas mediante técnicas de unificación léxica, la normalización textual sistemática que abarcó la estandarización de caracteres, espacios y formatos de escritura y la creación de variables binarias como *tienePersona*, *tieneCategoria*, *involucraPersona* y *tieneUbicacion* para cuantificar la presencia de entidades detectadas. Este proceso garantizó la calidad y consistencia de los datos de entrada para el modelado predictivo.

El modelo de árbol de decisión se configuró utilizando como variable la clave de emergencia, empleando como predictores las categorías semánticas inferidas y los indicadores de presencia de entidades, a través del proceso explicado en la Figura 2.

Del análisis resultante, se derivaron reglas de clasificación fundamentales como elementos del árbol, que posteriormente se formalizaron en el lenguaje SWRL para su integración en el sistema ontológico, como se presenta en el Listado 1. Estas reglas establecieron correlaciones específicas entre las características de las emergencias y su nivel de prioridad, como se evidencia en las relaciones inferenciales entre categorías y claves de atención.

Listado 1 Reglas de asociación

```

if CATEGORIA_EMERGENCIA = emergencia médica and TieneUbicacion > 0.500 then CLAVE ROJA (12 / 62 / 10 / 1)
if CATEGORIA_EMERGENCIA = asalto and TieneUbicacion > 0.500 then CLAVE NARANJA (123 / 61 / 41 / 11)
if CATEGORIA_EMERGENCIA = persona herida then CLAVE ROJA (7 / 45 / 6 / 1)
if CATEGORIA_EMERGENCIA = pelea and TienePersona > 0.500 then CLAVE NARANJA (66 / 49 / 15 / 1)
if CATEGORIA_EMERGENCIA = incendio then CLAVE ROJA (3 / 31 / 1 / 0)
if CATEGORIA_EMERGENCIA = robo then CLAVE NARANJA (20 / 7 / 1 / 0)
if TienePersona ≤ 0.500 and CATEGORIA_EMERGENCIA = pelea and TieneUbicacion ≤ 0.500 then CLAVE NARANJA (3 / 1 / 1 / 1)
if CATEGORIA_EMERGENCIA = persona perdida then CLAVE ROJA (71 / 87 / 27 / 8)
if TienePersona ≤ 0.500 and CATEGORIA_EMERGENCIA = pelea then CLAVE NARANJA (15 / 11 / 3 / 1)
if CATEGORIA_EMERGENCIA = accidente de tránsito then CLAVE NARANJA (43 / 28 / 25 / 1)
if CATEGORIA_EMERGENCIA = amenaza con arma and TienePersona > 0.500 then CLAVE ROJA (23 / 24 / 4 / 2)
else CLAVE ROJA (11 / 14 / 3 / 0)

```

Para optimizar la representación del conocimiento, se desarrolló un script en Python basado en la librería *rdflib* que automatizó la generación de la estructura ontológica. Este proceso comprendió la definición de clases fundamentales, la creación de propiedades de objeto y las propiedades de datos, como se puede ver en la Figura 3. Las reglas extraídas del árbol de decisión fueron formalizadas en el lenguaje SWRL para ser procesadas por el razonador, como se puede observar en la Tabla 1. La ontología resultante se importó a Protégé v5.6.5 para su validación mediante el razonador *Pellet*, donde se verificó la correcta aplicación de las reglas SWRL y la consistencia lógica del modelo de conocimiento.

Figura 3
Componentes de la ontología clasificados por jerarquías y propiedades



Tabla 1
Definición de reglas SWRL

Reglas	Lenguaje SWRL
Emergencia médica con ubicación → Clave Roja	<code>ex:Emergencia(?e) ^ ex:tieneCategoria(?e, ex:emergenciamedica) ^ ex:tieneUbicacion(?e, ?u) -> ex:tieneClave(?e, ex:claveRoja)</code>
Asalto con ubicación → Clave Naranja	<code>ex:Emergencia(?e) ^ ex:tieneCategoria(?e, ex:asalto) ^ ex:tieneUbicacion(?e, ?u) -> ex:tieneClave(?e, ex:claveNaranja)</code>
Pelea con persona → Clave Naranja	<code>ex:Emergencia(?e) ^ ex:tieneCategoria(?e, ex:pelea) ^ ex:involucraPersona(?e, ?p) -> ex:tieneClave(?e, ex:claveNaranja)</code>
Accidente de tránsito → Clave Naranja	<code>ex:Emergencia(?e) ^ ex:tieneCategoria(?e, ex:accidentedetransito) -> ex:tieneClave(?e, ex:claveNaranja)</code>
Robo (con o sin ubicación/ persona) → Clave Naranja	<code>ex:Emergencia(?e) ^ ex:tieneCategoria(?e, ex:robo) -> ex:tieneClave(?e, ex:claveNaranja)</code>

Evaluación de resultados

El proceso de evaluación fue diseñado con una perspectiva integral que permitió validar la consistencia lógica y la eficacia del modelo propuesto. Para ello, se implementaron estrategias complementarias de análisis que abarcaron distintos niveles de representación y procesamiento del conocimiento.

Por lo tanto, la evaluación se centró en el análisis del sistema ontológico implementado en OWL. Las reglas SWRL, derivadas del árbol de decisión, se integraron formalmente en la ontología y se sometieron a un proceso de validación exhaustivo mediante el razonador *Pellet*. Este proceso permitió verificar la capacidad para inferir correctamente la propiedad *tieneClave* a partir de las características de cada emergencia. Por ende, la ejecución sistemática de consultas en SPARQL y SQWRL fue incluida y demostró tanto la coherencia semántica del modelo como su capacidad para generar las inferencias esperadas en nuevos casos.

Para cuantificar el rendimiento predictivo de la propuesta, se utilizó la métrica de precisión, tomando en cuenta un conjunto de prueba estratificado del 20 % de instancias que no participó en la generación de reglas del árbol de decisión. La verdad fundamental o ground truth para cada instancia fue la clave del incidente que se asignó originalmente por los operadores del ECU 911 en el dataset original. El razonador *Pellet* fue empleado para procesar cada instancia en ese conjunto e inferir automáticamente el valor de la propiedad *tieneClave*. El porcentaje de precisión fue calculado a través del número de claves inferidas correctamente y el número de claves reales.

Como contraparte al enfoque ontológico, se desarrolló un modelo equivalente en Prolog utilizando la representación objeto-atributo-valor (OAV). Esta implementación alternativa permitió contrastar los resultados obtenidos mediante distintos paradigmas de representación del conocimiento, verificar la consistencia lógica de las reglas de inferencia y evaluar la portabilidad del conocimiento a otros sistemas formales. Las consultas realizadas sobre esta base de conocimiento lógico demostraron una concordancia con los resultados obtenidos en el sistema ontológico, reforzando la validez de las reglas derivadas del proceso de minería de datos.

La evaluación comparativa entre los enfoques ontológico y lógico evidenció una complementariedad metodológica, permitiendo la integración sistemática de sus ventajas analíticas. Mientras que el enfoque ontológico demostró mayor expresividad semántica y capacidad de integración con estándares web, la versión Prolog destacó por su eficiencia

computacional y claridad lógica. Esta dualidad validó los resultados desde perspectivas complementarias y estableció las bases para futuras mejoras con respecto a la interoperabilidad entre diferentes paradigmas de representación del conocimiento.

Implementación de la solución optimizada

El modelo de representación del conocimiento se implementó mediante un enfoque dual que combinó las ventajas de los grafos semánticos con la programación lógica declarativa. Esta estrategia permitió validar la robustez del sistema y garantizar su interoperabilidad en diferentes entornos computacionales.

El núcleo del sistema consistió en una ontología formal desarrollada en Protégé, estructurada como grafo de conocimiento siguiendo los estándares RDF/OWL. Esta ontología capturó las relaciones semánticas entre los conceptos fundamentales del dominio, como emergencias, entidades participantes, categorías de incidentes y claves de prioridad. La población de la ontología se realizó mediante un proceso sistemático utilizando la librería *rdflib* de Python, que transformó el dataset procesado en tripletas RDF completas.

El sistema de inferencia se enriqueció con reglas SWRL derivadas del análisis mediante árboles de decisión, las cuales permitieron la determinación automática de claves de emergencia basadas en las propiedades de cada instancia. La validación formal se llevó a cabo mediante el razonador *Pellet*, complementado con baterías de consultas en SPARQL y SQWRL que verificaron tanto la consistencia lógica como la capacidad inferencial del modelo.

Del mismo modo, se desarrolló una representación alternativa en Prolog utilizando el formato OAV, incluyendo la codificación de hechos básicos que representaban instancias concretas de emergencias, la traducción de las reglas SWRL a cláusulas lógicas en Prolog y un conjunto de predicados para consulta y verificación. Esto demostró la portabilidad del conocimiento capturado, manteniendo la misma capacidad inferencial que el sistema ontológico, pero con las ventajas computacionales del paradigma lógico. Las consultas ejecutadas confirmaron la equivalencia semántica entre ambas representaciones, validando así la consistencia del modelo independientemente de su formalismo de implementación.

Resultados y Discusión

La implementación del sistema de inferencia en Protégé demostró su eficacia al procesar automáticamente las instancias de emergencia. Tras cargar la ontología completa y activar el razonador *Pellet*, se logró inferir correctamente las claves de emergencia en todas las instancias evaluadas. La evaluación cuantitativa realizada sobre el conjunto de pruebas y comparando las claves inferidas por el razonador con las clasificaciones originales de los operadores, se obtuvo una precisión del 96.7 % al inferir la prioridad correcta. Un caso representativo fue la clasificación de una emergencia médica con ubicación definida, pero sin clave explícita, que se categorizó correctamente como *claveRoja* mediante la aplicación de la regla SWRL correspondiente, como se observa en la Figura 4. Este resultado validó la capacidad del modelo para replicar las decisiones humanas expertas en la clasificación de emergencias.

El sistema fue sometido a una batería de pruebas mediante consultas en SQWRL y SPARQL diseñadas para verificar distintos aspectos funcionales. Las consultas ejecutadas en SQWRL permitieron comprobar la consistencia de las inferencias realizadas. Una consulta específica diseñada para recuperar todas las emergencias inferidas como *claveRoja* que involucraban personas demostró la correcta aplicación de las reglas de clasificación. Los

resultados mostraron una correspondencia exacta entre las expectativas del modelo y las inferencias realizadas por el sistema.

Figura 4
Consultas en SQWRL sobre claves inferidas

Name	
Consulta 1: Emergencias inferidas con Clave Roja y nombre de persona involucrada	
Comment	
Status	
Ok	
ex:Emergencia(?e) ^ ex:tieneClave(?e, ex:claveRoja) ^ ex:involucraPersona(?e, ?p) ^ ex:nombrePersona(?p, ?nombre) -> sqwrl:select(?e, ?nombre)	
SQWRL Queries OWL 2 RL Consulta 1: Emergencias inferidas con Clave Roja y nombre de persona involucrada	
e	nombre
ex:emergencia2771	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2796	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2706	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2705	die quaman "^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2734	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2748	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2898	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2816	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2818	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2803	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2802	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2806	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2801	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2837	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2829	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2828	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2851	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2854	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2848	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2842	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2871	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2867	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2913	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2919	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2906	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2900	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2933	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2928	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2921	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2959	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2945	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2944	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2974	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2980	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2968	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2961	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2981	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2984	"^rdf:PlainLiteral
ex:emergencia2985	"^rdf:PlainLiteral

Mediante SPARQL se realizaron consultas de mayor complejidad sobre el grafo RDF, incluyendo la identificación de personas involucradas en emergencias de claveNaranja con ubicaciones específicas o agregación de emergencias por tipo de clave, como se puede observar en la Figura 5. Estas consultas no solo validaron la correcta inferencia de claves, sino también la integridad estructural del grafo de conocimiento y la precisión de las relaciones semánticas establecidas.

Como complemento al enfoque ontológico, se desarrolló una representación lógica equivalente en Prolog bajo el paradigma Objeto-Atributo-Valor (OAV), con el objetivo de validar la consistencia y portabilidad del conocimiento adquirido. Esta implementación se cargó una muestra representativa de registros seleccionados mediante muestreo aleatorio estratificado, asegurando la cobertura de todas las categorías de emergencia identificadas.

Posteriormente, se codificaron las reglas de inferencia derivadas del árbol de decisiones, manteniendo una correspondencia con las reglas SWRL de la ontología. Mediante un conjunto de consultas lógicas, se demostró que este enfoque alternativo alcanzó una capacidad de clasificación idéntica a la del sistema ontológico, validando la robustez del modelo, como se puede observar en el Listado 2.

Figura 5
Consultas SPARQL sobre tripletas RDF

SPARQL query		
PREFIX ecu911: <http://www.semanticweb.org/ecu911#>		
SELECT DISTINCT ?nombrePersona ?idLlamada ?ubicacionDetallada		
WHERE {		
?emergencia ecu911:tieneClave ecu911:claveNaranja .		
?emergencia ecu911:involucraPersona ?persona .		
?persona ecu911:nombrePersona ?nombrePersona .		
?emergencia ecu911:tieneUbicacion ?ubicacion .		
?ubicacion ecu911:ubicacionDetallada ?ubicacionDetallada .		
?emergencia ecu911:tieneID ?idLlamada .		
FILTER regex(?ubicacionDetallada, "gasolinera", "i")		
}		
ORDER BY ?nombrePersona		
nombrePersona	idLlamada	ubicacionDetallada
"emergencia2291"	"emergencia2291"	"gasolinera rircay"
"emergencia3226"	"emergencia3226"	"avenida de las americas avenida de las americas parque de las americas gasolinera eloy alfaro"
"emergencia2667"	"emergencia2667"	"gasolinera eloy alfaro"
"emergencia2942"	"emergencia2942"	"gasolinera eloy alfaro"
"emergencia3159"	"emergencia3159"	"gasolinera quinta chica"
"emergencia2666"	"emergencia2666"	"gasolinera quinta chica marisol"

SPARQL query		
PREFIX ecu911: <http://www.semanticweb.org/ecu911#>		
SELECT ?emergencia ?categoria ?ubicacionDetallada		
WHERE {		
?emergencia ecu911:tieneClave ecu911:claveRoja .		
?emergencia ecu911:tieneCategoria ?categoria .		
?emergencia ecu911:tieneUbicacion ?ubicacion .		
?ubicacion ecu911:ubicacionDetallada ?ubicacionDetallada .		
}		
ORDER BY ?categoria ?ubicacionDetallada		
emergencia	categoria	ubicacionDetallada
Emergencia 2492	emergenciamedica	"3 de noviembre pumapung pasaje 3 noviembre pumapung banco mecánica peugeot santa ana todos santos"
Emergencia 3263	emergenciamedica	"asilo de cañar santo molina paseo de cañar"
Emergencia 3266	emergenciamedica	"asilo de cañar santo molina paseo de cañar"
Emergencia 3185	emergenciamedica	"avenida fq f hugo reyes barrio fq hugo reyes hugo reyes hugo reyes calle omero reyes hugo reyes hugo reyes hom"
Emergencia 2867	emergenciamedica	"avenida loja manabi manabi guay avenida loja"
Emergencia 3092	emergenciamedica	"balsay alto medio bal san joaquin restaurante el gran sol"
Emergencia 2984	emergenciamedica	"banco de pichincha banco del pichincha azo islas de amazona"
Emergencia 2319	emergenciamedica	"barrio union el progreso canto cuenca progreso de paccha"
Emergencia 2968	emergenciamedica	"bolivar calle bolivar calle bolivar boli papi papi papi este este parque nocierto parque"
Emergencia 2348	emergenciamedica	"buena"
Emergencia 2411	emergenciamedica	"buena"
Emergencia 2903	emergenciamedica	"buenos aires iglesia"
Emergencia 2933	emergenciamedica	"calle larga baja del padron"

Listado 2

Inferencia lógica en Prolog

% Hechos

oav(emergencia2291, tieneCategoria, asalto).

oav(emergencia2291, tieneUbicacion, si).

oav(emergencia2291, tienePersona, si).

oav(emergencia2292, tieneCategoria, robo).

oav(emergencia2292, tieneUbicacion, si).

oav(emergencia2292, tienePersona, si).

oav(emergencia2293, tieneCategoria, asalto).

oav(emergencia2293, tieneUbicacion, si).

oav(emergencia2295, tieneCategoria, pelea).

oav(emergencia2295, tieneUbicacion, si).

oav(emergencia2295, tienePersona, si).

oav(emergencia2305, tieneCategoria, emergenciamedica).

oav(emergencia2305, tieneUbicacion, si).

oav(emergencia2305, tienePersona, si).

oav(emergencia2306, tieneCategoria, pelea).

oav(emergencia2306, tieneUbicacion, si).

oav(emergencia2306, tienePersona, si).

oav(emergencia2307, tieneCategoria, pelea).
 oav(emergencia2307, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2307, tienePersona, si).

oav(emergencia2310, tieneCategoria, asalto).
 oav(emergencia2310, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2310, tienePersona, si).

oav(emergencia2296, tieneCategoria, amenazaconarma).
 oav(emergencia2296, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2296, tienePersona, si).

oav(emergencia2297, tieneCategoria, personaperdida).
 oav(emergencia2297, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2297, tienePersona, si).

oav(emergencia2298, tieneCategoria, personaperdida).
 oav(emergencia2298, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2298, tienePersona, si).

oav(emergencia2299, tieneCategoria, asalto).
 oav(emergencia2299, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2299, tienePersona, si).

oav(emergencia2300, tieneCategoria, personaperdida).
 oav(emergencia2300, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2300, tienePersona, no).

oav(emergencia2301, tieneCategoria, amenazaconarma).
 oav(emergencia2301, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2301, tienePersona, no).

oav(emergencia2302, tieneCategoria, personaherida).
 oav(emergencia2302, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2302, tienePersona, si).

oav(emergencia2303, tieneCategoria, incendio).
 oav(emergencia2303, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2303, tienePersona, si).

oav(emergencia2304, tieneCategoria, personaherida).
 oav(emergencia2304, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2304, tienePersona, no).

oav(emergencia2305, tieneCategoria, emergenciamedica).
 oav(emergencia2305, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2305, tienePersona, si).

oav(emergencia2306, tieneCategoria, pelea).
 oav(emergencia2306, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2306, tienePersona, si).

oav(emergencia2308, tieneCategoria, pelea).
 oav(emergencia2308, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2308, tienePersona, no).

oav(emergencia2311, tieneCategoria, personaperdida).
 oav(emergencia2311, tieneUbicacion, si).
 oav(emergencia2311, tienePersona, no).

% Reglas

% Regla 1: emergencia médica con ubicacion → clave roja

tiene_clave(E, claveRoja) :- oav(E, tieneCategoria, emergenciamedica), oav(E, tieneUbicacion, si).

% Regla 2: asalto con ubicación → clave naranja

tiene_clave(E, claveNaranja) :- oav(E, tieneCategoria, asalto), oav(E, tieneUbicacion, si).

```
% Regla 3: pelea con persona → clave naranja
tiene_clave(E, claveNaranja) :- oav(E, tieneCategoria, pelea), oav(E, tienePersona, si).
% Regla 4: accidente de tránsito → clave naranja
tiene_clave(E, claveNaranja) :- oav(E, tieneCategoria, accidentedetransito).
% Regla 5: robo → clave naranja
tiene_clave(E, claveNaranja) :- oav(E, tieneCategoria, robo).
```

```
% Relación inferida como OAV (opcional)
oav(E, tieneClave, C) :- tiene_clave(E, C).
```

```
?- oav(E, tieneCategoria, personaperdida), oav(E, tienePersona, si)
E = emergencia2297 ;
E = emergencia2298 ;
false
```

```
?- tiene_clave(emergencia2291, Clave).
Clave = claveNaranja ;
false
```

Conclusiones

Este estudio demuestra la viabilidad de implementar un sistema integral de gestión del conocimiento para emergencias basado en el procesamiento automatizado de informes textuales no estructurados del ECU 911, considerando implicaciones éticas críticas respecto a la privacidad, confidencialidad y anonimización de los datos. La metodología propuesta presenta un marco híbrido novedoso, ya que combina modelos avanzados de procesamiento del lenguaje natural (NLP) con minería de datos, representación de conocimiento formal y lógica, lo que ha permitido transformar eficientemente datos brutos en conocimiento estructurado y accionable. Específicamente, la aplicación de modelos de Reconocimiento de Entidades Nombradas (NER) y clasificación textual posibilitó la extracción automatizada de elementos semánticos clave como personas, ubicaciones y categorías de emergencia, mientras que el uso de árboles de decisión generó reglas interpretables para la clasificación de incidentes.

La implementación dual en Protégé a través de ontologías OWL/SWRL y en Prolog con formato Objeto-Atributo-Valor ha demostrado ser particularmente efectiva, proporcionando no solo una representación formal del conocimiento del dominio, sino también mecanismos robustos de inferencia automática de prioridades de emergencia, demostrando una precisión mayor al 96 % sobre un conjunto de pruebas independientes. Las consultas realizadas en SQWRL y SPARQL han validado la capacidad del sistema para recuperar información compleja y realizar deducciones semánticas, confirmando su potencial como herramienta de apoyo a la toma de decisiones. Como trabajos futuros se pueden expandir la ontología mediante la inclusión de dimensiones temporales, causales y operativas para modelar escenarios complejos, así como la integración con sistemas multiagente para asistencia inteligente en la toma de decisiones.

Reconocimientos y Declaraciones

Los autores desean agradecer al Vicerrectorado de Investigaciones de la Universidad del Azuay por el apoyo financiero y académico, así como a todo el personal de la escuela de Ingeniería de Ciencias de la Computación, y el Laboratorio de Investigación y Desarrollo en Informática (LIDI).

Los autores declaran la contribución y participación equitativa de roles de autoría para esta publicación.

Los autores declaran que, en la escritura del presente artículo, no se han utilizado herramientas de inteligencia artificial.

Referencias

- Hu, Z., Hou, W., & Liu, X. (2024). Deep learning for named entity recognition: a survey. *Neural Computing and Applications*, 36(16), 8995-9022. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09646-6>
- Imran, M., Castillo, C., Diaz, F., & Vieweg, S. (2015). Processing Social Media Messages in Mass Emergency. *ACM Computing Surveys*, 47(4), 1-38. <https://doi.org/10.1145/2771588>
- Keraghel, I., Morbieu, S., & Nadif, M. (2024). Recent Advances in Named Entity Recognition: A Comprehensive Survey and Comparative Study. *arXiv preprint arXiv:2401.10825*, 1-42.
- Le, N. L., Abel, M.-H., & Negre, E. (2024). Recognizing Similar Crises through the Application of Ontology-based Knowledge Mining. *arXiv preprint arXiv:2401.03770*.
- Orellana, M., Cubero Lupercio, J. E., Lima, J. F., García-Montero, P. S., & Zambrano-Martinez, J. L. (2025). Incident Alert Priority Levels Classification in Command and Control Centre Using Word Embedding Techniques. En S. Berrezueta-Guzman, R. Torres, J. L. Zambrano-Martínez, & J. Herrera-Tapia (Eds.), *Information and Communication Technologies. TICEC 2024. Communications in Computer and Information Science* (1.a ed., Vol. 2273, pp. 238-252). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75431-9_16
- Orellana, M., Molina Pinos, P. A., García-Montero, P. S., & Zambrano-Martinez, J. L. (2025). Pre-processing of the Text of ECU 911 Emergency Calls. En S. Berrezueta-Guzman, R. Torres, J. L. Zambrano-Martínez, & J. Herrera-Tapia (Eds.), *Information and Communication Technologies. TICEC 2024. Communications in Computer and Information Science* (1.a ed., Vol. 2273, pp. 271-284). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-75431-9_18
- Rudra, K., Ghosh, S., Ganguly, N., Goyal, P., & Ghosh, S. (2015). Extracting Situational Information from Microblogs during Disaster Events. *Proceedings of the 24th ACM International on Conference on Information and Knowledge Management*, 583-592. <https://doi.org/10.1145/2806416.2806485>
- Schreiber, G. (2008). Knowledge Engineering. En *Foundations of Artificial Intelligence* (Vol. 3, pp. 929-946). Elsevier B.V. [https://doi.org/10.1016/S1574-6526\(07\)03025-8](https://doi.org/10.1016/S1574-6526(07)03025-8)
- Shukla, D., Azad, H. K., Abhishek, K., & Shitharth, S. (2023). Disaster management ontology-an ontological approach to disaster management automation. *Scientific Reports*, 13(1), 8091.
- Staab, S., & Studer, R. (2013). *Handbook on ontologies* (2nd ed.). Springer Science & Business Media.
- Thodupunuri, R. K., Edla, K., Thoodi, R. R., Andrasu, M., Kolanu, A. R., & Chethi, S. R. K. (2025). Enhanced Classification of Tweets and Emergency Response using BERT with AdamW Optimizer and NER. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 12(5), 86-95. <https://www.irjet.net/archives/V12/I5/IRJET-V12I514.pdf>
- Young, T., Hazarika, D., Poria, S., & Cambria, E. (2018). Recent Trends in Deep Learning Based Natural Language Processing [Review Article]. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 13(3), 55-75. <https://doi.org/10.1109/MCI.2018.2840738>

Ticec²⁰²⁵

Analítica educativa y transformación institucional

Educational analytics and institutional transformation

Sistema Recomendador para la Asignación de Profesores en la Universidad de Cuenca

Recommender System for the Assignment of Professors at the University of Cuenca

Pablo Esteban Quito Urgilés¹ <https://orcid.org/0009-0007-6647-7046>, Juan Javier Valdiviezo Armijos¹ <https://orcid.org/0009-0000-3396-0735>, Jorge Maldonado-Mahauad¹ <https://orcid.org/>

¹Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Cuenca, Ecuador
pabloe.quito@ucuenca.edu.ec, juan.valdiviezoa@ucuenca.edu.ec,
jorge.maldonado@ucuenca.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2025/06/29

Aceptado: 2025/08/20

Publicado: 2025/10/15

Resumen

La asignación de docentes a materias en educación superior constituye un desafío crítico para la gestión académica, ya que impacta directamente en la calidad del proceso de enseñanza-aprendizaje. A pesar de su vigencia, los procesos manuales de asignación enfrentan retos evidentes, como la subjetividad, la falta de estandarización y una elevada carga administrativa. Frente a este escenario, este trabajo plantea un sistema recomendador que combina el análisis de sentimientos, mediante modelos de lenguaje basados en *transformers* adaptados localmente (RoBERTuito), con técnicas de optimización matemática, con el propósito de alinear las competencias de los docentes con los requerimientos académicos específicos. Para ello, se desarrollaron perfiles docentes enriquecidos a partir de evaluaciones históricas, comentarios estudiantiles clasificados automáticamente y competencias definidas institucionalmente bajo el marco del pentágono de competencias. Además, se incorporaron pesos dinámicos que permiten ajustar la relevancia de los factores pedagógicos y técnicos según las particularidades de cada ciclo académico. Los resultados obtenidos con el sistema recomendador muestran una alta correspondencia entre las recomendaciones generadas y las asignaciones manuales, especialmente en carreras de perfil técnico. Adicionalmente, los directores de carrera que lo utilizaron en un piloto valoraron favorablemente el sistema, indicando que no solo disminuye significativamente la carga operativa, sino que también se consolida como una herramienta estratégica con alto potencial de escalabilidad y replicabilidad en diversos contextos educativos.

Sumario: Introducción, Metodología, Resultados y Discusión, Conclusiones.

Cómo citar: Quito, P., Valdiviezo, J. & Maldonado-Mahauad, J. (2025). Sistema Recomendador para la Asignación de Profesores en la Universidad de Cuenca. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 127-145.
<https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1354>

Palabras clave: análisis automático de texto, docentes universitarios, inteligencia artificial, sistemas de apoyo a la decisión, sistemas de información educativa.

Abstract

The assignment of teachers to courses in higher education represents a critical challenge for academic management, as it directly impacts the quality of the teaching-learning process. Despite their continued use, manual assignment processes face evident challenges, such as subjectivity, lack of standardization, and a high administrative workload. In response to this scenario, this study proposes a recommender system that combines sentiment analysis, using locally adapted transformer-based language models (RoBERTuito), with mathematical optimization techniques, aiming to align teachers' competencies with specific academic requirements. To achieve this, enriched teacher profiles were developed based on historical evaluations, automatically classified student comments, and institutionally defined competencies within the framework of the Competency Pentagon. Additionally, dynamic weights were incorporated to adjust the relevance of pedagogical and technical factors according to the particularities of each academic cycle. The results obtained from the recommender system demonstrate a high correlation between generated recommendations and manual assignments, particularly in technically oriented degree programs. Moreover, program directors who participated in a pilot test positively evaluated the system, noting that it not only significantly reduces the operational workload but also establishes itself as a strategic tool with high potential for scalability and replicability across diverse educational contexts.

Keywords: Academic teaching personnel, artificial intelligence, automatic text analysis, decision support systems, educational information systems.

Introducción

En la gestión del talento humano, la tecnología ha transformado los procesos organizativos, integrando herramientas que optimizan la planificación estratégica y alinean las capacidades del personal con los objetivos organizacionales (Perdomo-Charry y Riascos-Erazo, 2008). En el ámbito educativo, la asignación adecuada de profesores a los cursos constituye un desafío crítico para las Instituciones de Educación Superior (IES), dado que este proceso impacta directamente en la calidad del aprendizaje y la eficiencia administrativa (Patfield 2023). En contextos como el de la Universidad de Cuenca, la asignación aún se realiza de forma subjetiva y depende principalmente de evaluaciones curriculares y criterios poco estandarizados, lo que genera inconsistencias y limita la disponibilidad del personal administrativo para actividades estratégicas (Universidad de Cuenca, 2022).

Diversos estudios han abordado la problemática de la asignación docente mediante sistemas expertos y técnicas de optimización. Por ejemplo, Calle López et al. (2018) desarrollaron un sistema basado en minería de datos y programación lineal entera, que logró mejorar la precisión y reducir el tiempo en la planificación académica. De forma complementaria, Szwarc et al. (2020) propusieron un modelo interactivo de asignación basado en competencias y programación por restricciones, logrando un mayor equilibrio en la carga docente y resiliencia frente a cambios curriculares. En otro enfoque, Tabares-Ospina et al. (2013) desarrollaron un sistema experto (ExpertoRH_ITM) que incorporaba indicadores como formación, experiencia y producción académica para mejorar los procesos de selección de personal universitario. Más recientemente, Krugel et al. (2020) presentaron el sistema JACK, enfocado en la evaluación automatizada de competencias en cursos de programación, destacando el papel de los modelos de competencias en la personalización del aprendizaje.

En paralelo, el análisis de evaluaciones estudiantiles mediante técnicas de procesamiento del lenguaje natural (PLN) ha emergido como una herramienta clave para la toma de decisiones en educación. Gonzalez-Gómez et al. (2024) destacan el uso de PLN para generar taxonomías de competencias y detectar patrones en la retroalimentación de los estudiantes, mientras que Song et al. (2024) desarrollaron el TeachingSenti-lexicon, un recurso diseñado específicamente para identificar la polaridad de comentarios sobre la enseñanza. Modelos basados en transformers como BERT o RoBERTa han demostrado un rendimiento sobresaliente en análisis de sentimientos aplicados a contextos educativos (Shuqin et al., 2024; Id et al., 2024), aunque con limitaciones en cuanto a requerimientos computacionales y adaptabilidad a distintos dominios lingüísticos.

Dentro de esta línea, resulta relevante destacar a RoBERTuito, un modelo de lenguaje basado en RoBERTa y entrenado con un corpus de 500 millones de tuits en español, que ha demostrado superar a otros modelos preentrenados como BETO, RoBERTa-BNE e incluso al BERT multilingüe ajustado, en tareas de análisis de sentimientos, detección de discurso de odio e ironía (Pérez, Furman, Alonso Alemany, y Luque, 2022; Sahoo, et al., 2023). Esta ventaja comparativa, sumada a su adaptación específica al español en contextos informales y con alta carga emocional, lo convierte en una opción idónea para el análisis de comentarios estudiantiles dentro del presente estudio.

Pese a estos avances, la literatura aún carece de un enfoque que integre simultáneamente competencias pedagógicas, uso de tecnologías educativas y la voz estudiantil en los procesos de asignación docente. Asimismo, pocos modelos actualizan dinámicamente los perfiles académicos ni se alinean con marcos institucionales de competencias. En este contexto, el problema representa un nicho claro en la investigación y la práctica actual que requiere atención específica.

Para atender estas limitaciones, este estudio propone un sistema recomendador que permita asignar de manera eficiente a los docentes a las materias que mejor se alineen con su perfil profesional y académico. El sistema integra múltiples fuentes de información relevantes, como los resultados históricos de evaluaciones estudiantiles, las competencias pedagógicas y técnicas declaradas o verificadas institucionalmente y los comentarios cualitativos extraídos de dichas evaluaciones. Con esta integración, se busca facilitar una asignación docente más informada y alineada con las necesidades académicas, favoreciendo así una gestión administrativa más eficiente. A diferencia de soluciones existentes, el sistema propuesto agiliza la asignación considerando simultáneamente competencias disciplinares, pedagógicas y tecnológicas, junto con resultados provenientes de evaluaciones estudiantiles periódicas y análisis basados en modelos integrales de competencias, como el pentágono de competencias (Maldonado-Mahauad, Lozano, y Pacheco, 2024).

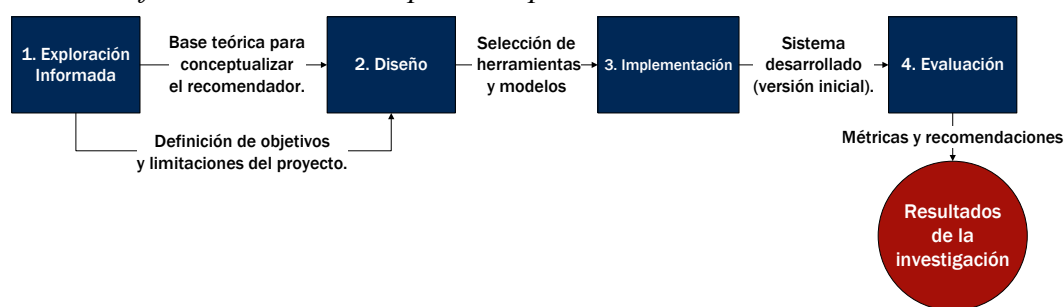
El presente trabajo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se describe en detalle la metodología utilizada, donde se presentan los datos y métodos aplicados para el diseño e implementación del sistema recomendador, incluyendo las técnicas de procesamiento de lenguaje natural, la construcción de perfiles docentes y el modelo matemático de recomendación empleado. En la sección 3 se presentan los resultados obtenidos en una fase piloto de validación, donde a través de un análisis comparativo entre las asignaciones tradicionales y la retroalimentación recibida por parte de los responsables académicos, se discute la valoración del prototipo funcional. Finalmente, en la sección 4 se abordan las conclusiones generales del estudio, se discuten sus implicaciones prácticas y se plantean recomendaciones clave para trabajos futuros y mejoras del modelo.

Metodología

La definición de las fases del proyecto se basó en el enfoque de Integrated Learning Design (ILD), caracterizado por una iteración continua entre investigación, diseño, implementación y evaluación (Bannan-Ritland, 2003). La Figura 1 muestra un gráfico que representa los pasos de esta metodología. En primer lugar, se realizó una exploración informada mediante el análisis del contexto, la identificación de necesidades, la revisión de datos existentes y la evaluación de desafíos técnicos. Luego, se conceptualizaron soluciones a través del diseño de funcionalidades clave. Posteriormente, el sistema fue desarrollado e implementado, integrando modelos de machine learning y algoritmos de recomendación, además de realizar ajustes y pruebas preliminares. Finalmente, la solución fue validada con usuarios reales, recopilando retroalimentación para ajustes finales y evaluando su viabilidad de escalamiento.

Figura 1

LD framework - lista de procesos para el sistema de recomendación



Fase 1. Exploración informada

En esta fase, se establecieron los objetivos del proyecto a partir del análisis integral de fuentes de datos clave sobre el desempeño y la trayectoria docente. Se incluyeron registros históricos de materias impartidas y evaluaciones de desempeño para obtener indicadores cuantitativos, así como comentarios estudiantiles que aportaron una visión cualitativa sobre aspectos pedagógicos y actitudinales. Además, se analizaron portafolios docentes y hojas de vida para identificar formación, experiencia e investigaciones. Estos datos se complementaron con marcos institucionales existentes sobre competencias docentes, que sirvieron como base para definir el perfil docente y estructurar el modelo de competencias empleado en el sistema de recomendación.

En cuanto al proceso de recolección y estructuración de la información, los datos fueron obtenidos a partir de registros institucionales existentes, tales como bases de datos de evaluaciones docentes, portafolios académicos y hojas de vida proporcionadas directamente por los responsables del proceso de acreditación ABET de la universidad, lo que garantiza la actualización y validez de los datos. Este procedimiento se realizó de manera manual, incluyendo la verificación de títulos y competencias declaradas, con el fin de asegurar que la información sobre habilidades y capacidades derivadas de los títulos académicos estuviera correctamente descrita, lo cual no podía garantizarse mediante un proceso automatizado. Además, el objetivo de este proceso es marcar el inicio de un marco de competencias docentes específico para nuestro caso de estudio y que sirva como base para el sistema de recomendación.

Fase 2. Diseño

A partir de la base teórica, los objetivos establecidos y el alcance definido en la fase anterior, se inició la etapa de diseño del sistema, centrada en la construcción del perfil docente y la lógica de recomendación. Esta fase se enfocó en estructurar y operacionalizar los

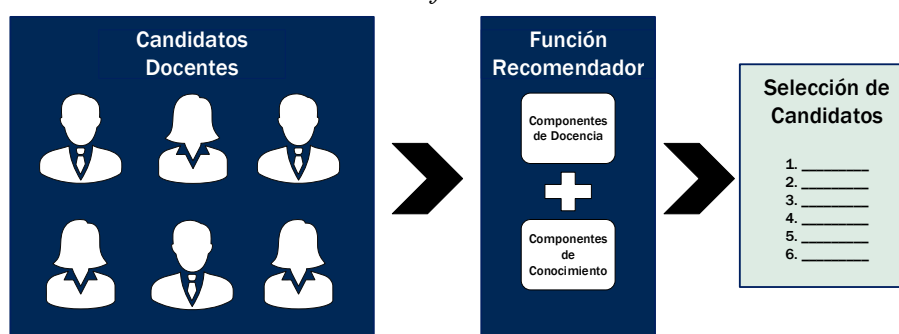
criterios necesarios para vincular, de manera objetiva, las características del docente con los requerimientos específicos de cada asignatura, respetando las directrices institucionales y la realidad académica de la universidad.

El primer paso fue la integración y procesamiento de las distintas fuentes de información recopiladas. En particular, se aplicaron técnicas de procesamiento del lenguaje natural (PLN) para analizar los comentarios cualitativos emitidos por los estudiantes en las evaluaciones docentes. Mediante el uso de un modelo de análisis de sentimientos basado en transformers (RoBERTuito), se logró transformar esas percepciones subjetivas en un indicador cuantificable, permitiendo incorporar la voz estudiantil como un componente estructurado dentro del perfil docente. Este indicador no solo reflejaba la carga emocional de los comentarios (positiva, negativa o neutral), sino que también contribuía a captar dimensiones actitudinales no evidentes en los datos numéricos tradicionales. Simultáneamente, se incorporaron los resultados de las evaluaciones docentes institucionales como una medida directa del desempeño. Estas evaluaciones aportaron indicadores cuantitativos sobre distintas dimensiones del trabajo docente, como planificación, metodología, cumplimiento y relación con los estudiantes. Asimismo, se incorporaron datos sobre la formación académica, experiencia profesional, participación en investigación y actividades de actualización docente.

Uno de los elementos clave en esta etapa fue la definición de un marco de competencias docentes, que permitió estructurar la comparación entre el perfil del docente y los requerimientos de cada asignatura. Cada asignatura del plan de estudios fue caracterizada mediante este marco, especificando qué tipo de competencias eran prioritarias para su enseñanza efectiva. Esto permitió construir una matriz de competencias por asignatura, contra la cual se podía evaluar la idoneidad de cada docente. Con toda esta información estructurada, se desarrolló un modelo de coincidencia usando la similitud del coseno que calculaba el grado de alineación entre el perfil de cada docente y las necesidades académicas de las asignaturas. Asimismo, se incorporó el pentágono de competencias docentes, que distingue cinco dimensiones: pedagógica, tecnológica, comunicativa, de investigación y de gestión. Estas dimensiones se integran en el modelo mediante un *score* que actúa como uno de los componentes del sistema de recomendación.

Figura 2

Proceso de selección de candidatos, que parte del conjunto general de docentes y, mediante una función de evaluación, genera una lista ordenada con aquellos que cumplen los criterios definidos



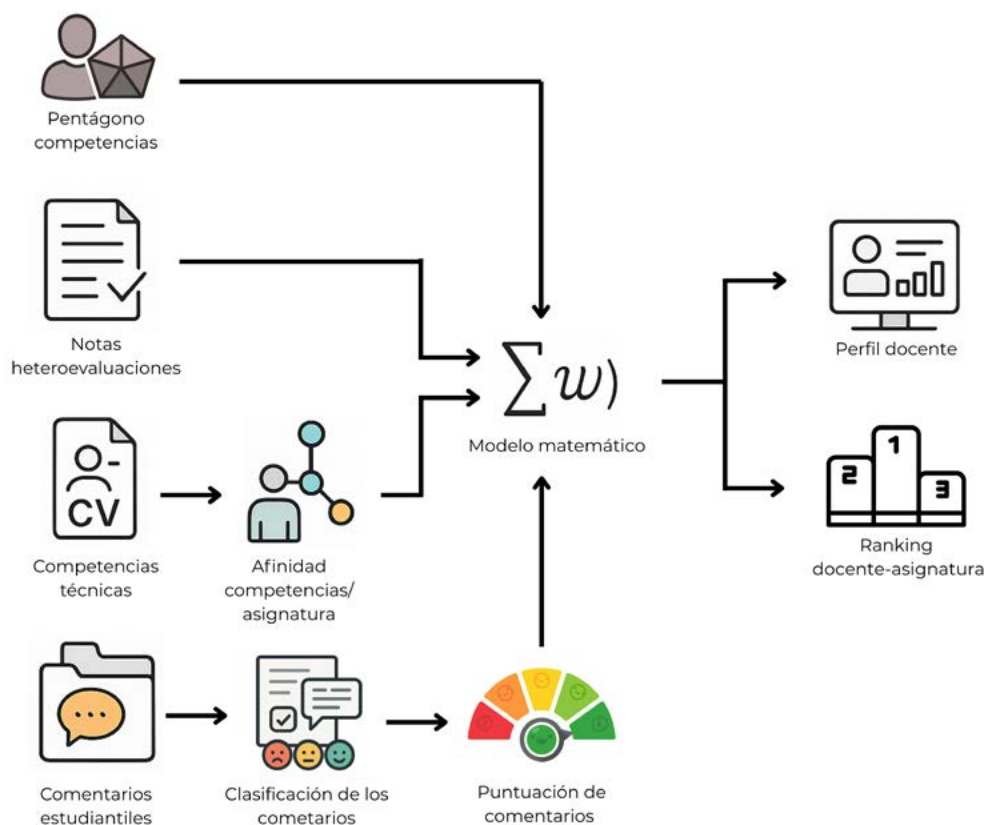
Finalmente, con cada uno de los componentes cuantificables mencionados se diseñó una función de evaluación que, a partir del conjunto total de docentes disponibles, genera una lista de candidatos para cada materia. Esta lista se ordena en función del nivel de afinidad entre el perfil del docente y los requerimientos de la asignatura, permitiendo a los responsables académicos contar con una herramienta objetiva y transparente para la toma de decisiones. El perfil final

resultante de este proceso combina datos duros y blandos, generando una representación integral de cada docente. Este flujo de procesamiento se resume en la Figura 2, donde se ilustra el proceso de selección de candidatos.

Con el fin de sintetizar de manera clara la lógica metodológica aplicada, la Figura 3 presenta un diagrama que integra las distintas fuentes de información y los procesos intermedios que conforman el sistema de recomendación. En este esquema se representan las entradas principales: evaluaciones docentes, competencias técnicas, comentarios estudiantiles y el pentágono de competencias de la universidad, los procedimientos de clasificación y afinidad que permiten transformar la información en métricas cualitativas y cuantitativas, así como el modelo matemático que combina dichos indicadores mediante pesos dinámicos. Finalmente, se muestran las salidas del proceso, consistentes en el ranking docente-asignatura y el perfil docente interactivo, que construyen los productos finales del sistema.

Figura 3

Diagrama metodológico del sistema de recomendación docente, desde las fuentes de datos hasta el perfil interactivo



Fase 3. Implementación

El sistema de recomendación fue implementado mediante un proceso que incluyó la preparación de datos, modelado matemático y la integración de técnicas de aprendizaje automático. La información recopilada fue sometida a procesos de limpieza, transformación y selección de variables clave, con el fin de garantizar una base sólida y coherente para el análisis posterior. Particular atención se dio al tratamiento de los comentarios estudiantiles, que fueron preprocesados mediante técnicas de normalización textual, eliminación de ruido lingüístico y tokenización con Byte-Pair Encoding, permitiendo su conversión a representaciones numéricas compatibles con modelos de lenguaje.

Una vez transformados los textos, se procedió a su clasificación automática. Para ello, se entrenó y ajustó un modelo de análisis de sentimientos RoBERTuito, especializado en textos en español y previamente entrenado sobre tareas emocionales. El objetivo era clasificar cada comentario en una de cuatro categorías: positivo, neutral, negativo y alerta (esta última reservada para situaciones especialmente críticas o sensibles, como reportes de maltrato, discriminación o favoritismo). Para garantizar la calidad del entrenamiento, se utilizó un conjunto de comentarios filtrados y etiquetados manualmente, respetando principios éticos como el anonimato tanto del emisor (estudiante) como del receptor (docente). El ajuste del modelo se realizó utilizando dos enfoques complementarios. En primer lugar, se aplicó una división clásica de los datos en un 80 % para entrenamiento y un 20 % para prueba. En segundo lugar, se utilizó una validación cruzada estratificada en cinco pliegues, asegurando que todas las clases estuvieran representadas proporcionalmente en cada subconjunto. Ambos métodos emplearon un criterio de parada temprana basado en la métrica F1-score, para evitar el sobreajuste y mantener un equilibrio entre precisión y sensibilidad. Como resultado de este proceso, se generaron varios modelos alternativos de clasificación.

En cuanto al tratamiento de datos sensibles, se siguieron los protocolos establecidos por la Dirección de Innovación Educativa de la Universidad de Cuenca, entidad responsable de regular los procesos de evaluación docente. Todos los comentarios estudiantiles fueron anonimizados desde su origen, lo que garantiza que ni los emisores ni los receptores puedan ser identificados. Cuando RoBERTuito clasificó un comentario en la categoría de alerta, asociada a expresiones de maltrato, discriminación o situaciones críticas, este no se incorporó al perfil docente final ni se mostró públicamente, sino que fue gestionado únicamente como un indicador interno con fines de detección y prevención. De esta manera, el sistema reconoce la existencia de datos sensibles, pero asegura su tratamiento ético sin comprometer la privacidad ni la integridad de los actores involucrados.

Para mejorar la robustez del sistema y reducir la dependencia de un único modelo, se implementó un esquema de votación mayoritaria (ensemble). Bajo este esquema, las predicciones de los modelos individuales se combinaron y se asignó a cada comentario la categoría elegida por la mayoría de los modelos. Esta técnica aumentó la confiabilidad de las predicciones, especialmente en casos de ambigüedad o textos cortos. Finalmente, para integrar esta clasificación textual en el perfil docente de forma cuantitativa, se diseñó una escala de evaluación que asigna una calificación normalizada de 0 a 100.

La expresión matemática empleada para esta normalización se presenta a continuación:

$$C(D) = \frac{\sum_{e \in E} \text{conteo}(e) \cdot \text{peso}(e) - (\text{conteo}_{total} \cdot \text{peso}_{min})}{\text{conteo}_{total} \cdot (\text{peso}_{max} - \text{peso}_{min})} \times 100$$

e : Positivo = 2, Neutral = 0, Negativo = -1, Alerta = -5

Donde:

$\text{conteo}(e)$ es la cantidad de comentarios en la categoría e .

conteo_{total} es el total de comentarios sobre el docente.

$\text{peso}(e)$ corresponde al peso correspondiente a la categoría e .

peso_{max} = 2 máximo valor de ponderación

peso_{min} = -5 mínimo valor de ponderación

Con los datos procesados, se implementa un modelo matemático que genera una puntuación de recomendación $R(D,A)$ para cada docente frente a una asignatura específica. Esta puntuación integra diversas fuentes de información, ponderadas mediante la siguiente fórmula, basada en el modelo propuesto originalmente por Calle-López et al (2018). y adaptado para incorporar aspectos adicionales pertinentes a nuestro estudio:

$$R(\vec{D}, \vec{A}) = p_1 \frac{\sum_{k=1}^N \frac{\phi_k(D, A)}{1 + \exp(k - N)}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{1 + \exp(k - N)}} + p_2 \cdot C(D, A) + p_3 \cdot \text{Sim}(D, A) + p_4 \cdot \Psi(D)$$

Cada término en la ecuación representa un aspecto específico del perfil docente y su relación con la asignatura.

Evaluación histórica ponderada

$$\frac{\sum_{k=1}^N \frac{\phi_k(D, A)}{1 + \exp(k - N)}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{1 + \exp(k - N)}}$$

Donde:

$\phi_k(D, A)$: evaluación histórica del docente D en la asignatura A durante el período k , combinando indicadores cuantitativos y cualitativos.

N : número total de períodos considerados.

$\frac{1}{1 + \exp(k - N)}$: factor sigmoide que otorga mayor peso a evaluaciones recientes.

Comentarios estudiantiles

$C(D, A)$: calificación derivada del análisis de comentarios proporcionados por estudiantes.

Similitud de competencias

$\text{Sim}(D, A)$: mide la afinidad entre el vector competencial del docente D , obtenido del portafolio docente actualizado y el vector competencial requerido por la asignatura A , definido por la planificación curricular. Se calcula mediante la similitud del coseno:

$$\text{Sim}(D, A) = \frac{\vec{D} \cdot \vec{A}}{|\vec{D}| |\vec{A}|}$$

Pentágono de competencias docentes

$\Psi(D)$: métrica compuesta que evalúa cinco dimensiones competenciales institucionales (tecnológica, comunicativa, pedagógica, gestión e investigativa). Cada dimensión se obtiene mediante encuestas normalizadas en el rango $[0,1]$:

$$\Psi(D) = \frac{1}{5} \sum_{c \in \{tec, com, ped, ges, inv\}} (C_c)_{\text{Norm}}$$

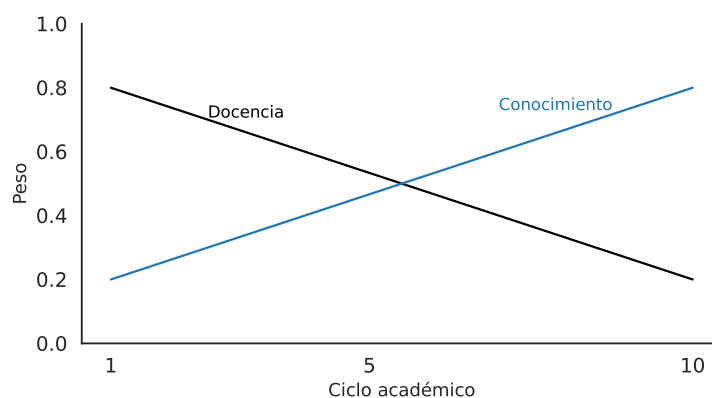
Además, el modelo incorpora dos agrupaciones funcionales definidas desde observaciones de la Dirección de Innovación Educativa: docencia, que considera evaluaciones recientes

(p_1) y percepción estudiantil (p_2); y conocimiento, que incluye similitud competencial (p_3) y competencias institucionales (p_4).

La relevancia relativa de cada grupo de competencias varía según el avance académico, que se modeló mediante la asignación de pesos dinámicos. En los ciclos iniciales se otorga mayor importancia a la dimensión pedagógica o de docencia, ya que en esta etapa se busca fortalecer las bases metodológicas y el acompañamiento formativo de los estudiantes. En los ciclos superiores, en cambio, se prioriza la dimensión de conocimiento disciplinar, pues el énfasis académico se orienta hacia la especialización y la profundidad técnica de los contenidos. Esta transición progresiva refleja con mayor fidelidad las expectativas institucionales y fue implementada a través de funciones lineales que ajustan los pesos de cada dimensión en función del nivel académico de la asignatura, como se ilustra en la Figura 4.

Figura 4

Variación de los pesos asignados a las dimensiones docencia y conocimiento en función del ciclo académico



Como parte de la fase de implementación, se desarrolló un componente clave para mejorar la visualización y comprensión del desempeño docente: el perfil docente, diseñado no solo como una interfaz informativa, sino como una herramienta estratégica para apoyar la toma de decisiones académicas fundamentadas. Este se presenta como un *dashboard* que agrupa elementos gráficos orientados a facilitar el análisis y la toma de decisiones mediante una representación clara y precisa de información clave. El objetivo principal de este perfil es convertir datos dispersos y complejos, provenientes de diversas fuentes como evaluaciones, comentarios, historial de asignaturas y competencias, en conocimiento estructurado y accionable. Para ello, se incorporaron distintos tipos de visualizaciones que permiten representar tanto indicadores cuantitativos como cualitativos de manera integrada.

Los elementos que conforman el perfil docente son: (1) las gráficas de barras de la Figura 5, que muestran las asignaturas más adecuadas para cada docente ordenadas según el nivel de afinidad calculado por el sistema de recomendación. Estas visualizaciones permiten identificar de forma inmediata las coincidencias más relevantes entre el perfil del docente y los requerimientos académicos, facilitando una asignación eficiente y basada en evidencia; (2) el conteo categorizado de comentarios estudiantiles representado en la Figura 6, mediante una barra apilada que segmenta las opiniones positivas, neutrales y negativas. Este componente proporciona una visión sintética sobre la percepción general que los estudiantes tienen del docente y funciona como un indicador cualitativo adicional.

Asimismo, (3) la gráfica de líneas mostrada en la Figura 7, que refleja la evolución histórica del rendimiento docente a partir de las calificaciones obtenidas en evaluaciones institucionales a lo largo de distintos ciclos académicos. Esta representación temporal permite detectar tendencias, identificar mejoras o retrocesos y valorar el impacto de procesos formativos o cambios metodológicos en el tiempo; (4) las nubes de palabras ilustradas en la Figura 8, generadas a partir del análisis de comentarios estudiantiles, que agrupan los términos más frecuentes asociados a dimensiones positivas y negativas del desempeño docente. Estas visualizaciones cualitativas permiten captar de manera intuitiva los aspectos más mencionados por los estudiantes, destacando fortalezas recurrentes o señalando áreas de mejora con un alto nivel de consenso.

Finalmente, (5) el Pentágono TIC de competencias docentes, representado en la Figura 9, ofrece una visión integral del perfil profesional al evaluar el nivel del docente en cinco dimensiones estratégicas. Cada vértice del pentágono refleja el grado de desarrollo en una competencia específica, lo que permite analizar de forma conjunta las habilidades pedagógicas, tecnológicas e investigativas en relación con el marco institucional adoptado.

Figura 5

Porcentaje de afinidad docente–asignatura, calculado según competencias y experiencia institucional

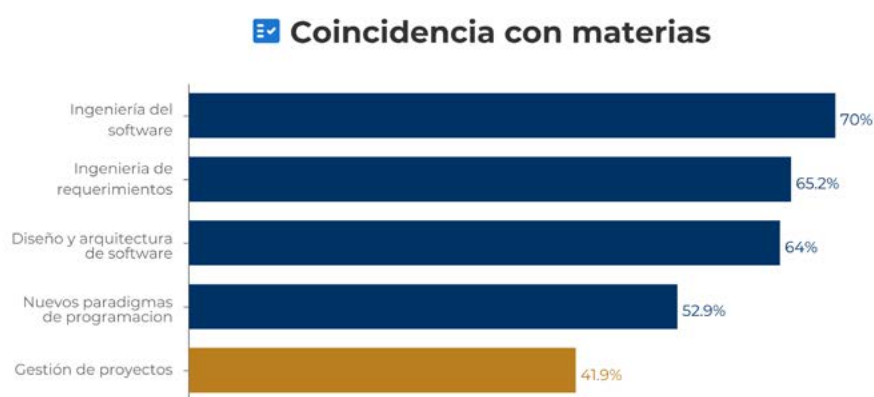


Figura 6

Conteo categorizado de comentarios estudiantiles, resultado del modelo RoBERTuito que clasifica en positivo, neutral, negativo y alerta

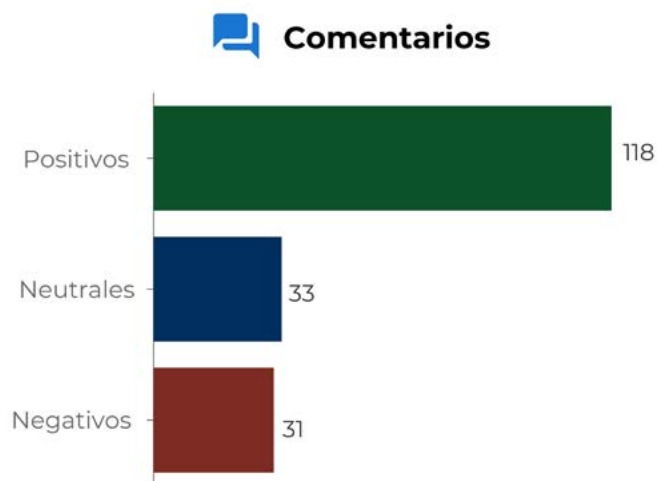
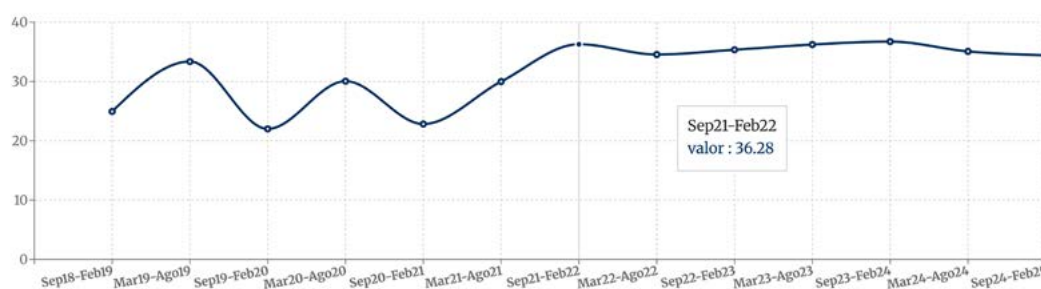


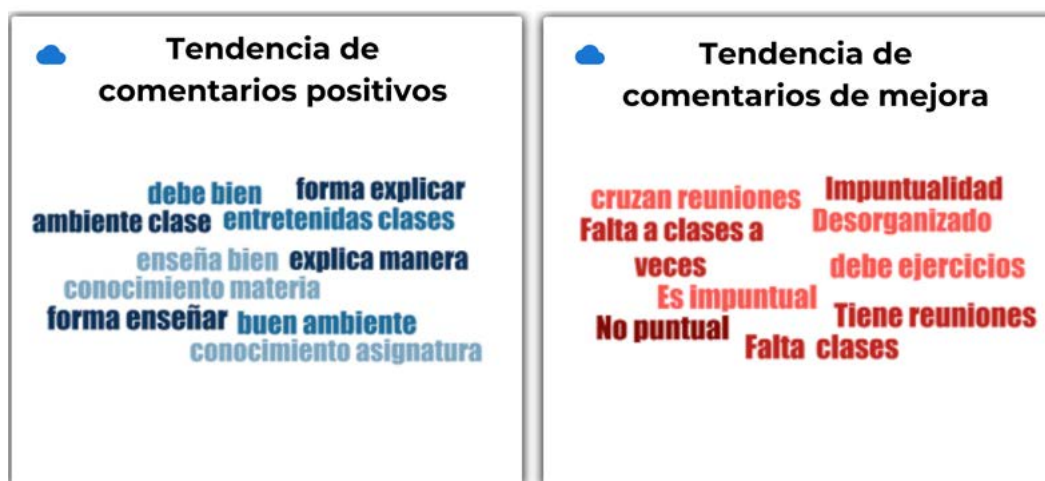
Figura 7

Evolución histórica de las notas de heteroevaluación, representada en una gráfica de líneas para identificar tendencias y variaciones en el desempeño docente

Resultados de evaluaciones

**Figura 8**

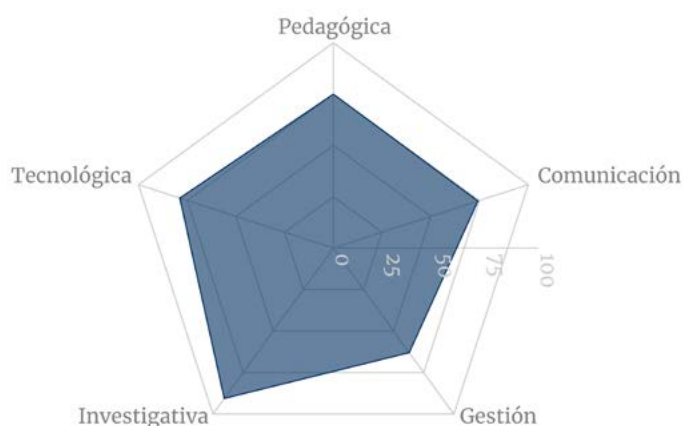
Nubes de palabras que resumen los aspectos positivos y negativos más mencionados en los comentarios estudiantiles

**Figura 9**

Pentágono de competencias TIC en el perfil docente, que muestra el nivel alcanzado en cinco dimensiones clave y permite identificar fortalezas y áreas de mejora



Competencias



Fase 4. Validación

La validación del sistema de recomendación docente se diseñó como una etapa clave para garantizar su viabilidad práctica y alineación con las necesidades institucionales. Se aplicó en tres programas académicos de la institución y contó con la participación directa de los directores de carrera. El proceso se estructuró en dos fases: una preevaluación sin intervención del sistema, donde los directores asignaron docentes según su criterio, y una posevaluación donde los mismos directores accedieron a las recomendaciones generadas por la herramienta, lo que les permitió explorar y analizar las listas ordenadas de docentes sugeridos para cada asignatura, junto con los indicadores y perfiles detallados que respaldaban dichas recomendaciones. Esta fase permitió observar cómo las propuestas automatizadas influían en la percepción y en la toma de decisiones de los directores, y si estas recomendaciones aportaban un valor agregado en términos de objetividad, rapidez y alineación con los perfiles requeridos.

Esta metodología permitió contrastar las decisiones humanas con las sugerencias automatizadas, en un entorno real y controlado. A través de encuestas estructuradas, se recogió retroalimentación sobre la utilidad y precisión percibida del sistema, junto con sugerencias de mejora. El análisis de esta información no solo evidenció patrones de aceptación, sino que también aportó insumos fundamentales para perfeccionar la herramienta. Así, la validación no se limitó a comprobar el funcionamiento técnico del sistema, sino que sirvió como un ejercicio institucional para reflexionar sobre los procesos actuales de asignación docente y explorar nuevas posibilidades apoyadas en datos, fortaleciendo su valor como herramienta de apoyo a la toma de decisiones académicas.

Resultados y Discusión

Con el objetivo de evaluar la eficacia y pertinencia del sistema propuesto, se llevó a cabo un análisis detallado basado en: (1) múltiples dimensiones que abarcan componentes técnicos del recomendador y (2) percepciones de usuarios clave. La sección de resultados presenta de forma estructurada los principales hallazgos derivados de los resultados y evaluación, permitiendo valorar la adopción del sistema. Se abordan aspectos como la efectividad del modelo de análisis de comentarios estudiantiles, los criterios tradicionales utilizados en la asignación docente, la validación cualitativa por parte de los directores de carrera, la comparación entre asignaciones manuales y automáticas, así como las percepciones generales sobre la utilidad del sistema y sugerencias para su mejora.

Resultado 1

El modelo RoBERTuito demostró un desempeño robusto y consistente en la tarea de clasificación de comentarios estudiantiles. A partir de un conjunto de datos de 3243 comentarios etiquetados manualmente, como se puede observar en la Figura 10, las categorías positiva y negativa dominaron la distribución de clases, abarcando en conjunto aproximadamente el 60 % del total de datos. En contraste, la categoría neutral presentó una representación significativamente menor, con un 17.08 % de los comentarios, mientras que la clase alerta, diseñada para identificar situaciones críticas, ocupó una posición intermedia en cuanto a cantidad de ejemplos disponibles.

El desbalance observado planteó un reto adicional para el entrenamiento, ya que los modelos de aprendizaje profundo tienden a privilegiar las clases mayoritarias, reduciendo la sensibilidad en las minoritarias. Para mitigar este efecto, se empleó la función de pérdida CrossEntropyLoss adaptada con pesos inversamente proporcionales a la frecuencia de cada clase, lo que otorgó mayor relevancia a las categorías menos representadas durante el proceso de retropropagación. Esta estrategia permitió que el modelo ajustara sus parámetros de manera

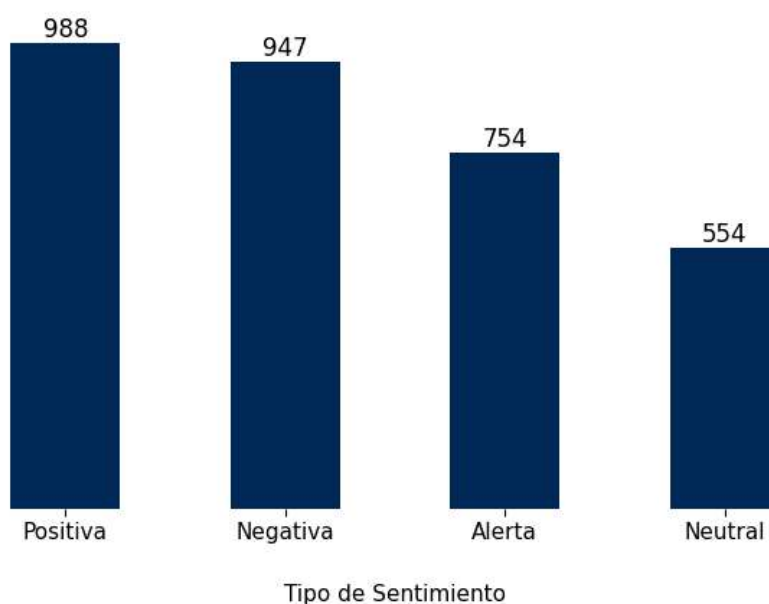
más equilibrada. Complementariamente, se aplicó la técnica de *label smoothing*, que distribuye parte de la probabilidad de la clase verdadera entre las demás, reduciendo la excesiva confianza del modelo en una sola categoría y mejorando su capacidad de generalización.

Para garantizar una evaluación rigurosa, se empleó una estrategia de validación cruzada estratificada de cinco pliegues, complementada con un esquema clásico de división 80/20 para entrenamiento y prueba. Los resultados obtenidos en términos de *accuracy* oscilaron entre 0.81 y 0.85, mientras que la métrica *macro-F1*, que pondera equitativamente el desempeño en todas las clases, mostró valores entre 0.80 y 0.85. Esta consistencia en las métricas *across folds* evidencia la estabilidad y capacidad de generalización del modelo sobre datos no vistos. RoBERTuito demostró alta capacidad para analizar la complejidad de los comentarios estudiantiles, caracterizados por lenguaje variado, coloquialismos y subjetividad. Aunque el conjunto de datos no tenía un balance en las categorías, la estabilidad en *accuracy* y *macro-F1* confirma la robustez del modelo, gracias al uso de muestreo ponderado y validación cruzada estratificada, lo que mitigó el desbalance de clases.

Figura 10

Distribución de comentarios por categoría, mostrando predominancia de positivos y negativos, con neutral como la clase menos representada

Distribución de Comentarios por Tipo de Sentimiento



Esta capacidad del modelo para extraer información significativa desde datos subjetivos y no estructurados resulta especialmente relevante al integrarse con los criterios utilizados tradicionalmente por los directores de carrera para la asignación docente. Previo a la implementación del sistema, los directores de carreras usaron principalmente la experiencia previa en la asignatura y conocimiento temático como criterios clave para asignar docentes.

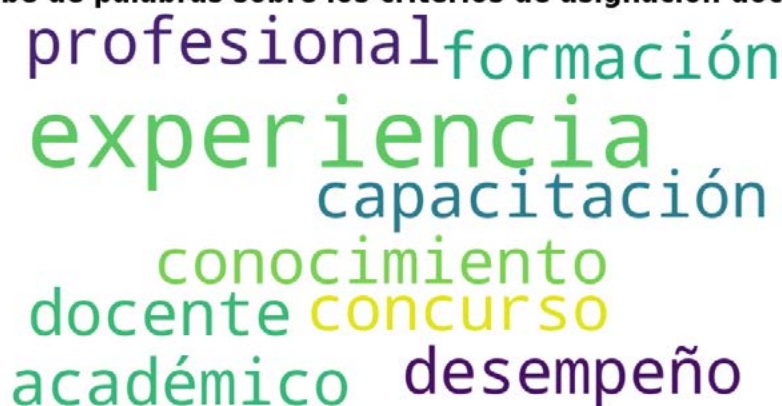
Resultado 2

Los criterios de los directores coinciden con los componentes del sistema recomendador, lo que refuerza su validez institucional. Esta concordancia también se refleja en la nube de palabras generada a partir de las respuestas de los directores, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Nube de palabras con los criterios más mencionados por los directores para la asignación docente, destacando “experiencia” y “conocimiento”

Nube de palabras sobre los criterios de asignación docente



La coincidencia entre los criterios utilizados por los directores y los componentes matemáticos integrados en el sistema de recomendación fortalece la validez institucional y la pertinencia práctica del modelo desarrollado. La experiencia previa en la asignatura y el desempeño docente evaluado, por ejemplo, están directamente representados en el componente histórico-evaluativo $\phi_k(D, A)$ que pondera la calidad y continuidad del desempeño docente a lo largo del tiempo, enfatizando los resultados más recientes para reflejar el estado actual del docente. Por otro lado, el conocimiento temático y la formación académica quedan reflejados en la similitud de competencias $\text{Sim}(D, A)$ que compara el perfil del docente con los requerimientos específicos de cada asignatura, incorporando valores que consideran la formación formal. Esta congruencia sugiere que el sistema no solo replica los criterios valorados por los gestores académicos, sino que además les ofrece una formalización cuantitativa y objetiva que puede potenciar la consistencia en la toma de decisiones. Cabe destacar, que algunos factores relevantes para la institución, como el mérito por concurso, no están totalmente contemplados en la versión actual del modelo debido a la complejidad y variabilidad institucional de estos procesos.

Resultado 3

Alta valoración cualitativa. Durante la evaluación cualitativa del sistema, los directores de carrera manifestaron un consenso absoluto en varios aspectos clave: la precisión y pertinencia de las recomendaciones generadas por el sistema, la calidad y suficiencia de los perfiles docentes elaborados, la idoneidad de las alternativas propuestas para la asignación, y la concordancia percibida entre los perfiles docentes presentados y el desempeño real observado en el entorno académico. Sin embargo, el análisis estadístico mediante el coeficiente de concordancia W de Kendall, aplicado para medir el grado de acuerdo entre los tres evaluadores, arrojó un valor general moderado ($W = 0.3333$ para el modelo recomendador y general), una concordancia perfecta únicamente en la dimensión del perfil docente ($W = 1.0$) y el valor- p asociado ($p = 0.392$) indica que no se cuenta con evidencia estadística suficiente para afirmar que existe un acuerdo significativo entre los directores en la mayoría de las dimensiones evaluadas.

Esta limitación se atribuye principalmente a la baja variabilidad en las respuestas, que se concentraron en niveles altos de valoración, y al tamaño reducido de la muestra, compuesto únicamente por tres evaluadores. Esta situación no invalida la validez práctica ni la relevancia de las evaluaciones, sino que subraya la necesidad de ampliar la muestra en futuras fases de evaluación para obtener conclusiones más generalizables y robustas desde el punto de vista

estadístico. Además, la concentración de respuestas en las puntuaciones más altas puede indicar un sesgo positivo, reflejo del interés y compromiso de los evaluadores con el proyecto, así como una percepción favorable inicial hacia la herramienta. En conjunto, estos resultados, aunque limitados, aportan evidencia preliminar valiosa sobre la aceptación y potencial impacto del sistema recomendador, sirviendo como base para mejoras iterativas y una validación ampliada en contextos institucionales más amplios.

Resultado 4

El sistema replica eficazmente decisiones humanas y ofrece alternativas pertinentes. La comparación entre asignaciones humanas y del sistema mostró alta coincidencia en Computación, lo que podría atribuirse a una mayor longevidad en el puesto, permitiendo un conocimiento más profundo de los docentes y las asignaturas que imparten, facilitando una mejor correspondencia con las recomendaciones del sistema (Tabla 1). Esta carrera alcanzó un $F1\text{-score}=0.811$, con un 50 % de coincidencia total, mientras que Telecomunicaciones y Eléctrica tuvieron resultados moderados ($F1\text{-score}=0.498$ y 0.558 , respectivamente). En general, las coincidencias parciales predominaron, sugiriendo oportunidades de mejora, especialmente en la precisión del orden recomendado. Las coincidencias parciales predominantes en Telecomunicaciones y Eléctrica no deben interpretarse como fallos, sino como evidencia de que el sistema tiene la capacidad de descubrir asignaciones funcionales, coherentes con los criterios institucionales y valoradas positivamente, incluso en contextos donde los directores no cuentan con una visión completa del cuerpo docente disponible. En este sentido, el sistema se posiciona no solo como un replicador de decisiones humanas, sino como una herramienta estratégica capaz de sugerir alternativas fundamentadas y pertinentes. No obstante, la decisión final siempre recae en los directores de carrera, lo que asegura que cualquier posible error sea filtrado antes de tener un impacto en la planificación académica. Es importante mencionar que las recomendaciones se derivan de datos institucionales, por lo cual, aunque puedan diferir de las elecciones humanas, resultan igualmente valiosas como alertas o insumos para revisar con mayor detalle los perfiles docentes propuestos.

Tabla 1

Distribución porcentual de la concordancia cualitativa entre asignaciones humanas y recomendadas, según cuatro posibles estados

CARRERA	COINCIDENCIA TOTAL	PARCIAL	OTRO ORDEN	NO COINCIDE
Telecomunicaciones	7.14 %	50 %	32.14 %	10.71 %
Computación	50 %	25 %	22.73 %	2.27 %
Eléctrica	22.2 %	50 %	9.26 %	18.52 %

Resultado 5

El sistema es útil, pero se recomienda ampliar la información de los perfiles docentes. Con base en el análisis cualitativo de la retroalimentación de los directores, se resaltó la necesidad de enriquecer dichos perfiles con datos adicionales sobre disponibilidad y carga laboral, aspectos que podrían mejorar la precisión y funcionalidad de las asignaciones. En general, los usuarios valoraron positivamente el sistema, destacando su utilidad institucional y el potencial para optimizar procesos.

En resumen, los hallazgos indican que el sistema recomendador docente es altamente aceptado por los directores de carrera que participaron en la evaluación. La percepción general destaca su utilidad, la calidad de las recomendaciones generadas y la claridad de los perfiles

docentes presentados, lo que refuerza su valor como herramienta de apoyo a la toma de decisiones académicas. Esta aceptación se ve respaldada tanto por las métricas objetivas como por la retroalimentación cualitativa obtenida durante las pruebas piloto. Además, el sistema demostró capacidad para identificar alternativas viables incluso en escenarios donde los criterios tradicionales no ofrecían suficientes opciones, lo que sugiere un potencial real para ampliar y mejorar los procesos de asignación docente.

Conclusiones

En este trabajo, se desarrolló una solución tecnológica orientada a optimizar la asignación docente. Esta se sustenta en cinco pilares: el análisis automatizado de comentarios estudiantiles, la medición de afinidad entre competencias y asignaturas, el análisis del rendimiento histórico del docente, la evaluación de competencias pedagógicas y la aplicación de pesos dinámicos que ajustan la relevancia de cada criterio según el nivel académico. Los principales aportes de este trabajo son: (1) una herramienta de procesamiento del lenguaje natural para interpretar retroalimentación estudiantil; (2) un modelo de competencias que refleja con precisión las capacidades técnicas del personal docente; (3) un sistema de recomendación alineado con los criterios institucionales; y (4) un prototipo validado positivamente por parte de los directores de carrera, quienes destacaron su utilidad y coherencia. La relevancia de estos aportes radica en que no se presentan de manera aislada, sino que convergen en una integración metodológica, la combinación de técnicas de procesamiento de lenguaje natural basadas en *transformers*, tecnología emergente en el análisis automático de texto en español, con modelos de optimización matemática aplicados al ámbito educativo. Esta propuesta articula información cuantitativa (evaluaciones institucionales), cualitativa (comentarios estudiantiles analizados automáticamente) y competencial (Pentágono de Competencias), generando perfiles docentes enriquecidos que permiten decisiones fundamentadas. Esta contribución constituye un avance tanto en la investigación sobre sistemas de recomendación académica como en la aplicación de inteligencia artificial para fortalecer la planificación universitaria.

Finalmente, este proyecto cumplió con los objetivos planteados y mostró que la integración de inteligencia artificial, datos institucionales y conocimiento contextual puede ser una vía prometedora para fortalecer procesos estratégicos en educación superior. En particular, el uso de modelos basados en *transformers* para el análisis de comentarios estudiantiles, junto con la implementación de un modelo matemático con pesos dinámicos, representa un aporte metodológico que complementa los mecanismos tradicionales de evaluación docente. Sin embargo, al momento de validar esta propuesta, el reducido tamaño de la muestra impidió obtener resultados estadísticamente concluyentes sobre la concordancia general entre evaluadores (coeficiente W de Kendall con valor bajo y sin significancia estadística debido a la homogeneidad en las respuestas). A pesar de esta limitación, los hallazgos iniciales proporcionan sólidas señales sobre la viabilidad del sistema para una implementación más amplia a nivel institucional.

Las limitaciones identificadas en este trabajo se relacionan principalmente con el acceso restringido a información detallada y con la dificultad de estandarizar las competencias específicas asociadas a cada asignatura. Si bien se contó con registros académicos y de especialización de los docentes, su revisión y estandarización se realizó manualmente, lo que representó una dificultad metodológica. A ello se suma la ausencia de información precisa sobre su experiencia profesional fuera del ámbito universitario, lo que restringió la posibilidad de construir perfiles más completos y redujo la representación integral de sus competencias. De manera complementaria, la definición de competencias puede volverse compleja cuando no se cuenta con un conocimiento directo del área de especialización, lo que evidencia la necesidad de mantener un contacto estrecho

con expertos que dominen tanto la disciplina como los objetivos de cada asignatura. A esto se suma que la validación se realizó únicamente con una muestra reducida de directores de carrera en la Facultad de Ingeniería, lo que, junto con la influencia de factores contextuales como afinidades personales o estilos de gestión, limita la generalización estadística de los resultados. En consecuencia, los hallazgos no deben interpretarse como conclusiones definitivas, sino como una evidencia preliminar sobre el potencial del sistema para evolucionar hacia una herramienta recomendadora institucional, capaz de apoyar la asignación docente de manera más transparente, fundamentada y alineada con los criterios académicos de la universidad.

Como líneas de trabajo futuro, se plantea ampliar significativamente la validación del sistema con una muestra mayor y más diversa de evaluadores para robustecer estadísticamente los resultados obtenidos. Además, se propone recolectar información directamente de los docentes sobre sus áreas específicas de experiencia y formación, enriqueciendo así la precisión y utilidad práctica de los perfiles generados. De forma complementaria, se considera relevante explorar mecanismos para capturar factores contextuales que actualmente no están sistematizados, tales como las preferencias individuales de los docentes respecto a determinadas asignaturas o modalidades de enseñanza, así como los estilos de gestión aplicados por los directores de carrera. Asimismo, se considera relevante integrar la variable de disponibilidad y carga horaria docente, aspecto que en la Universidad de Cuenca presenta particularidades debido a la ausencia de horarios fijos y a la combinación de actividades de docencia, investigación y gestión administrativa, que se desarrollan con base en su disponibilidad horaria. Su incorporación requerirá el diseño de mecanismos específicos para formalizar esta información de manera estructurada, lo que permitiría enriquecer la precisión del sistema de recomendación. No obstante, en el caso específico de la Universidad de Cuenca, es importante destacar que la asignación de horarios constituye un proceso distinto y complementario al de la asignación de docentes a las asignaturas, aunque ambos se relacionan de manera estrecha en la planificación académica. Finalmente, considerando los resultados favorables obtenidos con el modelo basado en *transformers*, se recomienda desarrollar un modelo propio adaptado específicamente al contexto institucional, que facilitará una mayor personalización y permitirá abordar otras tareas complementarias como la detección temprana de alertas o situaciones que afecten el ambiente académico.

Reconocimientos y Declaraciones

Este trabajo recibió el apoyo de la Vicerrectoría Académica de la Universidad de Cuenca y de la Dirección de Innovación Educativa.

Este trabajo forma parte de una tesis de grado de la carrera de Ingeniería en Computación. Los autores desean expresar su agradecimiento a la Dirección de Innovación Educativa, al Departamento de Ciencias de la Computación y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Cuenca, cuyo apoyo y acompañamiento resultaron fundamentales para la elaboración de este trabajo.

En cuanto a los criterios de autoría, todos los autores han tenido una participación equitativa en el desarrollo de la investigación, de acuerdo con la taxonomía CRediT.

En relación con el uso de herramientas de inteligencia artificial, los autores declaran que en la elaboración del presente artículo se empleó la herramienta ChatGPT versión 4o. Su uso se limitó a la revisión de ortografía y redacción en todas las secciones del manuscrito, con excepción de las referencias y del resumen, que fueron elaborados íntegramente por los autores.

Respecto a la financiación, el estudio ha sido autofinanciado por los autores, sin participación de fondos externos.

Referencias

- Bannan-Ritland, B. (2003). The role of design in research: The integrative learning design framework. *Educational Researcher*, 32(1), 21–24. <https://doi.org/10.3102/0013189X032001021>
- Calle López, D. E., Cornejo Reyes, P. J., Pesantez Aviles, L. F., Rodas Tobar, M. I., Vasquez Vasquez, C. E., & Robles Bykbaev, V. E. (2018). Un sistema experto basado en minería de datos y programación entera lineal para soporte en la asignación de materias y diseño de horarios en educación superior. *Enfoque UTE*, 9(9), 102–117. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v9n1.226>
- Daqiqil, I. D., Saputra, H., Syamsudhuha, S., Kurniawan, R., & Andriyani, Y. (2024). Sentiment analysis of student evaluation feedback using transformer-based language models. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 36(2), 1127–1139. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v36.i2.pp1127-1139>
- Gonzalez-Gomez, L. J., Hernandez-Munoz, S. M., Borja, A., Azofeifa, J. D., Noguez, J., & Caratozzolo, P. (2024). Analyzing natural language processing techniques to extract meaningful information on skills acquisition from textual content. *IEEE Access*, 12, 139742–139757. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3465409>
- Hénard, F., & Le Prince-Ringuet, S. (2008, octubre). The path to quality teaching in higher education (OECD IMHE Programme report; pp. 1–50). *Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos*. <http://www.oecd.org/edu/imhe/44150246.pdf>
- Krugel, J., Hubwieser, P., Goedicke, M., Striewe, M., Talbot, M., & Olbricht, C. (2020). Automated measurement of competencies and generation of feedback in object-oriented programming courses. *2020 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*, 1907–1914. <https://doi.org/10.1109/EDUCON45650.2020.9125323>
- Maldonado-Mahauad, J., Lozano, D. M., & Pacheco, J. (2024). Sistema de recomendación de cursos en línea basado en el perfil de competencias TIC del docente. *Revista Tecnológica-ESPOL*, 36(E1), 196–214. <https://doi.org/10.37815/rte.v36nE1.1201>
- Patfield, S. (2022). Towards quality teaching in higher education: Pedagogy-focused academic development for enhancing practice. *International Journal for Academic Development*, 27(4), 329–344. <https://doi.org/10.1080/1360144X.2022.2103561>
- Perdomo-Charry, G., & Riascos-Erazo, S. (2008). El rol de la gestión del conocimiento en la gestión del talento humano. *Revista Universidad y Empresa*, 10(15), 111–131. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6936999>
- Pérez, J. M., Furman, D. A., Alonso Alemany, L., & Luque, F. (2022). RoBERTuito: A pre-trained language model for social media text in Spanish. *arXiv preprint arXiv:2111.09453*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2111.09453>
- Rico, R. L. A. (2019). Formación y evaluación docente basada en un perfil por competencias: Una propuesta desde la práctica reflexiva. *Revista Educación*, 43(2), 1–29. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=44058158022>
- Sahoo, A., Chanda, R., Das, N., & Sadhukhan, B. (2023). Comparative analysis of BERT models for sentiment analysis on Twitter data. In *Proceedings of the 2023 9th International Conference on Smart Computing and Communications (ICSCC)* (pp. 658–663). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSCC59169.2023.10335061>
- Shuqin, H., & Raga, R. C. (2024). A deep learning model for student sentiment analysis on course reviews. *IEEE Access*, 12, 136747–136758. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3463793>
- Song, C., Chen, S., Cai, X., & Chen, H. (2024). Sentiment Analysis of Spanish Political Party Communications on Twitter Using Pre-trained Language Models. *arXiv preprint arXiv:2411.04862*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2411.04862>

- Szwarc, E., Wikarek, J., Gola, A., Bocewicz, G., & Banaszak, Z. (2020). Interactive planning of competency-driven university teaching staff allocation. *Applied Sciences*, 10(14), <https://doi.org/10.3390/app10144894>
- Tabares-Ospina, H. A., Monsalve-Llano, D. A., & Diez-Gomez, D. (2013). Modelo de Sistema Experto para la Selección de Personal Docente Universitario. *TecnoLógicas*, (30), 51-70.
- Universidad de Cuenca. (2022). *Concursos de méritos y oposición*. <https://www.ucuenca.edu.ec/wp-content/uploads/2025/08/2.-RCE-CES.pdf>

Anexos

Códigos fuente

Los códigos fuente desarrollados para este proyecto se encuentran disponibles públicamente en los siguientes repositorios de GitHub:

- <https://github.com/cuervo616/RoBERTuito-EduCommentss>
- https://github.com/Gh0stJJ/api_recomendador
- https://github.com/Gh0stJJ/Recomendador_docente

Metodología para la Identificación de Buenas Prácticas Docentes a Partir de Comentarios Estudiantiles Utilizando Análisis de Sentimientos y Modelado Temático

Methodology for Identifying Good Teaching Practices Through Student Comments Using Sentiment Analysis and Structural Topic Modeling

Diego Moscoso Lozano¹ <https://orcid.org/0009-0008-0073-5687>,
Jorge Maldonado-Mahauad¹ <https://orcid.org/0000-0003-1953-390X>

¹Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador
diego.moscosol@ucuenca.edu.ec, jorge.maldonado@ucuenca.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Enviado: 2025/06/28

Aceptado: 2025/08/21

Publicado: 2025/10/15

Resumen

El presente estudio propone una metodología empírica para identificar las dimensiones más valoradas de la práctica docente en educación superior, mediante un enfoque mixto que combina análisis cualitativo y cuantitativo. Se analizaron más de 89000 comentarios estudiantiles recopilados durante las evaluaciones docentes en la Universidad de Cuenca (periodo 2024–2025). Utilizando técnicas avanzadas de procesamiento del lenguaje natural, específicamente análisis de sentimiento y modelado estructural de temas (Structural Topic Modeling, STM), se procesó un amplio corpus textual. El análisis se centró en los comentarios positivos dirigidos a docentes destacados según una evaluación integral previa, con el objetivo de detectar patrones recurrentes en la percepción estudiantil. Como resultado, se identificaron cuatro dimensiones clave de valoración estudiantil: conocimiento disciplinar, gestión comunicativa, habilidades socioemocionales y metodología de enseñanza. Estas dimensiones reflejan fortalezas docentes percibidas por los estudiantes y presentan variabilidad significativa según contextos disciplinares y niveles académicos. Por ejemplo, mientras el conocimiento disciplinar es prioritario en áreas técnicas, las habilidades socioemocionales predominan en ciencias sociales y salud. Estos hallazgos destacan que las valoraciones estudiantiles constituyen una fuente de información cualitativa esencial, que supera las limitaciones de las métricas numéricas tradicionales al ofrecer

Sumario: Introducción, Metodología, Resultados y Discusión y Conclusiones.

Cómo citar: Moscoso, D. & Maldonado-Mahauad, J. (2025). Metodología para la Identificación de Buenas Prácticas Docentes a Partir de Comentarios Estudiantiles Utilizando Análisis de Sentimientos y Modelado Temático. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 146-161.
<https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1353>

un análisis más profundo y contextualizado. Finalmente, la metodología propuesta aporta a las instituciones de educación superior una herramienta práctica para identificar fortalezas específicas del profesorado y para diseñar programas formativos personalizados basados en evidencia, que facilitan una mejora continua y contextualizada de la calidad educativa.

Palabras clave: evaluación docente, análisis de comentarios, modelado temático estructural, educación superior.

Abstract

This study proposes an empirical methodology to identify the most valued dimensions of teaching practices in higher education through a mixed-method approach that integrates qualitative and quantitative analyses. Over 89,000 student comments collected during teacher evaluations at the University of Cuenca (2024–2025) were analyzed. Advanced natural language processing techniques, specifically sentiment analysis and Structural Topic Modeling (STM), were used to process an extensive textual corpus. The analysis focused on positive comments aimed at teachers recognized through a prior comprehensive evaluation, aiming to uncover recurring patterns in student perceptions. Four key dimensions of student evaluation emerged from the analysis: disciplinary knowledge, communication management, socio-emotional skills, and teaching methodology. These dimensions reflect perceived teaching strengths and exhibit significant variability across disciplinary contexts and academic levels. For example, disciplinary knowledge is prioritized in technical areas, while socio-emotional skills are more valued in social sciences and health disciplines. These findings underscore that student evaluations are an essential source of qualitative information, overcoming limitations of traditional numeric metrics by offering deeper, contextual insights. Ultimately, the proposed methodology provides higher education institutions with a practical tool to identify specific faculty strengths and design evidence-based, personalized professional development programs, thus fostering continuous and contextualized improvements in educational quality.

Keywords: teaching evaluation, comment analysis, structural topic modeling, higher education.

Introducción

La evaluación docente constituye un pilar fundamental en la búsqueda de la excelencia académica y la mejora continua de la calidad educativa en las instituciones de educación superior. A través de ella, las universidades rinden cuentas sobre el desempeño de su personal académico y además obtienen información crucial para fomentar el desarrollo profesional y la innovación pedagógica (Spooren et al., 2013). En este sentido, la perspectiva del estudiante se ha consolidado como una fuente invaluable de información para estas evaluaciones, ofreciendo una visión única sobre el proceso de enseñanza-aprendizaje y el impacto directo del desempeño docente. Así, estudios previos han demostrado cómo las prácticas docentes universitarias impactan directamente el interés, el compromiso y el rendimiento académico de los estudiantes (Álvarez-Álvarez y Falcon, 2023).

Tradicionalmente, la evaluación del desempeño docente se ha apoyado en gran medida en métricas cuantitativas, como promedios de calificación obtenidos de instrumentos de evaluación como los cuestionarios. Si bien las valoraciones numéricas ofrecen una visión general, suelen resultar insuficientes para capturar la complejidad de las prácticas pedagógicas efectivas en la enseñanza y el aprendizaje. De hecho, la mayoría de los estudios anteriores en este campo se han centrado en estas valoraciones numéricas, ignorando el valioso contenido cualitativo de los

comentarios abiertos de los estudiantes (Sun y Yan, 2023). Las evaluaciones basadas en escalas Likert limitan la capacidad de los estudiantes para expresar libremente sus percepciones sobre el desempeño docente (Gencoglu et al., 2023). Gran parte de la información que los estudiantes comparten en sus comentarios se pierde cuando todo se resume en promedios numéricos, lo que impide entender con claridad lo que los estudiantes realmente valoran y consideran como buenas prácticas docentes. Esta limitación muestra la importancia de agregar datos cualitativos para aprovechar los comentarios abiertos de los estudiantes en la evaluación para tener una visión más transparente y completa del trabajo que realiza el docente en el aula de clase (Hu et al., 2022).

En respuesta a esta limitación, el presente estudio propone una metodología empírica que integra enfoques cuantitativos y cualitativos para el análisis de la evaluación docente. Para esto, se utilizan herramientas de procesamiento de lenguaje natural (PLN), como el análisis de sentimiento y el modelado temático, aplicadas a un corpus de comentarios cualitativos emitidos por estudiantes. El análisis de sentimiento permite clasificar la polaridad de los comentarios para captar la intensidad emocional (Muhammad et al., 2016; Wankmüller y Heumann, 2021) e identificar específicamente las valoraciones positivas. Por su parte, el Structural Topic Model (STM) se emplea para identificar patrones temáticos latentes en los comentarios positivos de los estudiantes (Roberts et al., 2014), con la ventaja de poder explorar cómo varía la prevalencia de estos temas según características contextuales, como la facultad y el nivel académico. Si bien la mayoría de los estudios previos han aplicado técnicas de análisis de sentimiento o topic modeling de forma aislada, la integración de ambos enfoques en esta investigación representa una contribución significativa al proporcionar una comprensión más completa de la percepción estudiantil (Hayat et al., 2024).

Como resultado de aplicar esta metodología, se logró identificar las dimensiones más valoradas de la práctica docente por los estudiantes de la Universidad de Cuenca y entender cómo esas valoraciones cambian según la facultad y el nivel académico, a partir del análisis de los comentarios positivos emitidos hacia docentes con mejor desempeño. Este enfoque busca ofrecer una comprensión más matizada de las expectativas estudiantiles, reconociendo que las percepciones de los estudiantes pueden variar significativamente según el contexto disciplinar (Marsh, 2007) y el momento formativo (Chen y Hoshower, 2003). La metodología propuesta es replicable y puede servir como una herramienta útil para que las universidades diseñen estrategias de formación docente más efectivas y ajustadas a su contexto. Poder identificar fortalezas y planificar capacitaciones con base en los comentarios de los estudiantes abre nuevas posibilidades para la mejora continua de la calidad de la docencia.

El presente artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 2 se detalla la metodología empírica, que se compone de 3 etapas: (1) preparación y segmentación de los datos; (2) modelado temático; y (3) análisis de prevalencia temática. La sección 3 presenta los principales resultados y la discusión. Finalmente, la sección 5 presenta las principales conclusiones del estudio y sus implicaciones para la evaluación y el desarrollo docente en la educación superior.

Metodología

Esta investigación adopta un enfoque mixto que combina métodos cuantitativos (segmentación y modelado temático) y cualitativos (interpretación de los comentarios de los estudiantes), dentro de un diseño exploratorio que busca descubrir patrones temáticos en los comentarios positivos emitidos por estudiantes hacia docentes con desempeño destacado. Para esto, se desarrolló una metodología empírica de tres etapas: (1) la preparación y segmentación

de los datos, (2) el modelado temático y (3) el análisis de prevalencia temática e interpretación contextual. En la Figura 1 se presenta visualmente este proceso metodológico.



Etapas de la metodología empírica

Etapas de la metodología empírica

Recolección de datos

Los datos utilizados para este trabajo corresponden al proceso de evaluación docente realizado en las 12 facultades de la Universidad de Cuenca, específicamente los datos del componente de heteroevaluación (evaluación que realizan los estudiantes a sus docentes). El conjunto de datos utilizado pertenece al periodo lectivo septiembre 2024-febrero 2025 y está conformado por 1891 registros de evaluación; cada uno de estos corresponde a una asignatura evaluada por los estudiantes. Esto implica que un mismo docente puede estar representado en más de un registro en el caso de que imparta distintas asignaturas. Esta decisión metodológica permite considerar el desempeño docente de forma contextualizada por asignatura, ya que un docente puede mostrar fortalezas en determinadas materias o niveles, pero no necesariamente en todas.

Tabla 1
Resumen de las variables utilizadas en el estudio

VARIABLE	TIPO DE DATO	DESCRIPCIÓN
docente_id	Cualitativa nominal	Identificador anónimo único asignado a cada docente evaluado en una o más asignaturas.
facultad	Cualitativa nominal	Facultad a la que pertenece la asignatura evaluada.
carrera	Cualitativa nominal	Carrera en la que se imparte la asignatura evaluada.
asignatura	Cualitativa nominal	Nombre de la materia evaluada por los estudiantes. Un docente puede tener varias asignaturas.
nivel	Cualitativa ordinal	Nivel académico correspondiente al ciclo en el que se dicta la asignatura, codificado del 1 al 10 (de primer a décimo ciclo).
numero_evaluadores	Cuantitativa discreta	Total de estudiantes que completaron la evaluación docente para un registro determinado.
nota_heteroevaluacion	Cuantitativa continua	Promedio obtenido por el docente en la evaluación estudiantil (sobre 40 puntos).
comentarios_destaca	Cualitativa textual	Texto libre escrito por los estudiantes en una pregunta abierta del instrumento de evaluación. Contiene los comentarios por asignatura sobre lo que destaca del docente.
comentarios_mejorar	Cualitativa textual	Texto libre escrito por los estudiantes en una pregunta abierta del instrumento de evaluación. Contiene los comentarios por asignatura sobre lo que el docente debería mejorar.

Dentro de este conjunto de datos, se recopilaron 89281 comentarios abiertos emitidos por los estudiantes en respuesta al apartado cualitativo del instrumento de evaluación aplicado. Estos comentarios conforman el corpus sobre el cual se aplicaron las técnicas de análisis de sentimiento y modelado temático. Para este estudio se consideraron variables de tipo cualitativo y cuantitativo, que se describen en la Tabla 1.

Todos los datos fueron anonimizados antes del análisis y provienen del proceso regular de evaluación docente de la Universidad de Cuenca. No se utilizó información personal de los docentes ni de los estudiantes, por lo que no fue necesario obtener consentimiento adicional para su uso con fines de este trabajo.

Preprocesamiento básico del dataset

Se realizó un proceso de limpieza y estructuración del dataset con el fin de garantizar la integridad y coherencia de los datos. Se filtraron los registros que no contenían comentarios en ninguna de las dos categorías cualitativas (“lo que destaca del docente” y “lo que el docente debería mejorar”), conservando solamente los registros con contenido suficiente para el análisis.

En cuanto al tratamiento de los comentarios, estos fueron obtenidos originalmente como cadenas concatenadas separadas por el carácter “|”. Cada comentario fue desagregado y etiquetado con los prefijos "Destaca:" o "Debe mejorar:", según la sección del formulario de donde proviene. Finalmente, se integraron en una sola columna ambos tipos de comentarios que se utilizaron para el siguiente paso del análisis de sentimientos. La incorporación de estos prefijos responde a la necesidad de mantener la intención de los comentarios emitidos por los estudiantes, ya que es frecuente que se utilicen términos idénticos con sentidos opuestos según la sección donde se respondan. Esta decisión se basa en el enfoque de análisis de sentimiento contextual planteado por Muhammad et al. (2016), donde se demuestra que identificar correctamente la polaridad de un texto es más preciso cuando se incluye información adicional que ayude a entender el contexto en el que se escribió.

Cálculo del indicador de desempeño compuesto

En el contexto de la evaluación docente, suele ser insuficiente considerar solamente las calificaciones numéricas que resultan de las valoraciones estudiantiles para capturar el desempeño docente. Estas valoraciones de los estudiantes comprenden dimensiones tanto cuantitativas como cualitativas, que deben integrarse para lograr una visión más completa y significativa (Hu et al., 2022). En este sentido, como parte de la metodología, se planteó la construcción de un índice de desempeño compuesto, que combine la calificación promedio otorgada por los estudiantes, la polaridad semántica de los comentarios abiertos y el número de evaluadores por asignatura. Este enfoque responde a la necesidad de interpretar la evaluación más allá de indicadores unidimensionales, permitiendo capturar aspectos no visibles en los promedios numéricos, como la percepción emocional del estudiante o la participación en el proceso evaluativo.

El propósito de este índice es identificar a los docentes que presentan un desempeño sobresaliente desde la percepción estudiantil. Esta identificación permite seleccionar un grupo de referencia sobre el cual aplicar el análisis para reconocer patrones asociados a buenas prácticas docentes que son valoradas por los estudiantes. Este puntaje de desempeño compuesto considera tres variables fundamentales:

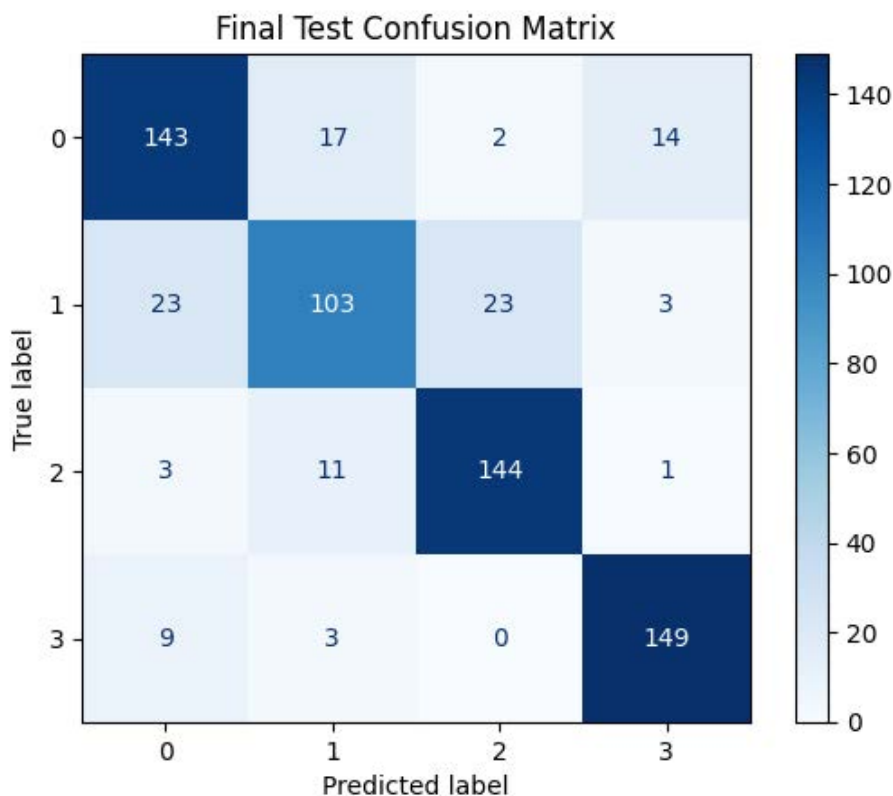
- Nota de heteroevaluación (N_c): Corresponde a la calificación promedio otorgada por los estudiantes a cada docente en una asignatura específica. Dado que la nota

original se encuentra en una escala de 0 a 40, se transformó a una escala de 0 a 100 mediante una regla de tres simple.

- **Calificación de sentimiento (Sc):** Se obtuvo mediante un modelo de tipo BERT (RoBERTuito) previamente ajustado (*fine-tuned*) con un corpus de comentarios etiquetados con los prefijos “Destaca:” y “Debe mejorar:”. La elección de este modelo se justifica por su capacidad para capturar la semántica de las palabras en su contexto, lo que es crucial para el análisis de sentimientos en textos cortos como los comentarios de estudiantes (Prottasha et al., 2022). El modelo clasifica cada comentario en una de cuatro categorías: positivo, neutral, negativo o alerta, y asigna ponderaciones específicas a cada una. Para entrenar y validar el rendimiento del modelo de clasificación utilizado para la obtención del S_c, se empleó un conjunto de 3244 comentarios etiquetados manualmente. A fin de garantizar la robustez del modelo, se aplicó una estrategia de validación cruzada con k-fold (k=5), dividiendo aleatoriamente los datos en cinco subconjuntos para entrenamiento y prueba. El modelo alcanzó un *accuracy* del 85 % y un F1-score del 83 %, lo cual evidencia un buen desempeño en la clasificación de sentimientos en textos cortos. En la Figura 2 se presenta la matriz de confusión del modelo, que permite visualizar el nivel de acierto en cada una de las categorías: positivo, neutral, negativo y alerta. A partir de esta clasificación se construyó un score ponderado de sentimiento, que también fue transformado a una escala de 0 a 100. Esta transformación de una variable textual en una variable continua es especialmente útil para captar la intensidad emocional expresada en textos cortos, como los comentarios que dejan los estudiantes en las evaluaciones docentes (Wankmüller et al., 2021).

Figura 2

Matriz de confusión del modelo RoBERTuito para clasificación de sentimientos



- Número de evaluadores (E_n): como medida indirecta del grado de consenso, esta variable fue transformada mediante logaritmo base 10 y posteriormente normalizada a una escala de 0 a 100 utilizando la técnica de *min-max scaling*, con el fin de reducir la asimetría propia de su distribución, de forma que su influencia en el índice fuera comparable con las demás dimensiones.

La integración de estas tres variables se resume en la Figura 3, donde se presenta gráficamente la estructura del puntaje de desempeño compuesto ($PD_{DOCENTE}$) y sus componentes. La formulación matemática del puntaje es la siguiente:

$$PD_{docente} = 0,4 \cdot N_c + 0,4 \cdot S_c + 0,2 \cdot E_n$$

Figura 3

Componentes y fórmula del puntaje de desempeño compuesto

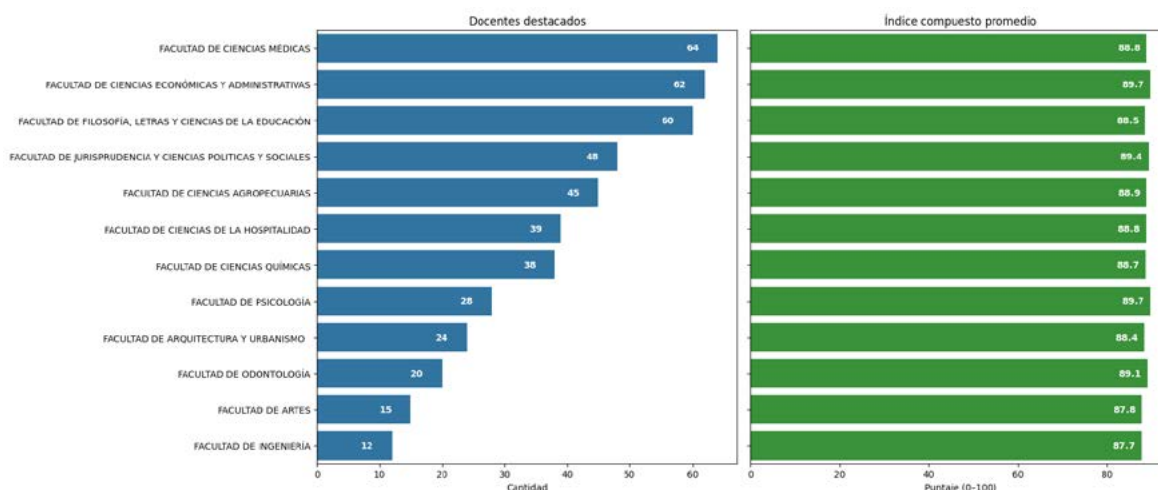
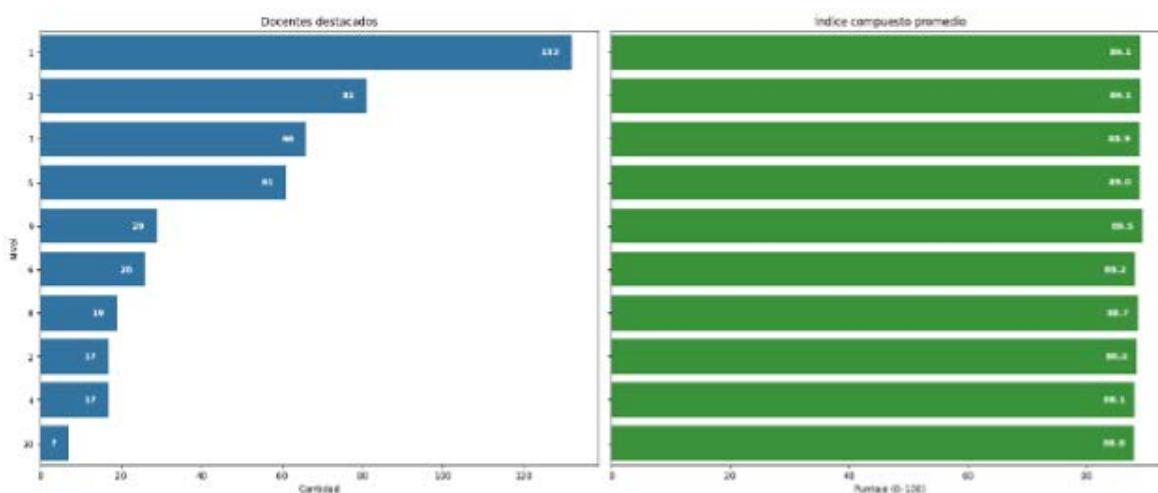


La forma en que se distribuyen los pesos en la fórmula responde a dos criterios principales. Por un lado, se buscó dar la misma importancia a la calificación numérica y al análisis de sentimiento, ya que ambos reflejan dimensiones complementarias del desempeño docente. Por otro lado, se decidió incluir el número de evaluadores con un peso menor, pero significativo, reconociendo que un mayor número de estudiantes aporta mayor confiabilidad a los resultados. Esta decisión está respaldada por estudios que destacan la necesidad de considerar la cantidad de respuestas para asegurar que las valoraciones sean representativas y estables (Spooren et al., 2013).

Segmentación de docentes con desempeño sobresaliente

Una vez calculado el puntaje compuesto de desempeño, se procedió a segmentar a los docentes considerando el cuartil superior de este indicador. De esta manera, se pudo identificar un subconjunto de 455 registros, correspondientes a 334 docentes únicos que presentan un desempeño sobresaliente. La elección del cuartil superior permite trabajar con un subconjunto representativo que concentra a los perfiles mejor valorados desde la percepción estudiantil, y sobre el cual se aplicará el análisis temático posterior.

La distribución de estos registros por facultad se presenta en la Figura 4. En ella se observa, por un lado, la cantidad de docentes destacados en cada unidad académica, y por otro, el promedio del índice de desempeño compuesto para los casos identificados. De forma complementaria, la Figura 5 muestra la misma información desagregada por nivel académico, que resulta útil para contextualizar el análisis posterior sobre patrones temáticos.

Figura 4*Distribución de docentes destacados y promedio del índice de desempeño por facultad***Figura 5***Distribución de docentes destacados y promedio del índice de desempeño por nivel*

Etapas 2: Modelado temático

Análisis de sentimiento y filtrado del corpus

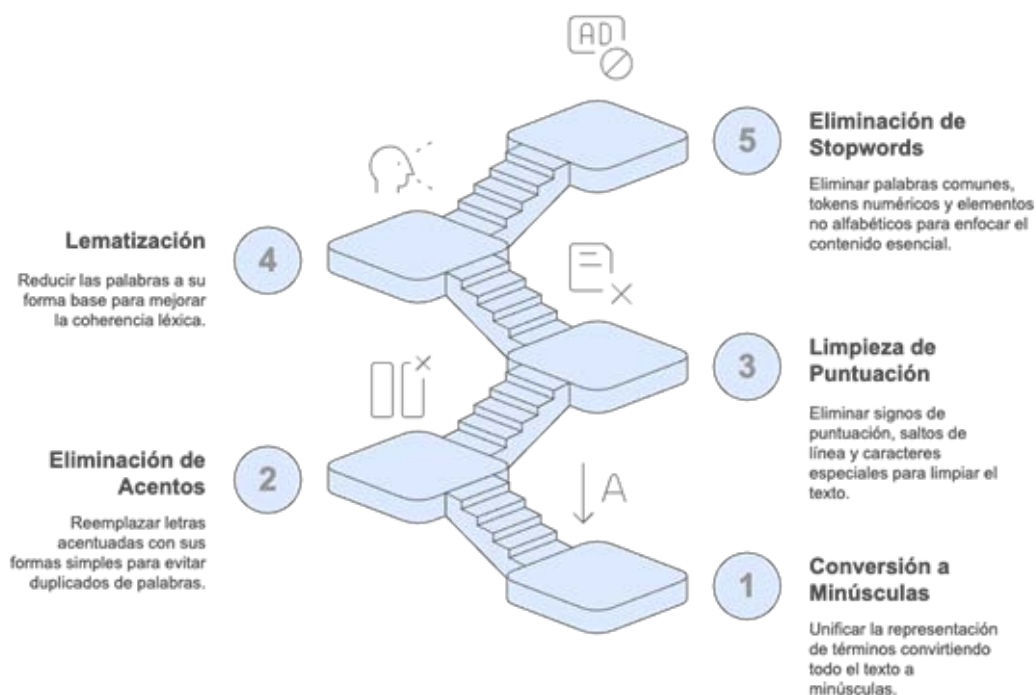
En esta etapa, se definió el subconjunto de comentarios sobre el que se aplicaría el modelado temático. Considerando que el objetivo del estudio es identificar buenas prácticas docentes reconocidas por los estudiantes, se optó por trabajar exclusivamente con los comentarios clasificados como positivos por el modelo de análisis de sentimiento, es decir, aquellos que expresan valoraciones favorables hacia el desempeño del docente.

Este filtro se aplicó a los registros pertenecientes al cuartil superior del índice de desempeño compuesto, lo que permitió obtener un total de 19240 comentarios positivos que conforman el corpus final de análisis. Esta selección permite enfocar el modelado en expresiones directamente vinculadas con aspectos reconocidos como buenas prácticas por parte de los estudiantes, reduciendo así la presencia de ruido derivado de comentarios neutros o negativos. El conjunto resultante constituye una muestra textual coherente con los objetivos del estudio, sobre la cual se aplicarán los procesos de preprocesamiento lingüístico y modelado temático descritos en los pasos siguientes.

Preprocesamiento lingüístico

Antes de aplicar el modelado temático, se llevó a cabo un proceso de limpieza y normalización de los comentarios positivos, con el objetivo de reducir el ruido textual y asegurar la coherencia léxica en el corpus. Este procesamiento se implementó en Python, utilizando expresiones regulares y la biblioteca spaCy con el modelo en español es_core_news_md. Las transformaciones aplicadas se resumen en la Figura 6.

Figura 6
Etapas del preprocesamiento lingüístico del corpus



Entrenamiento del modelo STM

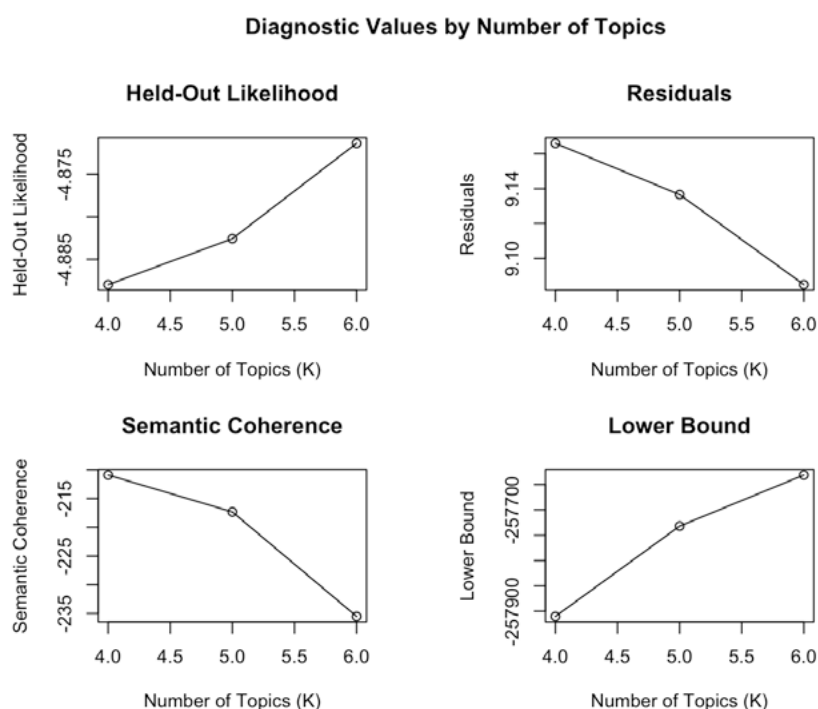
Para identificar los patrones temáticos presentes en los comentarios positivos emitidos por los estudiantes, se utilizó el modelo Structural Topic Model (STM) propuesto por Roberts et al. (2014). Este enfoque permite identificar temas latentes en textos, tomando en cuenta información adicional de los documentos como variables explicativas, lo que facilita explorar cómo varía la prevalencia de los tópicos según características contextuales. A diferencia de otros métodos como LDA (Latent Dirichlet Allocation), el STM permite estimar directamente los efectos de variables externas sobre la distribución temática de cada documento, lo que lo hace especialmente útil para estudios en ciencias sociales y educación.

El modelo se entrenó en R utilizando la librería stm (Roberts et al., 2019), con el corpus previamente procesado y representado mediante los objetos documents, vocab y meta. El preprocesamiento del texto, que incluyó la tokenización y la aplicación de umbrales de frecuencia para palabras raras, se realizó de manera automática por las funciones integradas en este paquete. Este proceso asegura la rigurosidad y la calidad de los datos de entrada al modelo, y concentra el análisis en palabras con suficiente representatividad. La estimación se realizó con el método de inicialización Spectral, recomendado por los autores del modelo para facilitar la convergencia y mejorar la estabilidad de los temas generados. En la fórmula de prevalencia se incluyeron dos covariables: facultad y nivel.

Se evaluaron modelos con 4, 5 y 6 temas (K) con base en métricas cuantitativas como la Held-Out Likelihood, residuos y convergencia. Si bien los resultados (ilustrados en la Figura 7) mostraron diferencias marginales entre las configuraciones, la literatura reciente señala que la selección del número óptimo de tópicos no puede basarse exclusivamente en métricas cuantitativas (Hayat et al., 2024). Un modelo puede mostrar métricas ligeramente superiores, pero su interpretabilidad y relevancia contextual pueden ser bajas. Por ello, se consideró necesario complementar este análisis con una validación cualitativa más detallada, abordada en la siguiente sección.

Figura 7

Métricas de diagnóstico para la selección del número óptimo de temas (K) en el modelo STM



Validación cualitativa

Una vez entrenados los modelos con diferentes cantidades de temas, se procedió a realizar una validación cualitativa para determinar cuál de las configuraciones generadas ofrecía una mayor coherencia semántica y claridad interpretativa, un criterio considerado fundamental en el modelado de temas (Hayat et al., 2024). Esta revisión se centró en analizar las palabras clave asociadas a cada tema, así como ejemplos representativos de comentarios asignados a cada uno.

La validación fue realizada por una experta en educación superior, con experiencia en evaluación docente y análisis cualitativo. Su revisión consideró tres criterios principales: qué tan bien se entendía cada tema a partir de sus palabras clave, si los temas estaban claramente diferenciados entre sí, y si los comentarios asignados a cada tópico realmente reflejaban lo que sugerían esas palabras.

Aunque los modelos con 5 y 6 temas presentaban ventajas cuantitativas, la revisión cualitativa reveló que esos modelos generaban temas con mayor solapamiento, menor claridad semántica y una división forzada de tópicos que dificultaba su interpretación. Por el contrario, la configuración con $K = 4$ ofrecía una mejor coherencia conceptual, diferenciación clara entre

tópicos y relevancia directa respecto al objetivo del estudio. Esta validación sustentó la adopción del modelo con $K = 4$ como base para el posterior proceso de etiquetado e interpretación de los temas.

Etiquetado de temas

Una vez seleccionado el modelo STM con cuatro tópicos, se realizó el proceso de interpretación de los resultados. Para cada tema, se revisaron las palabras clave con mayor exclusividad (FREX) y se leyeron comentarios representativos asignados por el modelo. A partir de esta revisión, se asignó un nombre que resume de forma clara la idea principal de cada grupo de comentarios, tal como se sugiere en el enfoque propuesto por Roberts et al. (2014).

En la Tabla 2 se presentan los cuatro temas identificados, junto con sus palabras clave más relevantes y un ejemplo de comentario real para cada uno. Estos temas servirán como base para los análisis posteriores por facultad y nivel.

Tabla 2
Temas identificados mediante STM

TÓPICO	NOMBRE ASIGNADO	PALABRAS CLAVE (FREX)	COMENTARIO REPRESENTATIVO
T1	Gestión Comunicativa	lenguaje, actividad, organización, dinámica, creatividad, impartir, interactivo	“El docente destaca en su expresión corporal y su lenguaje, a la hora de impartir su clase y su manera llamativa de interactuar con el grupo”.
T2	Metodología de Enseñanza	método, contenido, explicación, claridad, teórico, dinámico, metodología	“Destaca la aplicación de metodologías dinámicas y participativas que fomentan el aprendizaje significativo, el pensamiento crítico y la resolución de problemas”.
T3	Conocimiento Disciplinar	amplio, explicar, comprensión, claro, dedicación, excelente, tema, área, retroalimentación	“El docente demuestra un alto nivel de conocimiento en la asignatura y explica los temas de manera clara y organizada”.
T4	Habilidades Socioemocionales	manejo, ambiente, ejemplo, despertar, profesor, momento, forma, fácil	“Comprensiva y paciente, siempre con críticas constructivas que me ayudan a mejorar”.

Etapa 3: Análisis de prevalencia temática

Estimación de efectos marginales

Después de etiquetar los temas obtenidos con el modelo STM, se estimó cómo varía la presencia de cada tópico en función de dos variables contextuales: la facultad y el nivel académico de la asignatura evaluada. Esto permitió analizar si las prácticas valoradas por los estudiantes, que fueron identificadas en el modelo tienden a aparecer con más frecuencia en algunas facultades o en determinados ciclos formativos.

Para este análisis se utilizó la función `estimateEffect()` del paquete `stm` en R, que permite modelar la relación entre los temas generados y las covariables incluidas en la fórmula de prevalencia. En este caso, se trabajó con facultad y nivel, variables que representan el contexto institucional y formativo en el que se imparten las clases. La elección de estas covariables se basa en evidencia que muestra que las percepciones estudiantiles pueden variar según la unidad académica, por diferencias disciplinares (Marsh, 2007), así como por el momento formativo del estudiante, ya que sus expectativas y valoraciones tienden a cambiar conforme avanza en la carrera (Chen y Hoshower, 2003).

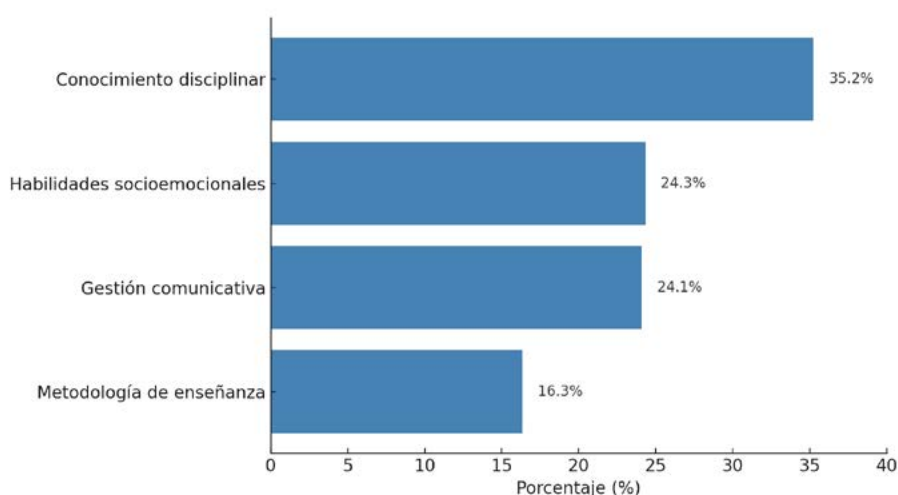
Resultados y Discusión

Esta sección presenta los resultados obtenidos a partir del análisis temático de los comentarios positivos emitidos por los estudiantes a los docentes con mejor desempeño, según

el índice compuesto calculado. El objetivo es identificar patrones discursivos que revelen buenas prácticas docentes valoradas por los estudiantes. A continuación, se describe la distribución general de los temas extraídos por el modelo STM, y luego se analiza su prevalencia según dos variables contextuales: facultad y nivel académico.

El análisis temático permitió identificar cuatro grandes categorías recurrentes en los comentarios positivos de los estudiantes hacia docentes destacados. La Figura 8 presenta la distribución de estos temas según su frecuencia media en el corpus. El tema más representado fue conocimiento disciplinar (35,2 %), seguido de habilidades socioemocionales (24,3 %) y gestión comunicativa (24,1 %). En menor proporción, aunque aún relevante, se identificó la metodología de enseñanza, con un 16,3 % de aparición promedio en los documentos. Esta primera aproximación muestra que los estudiantes tienden a valorar con mayor frecuencia el dominio del contenido por parte del docente, pero también reconocen aspectos actitudinales y comunicativos en sus valoraciones positivas.

Figura 8
Frecuencia de aparición de los temas identificados



La Figura 9 muestra cómo varían los temas identificados en los comentarios positivos según la facultad de la Universidad de Cuenca. En términos generales, el conocimiento disciplinar predomina notablemente y alcanza su máxima presencia en la Facultad de Odontología (38,9 %), seguida por Ciencias de la Hospitalidad (38,4 %) e Ingeniería (37,7 %), indicando una fuerte apreciación estudiantil por el dominio conceptual y técnico en estas áreas. Por otro lado, la facultad con menor valoración en este aspecto es Artes (27,0 %).

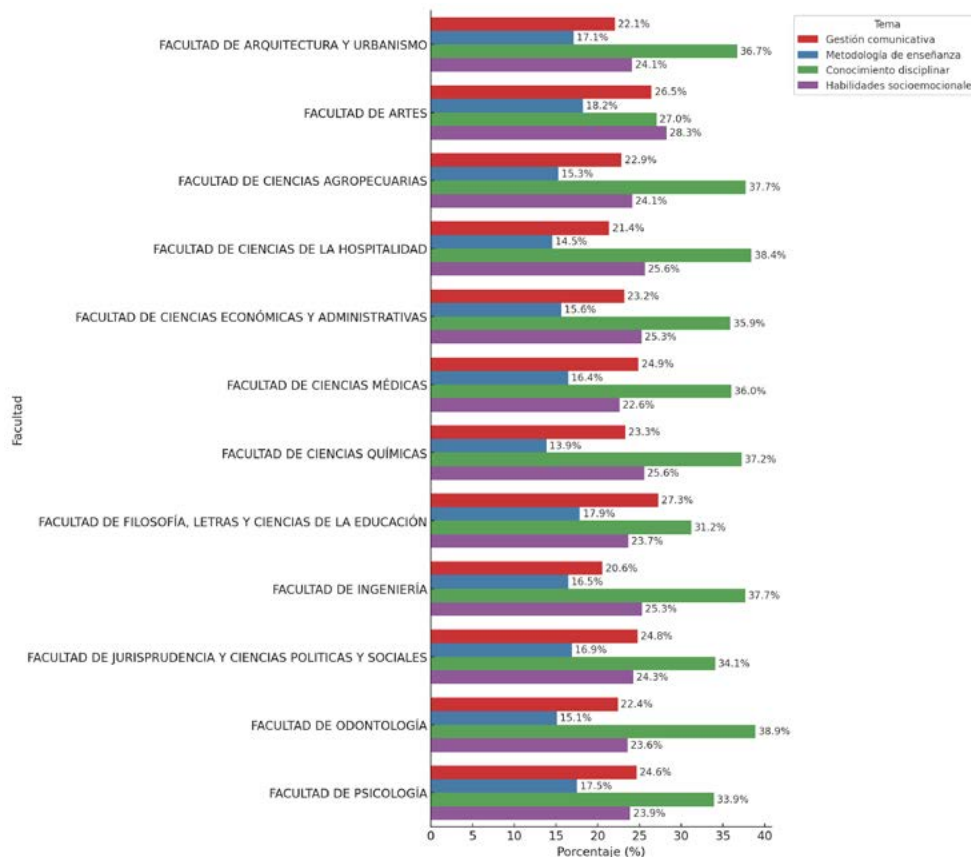
En contraste, las habilidades socioemocionales muestran una presencia significativa en facultades de carácter más humanístico y social, destacando especialmente en Psicología (23,9 %) y Arquitectura y Urbanismo (22,1 %), mientras que su representación más baja aparece en Ciencias Químicas (13,9 %).

Respecto a la gestión comunicativa, esta dimensión destaca particularmente en Artes (26,5 %), Arquitectura y Urbanismo (24,1 %) y Ciencias Médicas (22,6 %), lo que refleja una alta valoración hacia la claridad, interacción y empatía comunicativa por parte de los docentes en dichas áreas. Su representación más limitada se observa en Ciencias Agropecuarias (15,3 %) y Ciencias Económicas y Administrativas (15,6 %).

Finalmente, la dimensión de metodología de enseñanza, aunque presenta una menor prevalencia en general, alcanza un valor máximo en Filosofía, Letras y Ciencias de la Educación (27,3 %), resaltando la importancia que adquiere la estructura y dinámica pedagógica en esta facultad. En contraste, Arquitectura y Urbanismo muestra el mínimo valor para esta dimensión (17,1 %).

Estas diferencias ilustran claramente cómo la valoración estudiantil sobre las prácticas docentes varía según el contexto disciplinar, subrayando la importancia de considerar estas particularidades en la interpretación y aplicación de resultados de evaluación docente.

Figura 9
Frecuencia media estimada de los temas por facultad



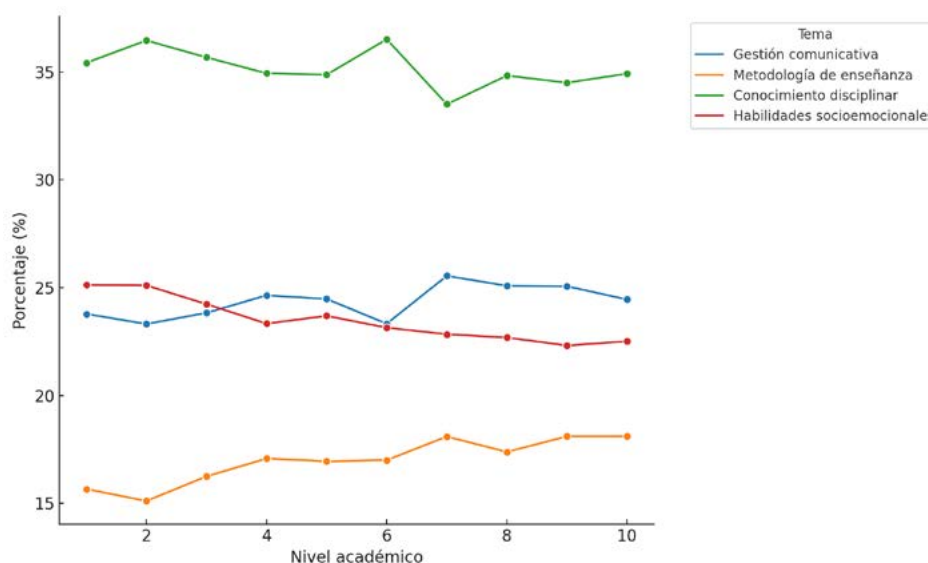
La Figura 10 presenta la evolución porcentual de los temas identificados en los comentarios positivos a lo largo de los diferentes niveles académicos. El conocimiento disciplinar se mantiene consistentemente como el más frecuente en todos los niveles, registrando valores cercanos al 35 %, aunque muestra una leve disminución hacia los niveles superiores. Esto podría indicar que, aunque la solidez conceptual y técnica sigue siendo prioritaria, otros aspectos cobran más relevancia conforme avanzan los estudiantes en su formación.

En contraste, la gestión comunicativa y las habilidades socioemocionales muestran una tendencia ligeramente ascendente a medida que aumentan los niveles académicos. En particular, la gestión comunicativa se consolida claramente por encima del 25 % a partir del nivel 5, destacando la importancia que adquieren las capacidades de interacción y comunicación efectiva del profesorado en etapas académicas avanzadas. Por su parte, las habilidades socioemocionales presentan un leve repunte en los niveles superiores, sugiriendo que los estudiantes valoran crecientemente la empatía y el apoyo emocional conforme avanzan en sus estudios.

Finalmente, la metodología de enseñanza se mantiene relativamente estable, con porcentajes en torno al 15-18 % en todos los ciclos académicos, constituyendo el tema menos frecuente a lo largo del recorrido formativo analizado. Esto podría reflejar que, aunque la metodología didáctica es apreciada, los estudiantes asignan consistentemente mayor peso a otros aspectos relacionados directamente con el contenido y la interacción docente-estudiante.

Estos resultados sugieren que, conforme avanzan en sus estudios, las prioridades de los estudiantes experimentan cambios sutiles pero relevantes, destacando progresivamente aspectos relacionales y comunicativos del proceso formativo, además del continuo énfasis en la claridad conceptual.

Figura 10
Proporción media de los temas por nivel



Al observar la distribución de los temas por área académica, se evidencian diferencias asociadas al enfoque de formación. En carreras técnicas y aplicadas, predominan valoraciones relacionadas con el conocimiento disciplinar, mientras que en áreas de salud, educación y ciencias sociales emergen con mayor frecuencia comentarios sobre habilidades comunicativas y relacionales. En cuanto al nivel académico, se observó que la proporción de comentarios asociados a Gestión comunicativa tiende a incrementarse levemente en los ciclos superiores, mientras que las Habilidades socioemocionales presentan una ligera disminución. Esto sugiere que, conforme avanzan en su formación, los estudiantes podrían valorar más la capacidad del docente para sostener una comunicación clara y estructurada que aspectos de tipo empático o relacional.

Conclusiones

El estudio ha demostrado con éxito la eficacia de la metodología empírica, al combinar análisis cualitativos y cuantitativos mediante técnicas avanzadas de procesamiento de lenguaje natural para comprender las percepciones estudiantiles sobre las prácticas docentes. Las cuatro dimensiones identificadas —conocimiento disciplinar, gestión comunicativa, habilidades socioemocionales y metodología de enseñanza— destacan aspectos críticos de la docencia valorados por los estudiantes. Particularmente, el predominio del conocimiento disciplinar en la mayoría de las facultades subraya la importancia continua de un sólido dominio del contenido,

mientras que las variaciones en el énfasis sobre aspectos socioemocionales y comunicativos reflejan expectativas diferenciadas según el contexto disciplinar y la progresión académica.

A pesar de la solidez de la metodología utilizada, este estudio presenta ciertas limitaciones. Primero, el análisis se restringió a comentarios positivos de estudiantes que evaluaron a docentes altamente calificados, lo que podría dejar fuera percepciones valiosas presentes en comentarios neutros o negativos. En segundo lugar, la generalización contextual podría verse limitada dado que los hallazgos corresponden a una única institución y a un periodo temporal específico (2024–2025).

Investigaciones futuras deberían ampliar el análisis para incluir comentarios con distintos niveles de sentimiento, permitiendo una comprensión más integral tanto de fortalezas como de áreas de mejora. Además, estudios comparativos entre diversas instituciones y a lo largo de periodos más extendidos enriquecerían la generalizabilidad y robustez de los resultados obtenidos. Finalmente, explorar análisis longitudinales podría revelar tendencias a largo plazo, brindando perspectivas valiosas sobre la evolución de las percepciones estudiantiles y la efectividad institucional de las iniciativas de desarrollo profesional docente.

Reconocimientos y Declaraciones

Este artículo recibió el apoyo de la Vicerrectoría Académica de la Universidad de Cuenca y la Dirección de Innovación Educativa.

Este trabajo forma parte de una investigación realizada por la Dirección de Innovación Educativa de la Universidad de Cuenca.

Los autores desean expresar su agradecimiento a la Universidad de Cuenca, al Vicerrectorado Académico y a la Dirección de Innovación Educativa por el apoyo institucional brindado para el desarrollo de la presente investigación.

En cuanto a la contribución de los autores, siguiendo la taxonomía CRediT se declara que la participación ha sido equitativa en todas las fases del trabajo.

Asimismo, los autores manifiestan que, en la elaboración de este artículo, se han utilizado herramientas de inteligencia artificial como apoyo al proceso de investigación y redacción. En particular:

- Consensus, para la búsqueda y análisis de literatura científica.
- Notebook LM, para la revisión, organización y síntesis de la información recolectada.
- ChatGPT-4o, para la redacción de las secciones de Introducción y Metodología.

Referencias

- Álvarez-Álvarez, C., Falcon, S. Students' preferences with university teaching practices: analysis of testimonials with artificial intelligence. *Education Tech Research Dev* 71, 1709–1724 (2023). <https://doi.org/10.1007/s11423-023-10239-8>
- Chen, Y., & Hoshower, L. B. (2003). Student evaluation of teaching effectiveness: An assessment of student perception and motivation. *Assessment & Evaluation in Higher Education*, 28(1), 71–88. <https://doi.org/10.1080/02602930301683>

- Gencoglu, B., Helms-Lorenz, M., Maulana, R., Jansen, E. P. W. A., & Gencoglu, O. (2023). Machine and expert judgments of student perceptions of teaching behavior in secondary education: Added value of topic modeling with big data. *Computers & Education*, 193, 104682. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104682>
- Hayat, F., Shatnawi, S., & Haig, E. (2024). Comparative analysis of topic modelling approaches on student feedback. En *Proceedings of the 16th International Joint Conference on Knowledge Discovery, Knowledge Engineering and Knowledge Management (KDIR2024)* (pp. 226-233). SciTePress. <https://doi.org/10.5220/0012890400003838>
- Hu, Y., Zhang, S., Sathy, V., Panter, A., & Bansal, M. (2022). SETSum: Summarization and Visualization of Student Evaluations of Teaching. En *Proceedings of the 2022 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies: System Demonstrations* (pp. 71–89). Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2022.naacl-demo.9>
- Marsh, H. W. (2007). Do university teachers become more effective with experience? A multilevel growth model of students' evaluations of teaching over 13 years. *Journal of Educational Psychology*, 99(4), 775–790. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.99.4.775>
- Muhammad, A., Wiratunga, N., & Lothian, R. (2016). Contextual sentiment analysis for social media genres. *Knowledge-Based Systems*, 108, 92–101. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.05.032>
- Prottasha, N. J., As Sami, A., Kowsher, M., Murad, S. A., Bairagi, A. K., Masud, M., & Baz, M. (2022). Transfer learning for sentiment analysis using BERT based supervised fine-tuning. *Sensors*, 22(11), 4157. <https://doi.org/10.3390/s22114157>
- Roberts, M. E., Stewart, B. M., & Airoidi, E. M. (2014). Structural topic models for open-ended survey responses. *American Journal of Political Science*, 58(4), 1064–1082. <https://doi.org/10.1111/ajps.12103>
- Roberts, M. E., Stewart, B. M., & Tingley, D. (2019). stm: An R package for structural topic models. *Journal of Statistical Software*, 91(2), 1–40. <https://doi.org/10.18637/jss.v091.i02>
- Spooren, P., Brockx, B., & Mortelmans, D. (2013). On the validity of student evaluation of teaching: The state of the art. *Review of Educational Research*, 83(4), 598–642. <https://doi.org/10.3102/0034654313496870>
- Sun, J., & Yan, L. (2023). Using topic modeling to understand comments in student evaluations of teaching. *Discover Education*, 2(25). <https://doi.org/10.1007/s44217-023-00051-0>
- Wankmüller, S., & Heumann, C. (2021). How to estimate continuous sentiments from texts using binary training data. En *Proceedings of the Conference on Natural Language Processing (KONVENS 2021)* (pp. 131–139). German Society for Computational Linguistics & Language Technology. <https://aclanthology.org/2021.konvens-1.16/>

Blockchain-based Application for a Sustainable University: Systematic Review and UCE-Camp Proposal for the Academic Processes of Higher Education Institutions

Aplicación basada en Blockchain para una Universidad Sostenible: Revisión Sistemática y Propuesta UCE-Camp para los Procesos Académicos de Educación Superior

Patricia Jimbo Santana¹ <https://orcid.org/0000-0001-7432-1622>, Mario Morales Morales¹ <https://orcid.org/0000-0002-7493-8072>, Mónica Jimbo Santana¹ <https://orcid.org/0000-0002-3948-9507>, Santiago Morales Cardoso¹ <https://orcid.org/0000-0002-3833-9654>, Silvio Alejandro Toscano Vizcaíno¹ <https://orcid.org/0000-0002-6571-5627>

¹Universidad Central del Ecuador, Quito, Ecuador
prjimbo@uce.edu.ec, mmoralesm@uce.edu.ec,
djimbo@uce.edu.ec, smorales@uce.edu.ec,
satoscano@uce.edu.ec



Esta obra está bajo una licencia internacional
Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0

Sent: 2025/06/16

Accepted: 2025/08/20

Published: 2025/10/15

Abstract

This study aims to evaluate the potential of blockchain technology in higher education, with a particular focus on its benefits and challenges in academic processes. A systematic literature review was conducted, analyzing 42 key studies selected from a total of 533 academic publications over the past six years. The results indicate that blockchain applications are primarily concentrated in secure certificate issuance, the enhancement of teaching and learning environments, and the transparent management of academic credits and scholarships. The main contribution of this research is the presentation of a comprehensive and up-to-date overview of blockchain integration in the educational domain. Furthermore, it introduces the UCE-Camp model as a sustainable framework designed to improve the efficiency, transparency, and quality of academic operations. The study also identifies existing gaps and challenges, outlining future research directions for the broader adoption of blockchain in higher education.

Keywords: blockchain, academic process, e-government, higher education, issuance of academic certificates, sustainability.

Summary: Introduction, Methodology, Results, Discussion and Conclusions.

How to cite: Jimbo, P., Morales, M., Jimbo, M., Morales, S. & Toscano, S. (2025). Blockchain-based Application for a Sustainable University: Systematic Review and UCE-Camp Proposal for the Academic Processes of Higher Education Institutions. *Revista Tecnológica - Espol*, 37(E1), 162-183. <https://doi.org/10.37815/rte.v37nE1.1339>

Resumen

Esta investigación tiene como objetivo analizar el potencial de la tecnología blockchain en la educación superior, enfocándose en sus beneficios y desafíos dentro de los procesos académicos. Se realizó una revisión sistemática de literatura, se examinaron 42 estudios relevantes seleccionados entre 533 publicaciones académicas de los últimos seis años. Los hallazgos revelan que las principales aplicaciones de blockchain se centran en la emisión segura de certificados, la mejora de los entornos de enseñanza-aprendizaje y la gestión transparente de créditos y becas. Como principal contribución, el estudio ofrece una visión integral y actualizada sobre el uso de blockchain en el ámbito educativo, y propone el modelo UCE-Camp como una solución sostenible para optimizar la eficiencia, transparencia y calidad de los procesos académicos. Además, se identifican brechas y desafíos que abren nuevas líneas de investigación para su implementación futura.

Palabras clave: cadenas de bloques, proceso académico, gobierno electrónico, educación superior, emisión de certificados académicos, sostenibilidad.

Introduction

Several studies on blockchain-based technology (BCT) have explored prototypes, case studies, and theoretical frameworks across diverse sectors, including supply chain management, business, healthcare, energy, utilities, e-government, Internet of Things (IoT), security and privacy, data management, and—importantly—education. These domains represent key research trends as identified by Casino, Dasaklis, & Patsakis (2019) and Higinio Mora et al. (2021).

In the educational sector, blockchain initiatives remain in an early developmental stage but hold significant potential to transform student information systems. The primary areas of application include certification management, credit and commission transfers, tracking of skills and learning outcomes, professional capability assessment, collaborative learning environments, digital tutoring, and evaluation processes (Rojas, Gayoso Martínez, & Queiruga-Dios, 2020). Additional use cases involve incentive-based learning programs and the verification of educational content authenticity.

The integration of blockchain in education —particularly through ePortfolios— has garnered increasing attention in academic literature. Trejo (2019) highlights that ePortfolios foster active learning and digital competence, while blockchain's decentralized and secure architecture enhances transparency and reliability in educational data management (Cortés, Pinto, & Atrio, 2015). Furthermore, blockchain facilitates interoperability among institutions, enabling seamless exchange of credentials and academic records.

Blockchain-based ePortfolios also address challenges in managing roles and resources within modern educational systems. Tinoco et al. (2023) demonstrate the utility of their approach in issuing and verifying academic credentials and communicating competencies. Blockchain emerges as a robust solution for secure information processing and storage, mitigating risks such as plagiarism and inefficient resource management.

Despite its promise, blockchain adoption in education faces notable limitations. Oyelere et al. (2020) report limited awareness and usage of blockchain within the academic community, indicating a lack of widespread understanding and adoption. Additionally, as an emerging and relatively untested technology, blockchain suffers from the absence of standardized frameworks, which may lead to security vulnerabilities, hacking risks, and unintended data exposure.

These limitations underscore the importance of adequate preparation and technological literacy to ensure successful implementation. Tinoco et al. (2023) identify key challenges in higher education that blockchain seeks to address, including credential verification—critical in combating academic fraud—and secure, permanent storage of academic records and learning achievements (Rivera-Vargas, 2020).

The significance of this study lies in its contribution to innovation and improvement of academic processes in higher education institutions (HEIs). It proposes a tailored model—UCE-Camp—that aligns with the specific needs and operational characteristics of universities, aiming to facilitate effective integration of blockchain. This technology offers distinct advantages that support institutional sustainability, such as enhanced security, transparency, and efficiency in data management.

To support this proposal, a systematic literature review was conducted, analyzing studies published between 2018 and 2024 that explore blockchain-based applications, methods, or frameworks within HEI-managed academic processes.

This paper provides a comprehensive overview of blockchain technology and its connection to academic processes, followed by a detailed explanation of the methodology applied in conducting a systematic literature review. The subsequent section presents the analysis of the reviewed literature and the results obtained. These findings are then discussed in light of the challenges that must be addressed to enable broader adoption of this technology within higher education institutions. Additionally, the UCE-Camp proposal is introduced as a sustainable model for the university. The paper concludes by summarizing the main insights and offering recommendations for future research.

Blockchain and Academic Processes

Blockchain, also known as distributed ledger technology, is recognized as a foundational innovation (Conti, Sandeep, Lal, & Ruj, 2018) that underpins the development of cryptocurrencies and virtual currencies by enabling data immutability and integrity (H. Mora, Morales-Morales, Pujol-López, & Mollá-Sirvent, 2021). It operates by storing electronic records in a distributed, immutable, and verifiable database accessible to all computers within the network—referred to as nodes—which are responsible for validating transactions and thereby replacing the function of a centralized authority (Mohan, 2019).

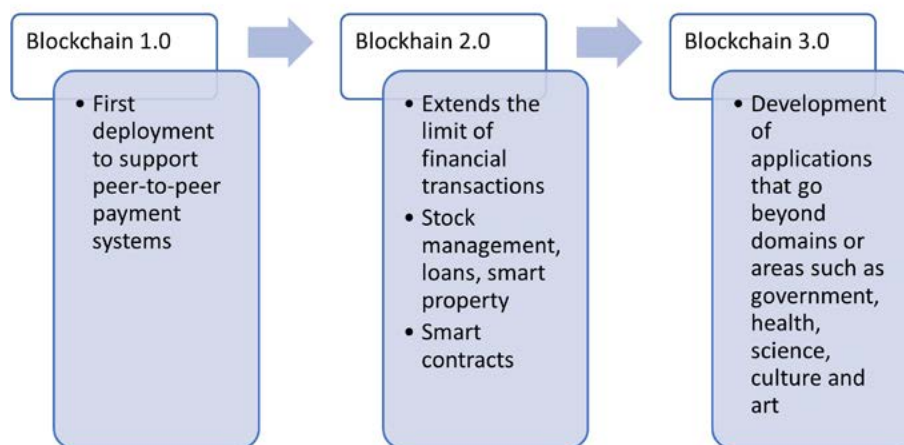
A notable feature of blockchain technology is its resistance to manipulation, as it eliminates the need for a central entity to authorize or restrict transactions (Swan, 2018). This decentralized structure addresses the issue of trust among market participants and ensures the integrity and transparency of transactions (Alnafrh & Mouselli, 2021).

Transactions are recorded chronologically in the ledger, and as the chain expands, the difficulty of falsification increases (Tahar, Hammi, Bellot, & Serhrouchni, 2018). Nodes aggregate transactions into blocks and validate their inclusion in the chain through consensus mechanisms—cryptographic algorithms designed to ensure agreement across the network (Zhang & Lee, 2020).

Blockchain platforms can be tailored to specific purposes through the integration of smart contracts, which are fundamental components that inherit the blockchain immutability. Smart contracts facilitate automatic execution of predefined instructions based on the logic agreed upon by participants, eliminating the need for trusted intermediaries (Lucas Palma, Gomes, Vigil, & Martina, 2019).

The evolution of blockchain technology has progressed through multiple stages, as illustrated by Alammery et al. (2019) and Chen, Xu, Lu, & Chen (2018) in Figure 1. At its most advanced stage, blockchain applications have been deployed across various sectors, including government, healthcare, and education.

Figure 1
Evolution of Blockchain Technology



Higher education is currently situated within a context of increasing internationalization and intense global competition, necessitating greater efficiency in institutional processes—particularly in the management of academic records (Van Damme, 2001). Within this framework, several challenges persist, including student authentication, credential verification, degree issuance, and the transfer of academic information across institutions. These issues often stem from paper-based systems, which introduce vulnerabilities such as susceptibility to manipulation, increased verification burdens, and a higher demand for human resources (Alnafrh & Mouselli, 2021). Higher education institutions (HEIs) frequently rely on physical documentation and centralized storage methods, rendering them vulnerable to fraud (Rane, Singh, Singh, & Amarsinh, 2020). Moreover, traditional systems exhibit limitations in terms of auditability and external verification (Badr, Rafferty, Mahmoud, Elgazzar, & Hung, 2019).

The rapid advancement of digital technologies has both amplified opportunities and increased risks. One notable concern is the increased ease with which academic fraud can be committed. In educational settings, it is possible to falsify student records, such as registering a course as completed when the requirements have not been met (Lutfiani, Apriani, Nabila, & Juniar, 2022). Document forgery—including academic records and certificates issued by HEIs—can negatively impact organizations that unknowingly admit individuals lacking the necessary qualifications (Rane et al., 2020). According to Forbes, fraudulent academic documentation is estimated to cause global damages of approximately USD 7 billion annually, underscoring the urgency for technological solutions. This context has accelerated interest in blockchain-based technology (BCT), which holds the potential to transform how universities manage academic resources (Rustemi, Dalipi, Atanasovski, & Risteski, 2023).

Given these challenges, universities must align their digital, institutional, and administrative infrastructures with emerging technologies. Several studies suggest that blockchain offers substantial benefits across various domains due to its inherent properties—immutability, fault tolerance, decentralization, and auditability (Turkanović, Hölbl, Košič, Heričko, & Kamišalić, 2018). Specifically, BCT can enhance fraud detection in academic institutions,

not only in certificate verification but across all academic records (Lutfiani et al., 2022). Its implementation may lead to improved educational outcomes, streamlined administrative procedures, and greater institutional transparency (Rustemi et al., 2023).

In the context of higher education, various blockchain-based solutions have been proposed. These will be examined in detail in the following section, which presents the findings of a systematic literature review conducted by the authors.

Methodology

This study addresses the set objectives through a systematic literature review, which involves a series of activities related to the identification, evaluation, and interpretation of a topic of interest, providing a framework for the research. To achieve this, the method proposed by Kitchenham (2014) define the following stages:

- Planning: Identify needs, define relevant databases, and determine key search terms.
- Execution: Determine inclusion/exclusion criteria and manually add relevant studies.
- Presentation: Summarize and present select studies.

During the planning phase, this research focused on two core concepts: blockchain and academic processes. These concepts were combined to form primary search keywords. The selected databases for the literature review included Google Scholar, ScienceDirect, IEEE Xplore, and arXiv.

The choice of these databases is justified by their complementary strengths and broad coverage across scientific and technical disciplines. Google Scholar provides a multidisciplinary search capability, enabling access to a wide range of academic sources, including peer-reviewed articles. Its citation tracking feature also facilitates the identification of influential and emerging works. ScienceDirect, managed by Elsevier—one of the world’s leading scientific publishers—offers access to high-quality, peer-reviewed research that is recognized within the academic community. IEEE Xplore is essential for engineering and technology-related studies, granting exclusive access to conference proceedings and publications from the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Lastly, arXiv serves as a repository for preprints, allowing early access to cutting-edge research prior to formal publication, which is critical for capturing the latest trends and developments.

In the execution phase, the criteria defined during the planning stage were systematically applied. The review process was structured through a series of iterations, incorporating inclusion and exclusion criteria as follows: (i) inclusion of journal articles and book chapters, (ii) screening of titles and abstracts, and (iii) full-text review of selected articles. Additionally, relevant studies were incorporated using the snowballing method as proposed by Wohlin (2014).

The limitations of this study include the restriction to English-language publications and the use of only four academic digital databases. Within these sources, only journal articles and book chapters published between 2018 and 2024 were considered. A summary of the applied criteria is presented schematically in Table 1.

Table 1
Inclusion/Exclusion Criteria

TYPE OF CRITERION	DESCRIPTION OF CRITERION
Inclusion	Search criteria: “blockchain” AND “Academic processes” “Higher education” AND “blockchain” “academic” AND “blockchain”
Inclusion	Journal articles and book chapter
Inclusion	Articles in English language only
Inclusion	Publications from 2018 to 2024
Exclusion	Abstract does not provide relevant information
Exclusion	Duplicate articles
Exclusion	Articles in another language

The search criteria for this systematic review were carefully defined to include key terms such as “blockchain,” “academic processes,” “higher education,” and “academic,” ensuring a focused and comprehensive exploration of blockchain’s role within the academic domain. This strategic approach enabled broad coverage of relevant literature published between 2018 and 2024. The rationale for conducting a systematic review of scientific articles lies in the rapid technological advancements in blockchain, its growing adoption in educational contexts, and the need to examine the most current trends shaping its implementation.

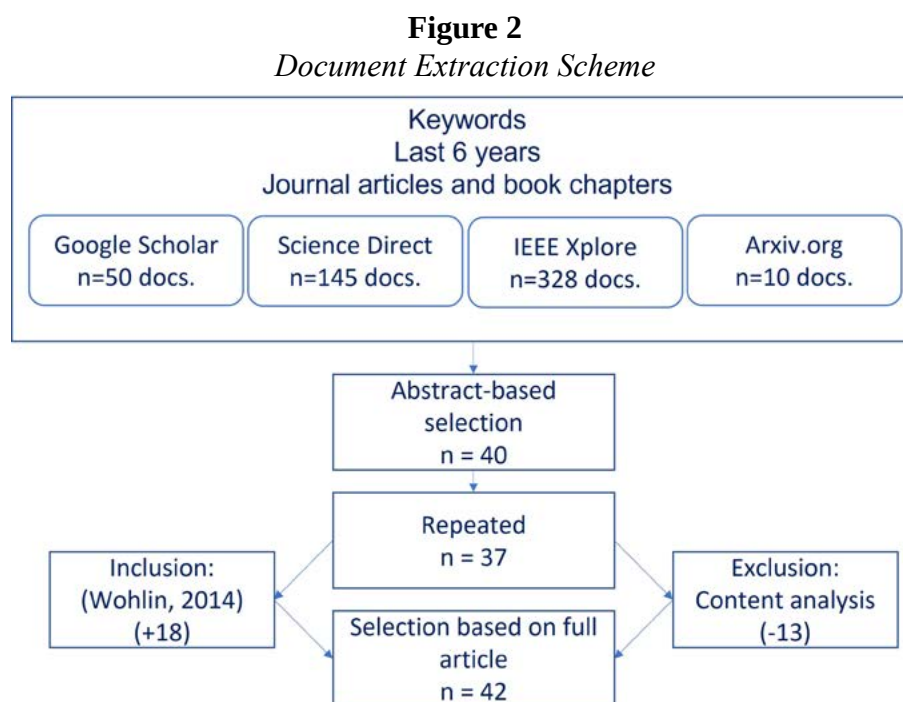
This methodology ensures that the proposed model is grounded in contemporary practices and knowledge, which are essential for the sustainable and autonomous management of higher education institutions. The review maintains its rigor and relevance by selecting only peer-reviewed journal articles and book chapters written in the English language. Non-relevant abstracts, duplicate entries, and non-English publications were excluded to preserve methodological integrity and avoid information overload or selection bias. The deliberate omission of additional search terms was intended to maintain the specificity of the review, ensuring that the research remains sharply aligned with its core objectives and is not diluted by peripheral data. This balance between inclusion and exclusion is critical to conducting a systematic review that is both thorough and impartial, effectively addressing the research questions without compromising clarity.

Furthermore, inclusion criteria were established for selecting studies, emphasizing thematic relevance, methodological rigor, recency, academic impact, and diversity of perspectives. These criteria ensure that the selected works make a meaningful contribution to the analysis of blockchain applications in higher education, providing a robust and representative foundation for the development of this study.

To guide the scope and direction of the research, a set of research questions was formulated in alignment with the study’s overarching objective. The following questions were defined:

- What relevant works and research have been conducted on blockchain applied in the academic and higher education field?
- What are the benefits and challenges associated with implementing blockchain in academic processes in higher education institutions?

Figure 2 illustrates the extraction process and the different results obtained in each iteration.



This methodological approach ensures that the selected studies are directly relevant to the intersection of blockchain technology and higher education, thereby upholding the quality and relevance of the review. The exclusion of duplicate entries and the restriction to recent, English-language publications from 2018 to 2024 enhance the timeliness and contextual accuracy of the sample. Additionally, the removal of non-relevant abstracts minimizes bias and prevents information overload.

Although the final sample size is relatively small, each article offers substantial contributions to the existing body of knowledge, enabling a comprehensive and up-to-date understanding of the topic. The representativeness of the selected studies ensures alignment with the research questions, resulting in a systematic review that is both methodologically sound and analytically robust. This facilitates a nuanced and meaningful examination of the literature.

In the presentation phase, the findings are synthesized and categorized according to the typology proposed by Alammary, Alhazmi, Almasri, & Gillani (2019). A detailed analysis of these results is provided in Section 4.

Literature Review

In this study, a total of 42 scientific articles and book chapters directly related to the proposed objectives have been analyzed. These research works describe concepts, case studies, or proposals related to Blockchain Technology (BCT) within academic contexts, especially in higher education institutions. Table 2 presents the most relevant findings of each study, classified according to the typology described by Alammary et al.(2019).

Table 2
Summary of relevant findings

TYPE OF STUDY	REFERENCE	RELEVANT FINDINGS
Academic qualifications management	(Awaji & Solaiman, 2022)	Describes a BCT-based system that generates a verifiable record of achievements of higher education students in a way that accelerates the authentication and validation process of such certificates.
Copyright management	(Mohan, 2019)	Proposes the use of a centralized blockchain (permissioned blockchain) that incorporates incentive structures for readers and reviewers in academia as a solution to mitigate misconduct in scientific production. It encompasses a reputation system and proof of value as fundamental components of the blockchain.
Learning Outcomes Management	(Nousias, Tsakalidis, Michoulis, Petridou, & Vergidis, 2022)	Designs a verification system called VerDe (Verified Degrees) based on BCT and BPMN technology, which enables secure registration of academic qualifications.
Evaluation of the professional capacity of the students	(Zhao, Liu, & Ma, 2019)	The research presents a study of a BCT-based system for assessing students' skills, using a clustering algorithm to analyze academic performance and other extracurricular achievements.
Support for lifelong learning	(Sharples & Domingue, 2016)	It proposes a blockchain-based registry to recognize intellectual effort and create a reputational reward system.
Fee and credit transfer management	(Srivastava et al., 2018)	It proposes a blockchain-based platform for the interaction of multiple HEIs (Higher Education Institutions) that allows the verification of certificates and academic credits, which can be transferred between different organizations through tokens.
Skills management	(Williams, 2019)	Envisions a scenario where universities will outsource parts of their course delivery and evaluation to remain competitive in a technology-driven environment motivated by blockchain.
Improving student interactions in e-learning	(Bdiwi, De Runz, Faiz, & Cherif, 2018)	Proposes a model based on a ubiquitous learning environment that delivers educational services on a blockchain platform, integrating this technology with IoT.
Protection of learning objects	(Hori et al., 2018)	Proposes a decentralized e-learning platform called CHiLO that utilizes e-books and other learning objects, is based on blockchain technology, uses virtual currencies, and considers copyright rights.
Obtaining digital guardianship consent	(Gilda & Mehrotra, 2018)	Proposes a more efficient data authorization framework based on blockchain technology (BCT) to manage permissions in a public school.
Rate and credit transfer management	(Asamoah et al., 2023)	The study proposes a platform based on BCT and crowdsourcing for student loans in which investors will be incorporated to provide funds to higher education students
Permissions and credentials management	(Tariq, Haq, & Ali, 2022)	Presents Cerberus, a prototype for BCT-based credential verification. Addresses real fraud scenarios and credential revocation through features like data privacy and transcript verification
Certificate management	(Alnafrah & Mouselli, 2021)	Proposes a blockchain scheme in an HEI using public and private keys for each student, through which they can access academic records that have been validated by the institution and can be accessed by any organization worldwide.
Certificate management	(Guerreiro, Ferreira, Fonseca, & Correia, 2022)	Integrates an open-source academic management system with a blockchain platform to record certificates and diplomas awarded by an HEI.
Certificate management	(Jaramillo & Piedra, 2020)	Proposes a BCT-based model for the registration of academic certifications. Identifies actors, processes, and components for implementation.
Certificate management	(Luis Palma, Vigil, Pereira, & Martina, 2019)	It implements a blockchain-based system for registering degrees and academic credits in the higher education system, utilizing the Brazilian Public Key Infrastructure (PKI).
Certificate management	(Morales-Morales, Rosero-Correa, & Morales-Cardoso, 2020)	Proposes a blockchain-based application that enables the replication of the degree registration process issued by a HEI without the need for a central verifying entity.
Certificate management	(Badr et al., 2019)	Proposes a model for the transfer and verification of tamper-proof academic records.
Certificate management	(Rane et al., 2020)	Conducts a research study to validate university certificates in local and international contexts.
Certificate management	(Lutfiani et al., 2022)	Proposes a certificate validation system based on blockchain technology with the purpose of preventing and/or detecting fraud in such academic documents.
Certificate management	(Rustemi et al., 2023)	Conduct a systematic study focused on academic certificate verification systems. Describes the most important challenges for its deployment and develops a taxonomy with its main themes.

TYPE OF STUDY	REFERENCE	RELEVANT FINDINGS
Certificate management	(Rasool et al., 2020)	Presents a prototype based on BCT and optical character recognition for the verification of academic degree titles and in this way generate efficiency in the mass presentation of degree records
Certificate management	(Le Van Tan, & Pham Minh Hung, 2024)	Proposes a blockchain-based system for managing academic certificates with QR code verification.
Certificate management	(Oluwaseyi, A, 2024)	Designs a blockchain-based system using Ethereum and IPFS to verify university certificates securely.
Literature review BCT in education	(Rojas et al., 2020)	Analyzes various fields of application of BCT within the education domain and describes interesting pilot projects conducted in educational institutions.
Literature review BCT in education	(Alammary et al., 2019)	Conducts a systematic review study that addresses BCT applications in the field of education and the benefits and challenges to be faced.
Literature review BCT in education	(Tahora, Saha, Sakib, Shahriar, & Haddad, 2023)	Through an SLR study, it evaluates the benefits of implementing BCT technology for management in higher education, analyzing limitations and challenges in the educational field.
Literature review BCT in education	(Zou, Meng, Zhang, Zhang, & Li, 2020)	Through a comprehensive study, it analyzes the current state of BCT academic research and its application scenarios. Recognizes the advantages and challenges of this technology and discusses future trends related to blockchain
Literature review BCT in education	(Ocheja, Agbo, Oyelere, Flanagan, & Ogata, 2022)	Conduct a qualitative bibliometric study. Highlights a temporal analysis, emerging themes and practical cases of adoption and integration with educational technologies
Literature review BCT in education	(Silaghi, D. L., & Popescu, D. E, 2024)	Conducts a systematic review of blockchain initiatives in higher education, comparing them to institutional best practices.
Literature review BCT in education	(Tahora, S., Saha, B., Sakib, N., Shahriar, H., & Haddad, H.2024))	Critically analyzes the benefits, challenges, and risks of using blockchain in the higher education ecosystem
Management of transfers and credits	(Bedi, Gole, Dhiman, & Gupta, 2020)	Describes a blockchain-based application that enables transparent and traceable management of scholarship applications awarded to students by a government school program in India.
Management of transfers and credits	(Turkanović et al., 2018)	Proposes a blockchain-based platform called EduCTX based on the European Credit Transfer and Accumulation System (ECTS).
Management of competences and learning results	(Lizcano, Lara, White, & Aljawameh, 2020)	It evaluates a decentralized model for transactional management of content, teaching, and assessed competencies involving different stakeholders such as students, instructors, and employers.
Management of competences and learning results	(Chen et al., 2018)	It describes some blockchain applications in the academic environment and proposes initiatives to improve or motivate teaching-learning environments.
Management of competences and learning results	(Jirgensons & Kapenieks, 2018)	It describes various models from countries within the European Union (EU) that enable the management and validation of students' skills and knowledge.
Management of competences and learning results	(Wu & Li, 2018)	Proposes a model for assessing operational skills in an e-commerce testing environment using a blockchain platform.
Management of competences and learning results	(Chaudhari, S., & Shirole, M., 2024)	Reviews how blockchain can enhance the management of academic records and learning outcomes in higher education.
Learning Outcomes Management	(Li & Ma, 2021)	Proposes a secure method for storing and sharing information from educational records with high efficiency, availability and privacy
Learning Outcomes Management	(Garg, 2023)	Proposes registering academic history on a BCT platform with validators in encrypted format
Rewarding / recognition of academic activities	(Ayman et al., 2023)	Presents the design of a decentralized BCT-based application that promotes knowledge sharing and encourages collaborative academic contribution through rewards in a higher education environment
Rewarding / recognition of academic activities	(Battah, Salah, Jayaraman, Yaqoob, & Khalil, 2023)	It proposes a solution based on BCT for the academic ranking of institutions that is based on transparency, traceability, trust and decentralization considering that currently there is weakness in indicators based on academic and employer reputation.

These findings are significant as they reflect the diversity and depth of blockchain technology's (BCT) application in the educational field. Each study contributes to a different aspect of how BCT can enhance, innovate, or solve existing problems in higher education.

Referring to studies on copyright management and certificate management, they demonstrate how BCT can increase transparency, security, and efficiency in the issuance and verification of academic credentials. It is crucial in a world where fast and reliable verification of qualifications is increasingly important for employers and educators. The proposal of a reputation system and proof-of-stake as fundamental components of the chain to mitigate misconduct in scientific production directly addresses the challenges of academic integrity.

Studies on learning outcome management and e-government process optimization illustrate BCT's potential to improve the administration and accessibility of academic records, as well as to integrate educational systems with governmental initiatives. BCT can play a significant role in standardizing and enhancing educational and governmental processes.

Furthermore, studies focusing on the assessment of students' professional competencies and the management of learning outcomes demonstrate how blockchain technology (BCT) can be effectively utilized to securely evaluate and record students' skills and achievements—an essential component for workforce development and lifelong learning. Each of these studies provides compelling evidence of BCT's potential to address specific challenges and enhance the quality and efficiency of higher education systems. The diversity of applications and the depth of analysis presented in these works establish a strong foundation for future research and technological advancement in this emerging field.

The systematic review of blockchain applications in higher education highlights both the innovations introduced and the challenges encountered. The strengths of the reviewed studies include the development of novel approaches for certificate issuance and intellectual property management, leveraging blockchain's secure and transparent architecture. However, notable limitations persist, including the lack of longitudinal research and barriers to large-scale adoption, such as institutional resistance to change and concerns related to ethics and data privacy.

This research builds upon the existing literature to offer a critical synthesis of current findings, identifying prevailing trends and research gaps. By doing so, it contributes to the broader academic discourse and directs future investigations toward underexplored areas, providing a comprehensive evaluation of blockchain's role in higher education.

As emphasized by Grech & Camilleri (2017), it is also important to recognize that the benefits of BCT are most pronounced in specific use cases where its implementation aligns with institutional needs. The applicability of blockchain is primarily determined by the fulfillment of key criteria, which are outlined in Table 3.

Table 3
Criteria for the application of BCT

CRITERION	DESCRIPTION
Timestamp	The information requires that the set of transactions be associated with a timestamp, source, and destination.
Multiple writers	There are multiple transaction generators/writers, meaning different organizations possibly in different physical locations.
Lack of trust	There is no trust among the actors, meaning each transaction generator would not allow others to edit their entries.
Disintermediation	The generators do not wish to transfer control of the dataset to a centralized authority for management.
Interdependence	One transaction influences the execution or outcome of another.
Defined rules	There is a defined set of rules, meaning a transaction is recorded whenever specific conditions are met, which can be independently and automatically verified
Store of value	Transactions represent assets or records with real-world value

A significant research study is presented by Lutfiani et al. (2022), who developed a reference framework for a fraud detection system in academic certificates. They conclude that BCT provides an excellent means of validating academic documents, offering quick verification compared to manual processes that are slower and require more effort from all parties involved.

There are interesting references for BCT-based applications that offer benefits, especially in certificate management. Such is the case of E-Skrol in Malaysia, which the Ministry of Education has deployed to combat the growing issue of degree fraud, particularly in public universities (Swiss Quality Consulting, 2023). Another application is Blockdemy Certs, which manages digital documents and ensures their existence, integrity, and validity through a digital signature mechanism based on Ethereum BCT (Yerramsetti et al., 2023). The OS City application by UNICEF presents an appealing proposition: it enables the recording of issuance, ranging diplomas to government licenses, on the blockchain in several countries in Latin America, aiming to support a large segment of young people with informal jobs and without formal certification (Jiménez, 2020).

One relevant study that carried out by Rustemi et al. (2023). In this, they address the potential of BCT for education under five constitutive aspects that are i) the type of blockchain platform to be used, ii) the automated process of generating academic certificates, iii) security and transparency, iv) adaptability of the platform to the educational environment, and v) enablement of key technologies.

The study by Ayman et al. (2023) elaborates an interesting proposal for academic sustainability. Through its BCT-based BlockCampus initiative, it promotes participation and information exchange among members of the academic community at E-JUST University. With the project, it not only addresses the security, privacy, and trust issues that affect HEI systems, but fundamentally promotes a cohesive and collaborative community that fosters learning, innovation and professional development of students and academic staff. To achieve this, it introduces token-based reward mechanisms that recognize community contributions and provide access to services and benefits both on and off the platform. This initiative has generated a positive perception of the platform, both in terms of usefulness, ease of use, satisfaction, and trust.

Finally, it is valuable to acknowledge that several of these initiatives are supported by the United Nations Development Programme (UNDP), which promotes access to education for children to acquire the necessary skills in line with the Sustainable Development Goals (Jirgensons & Kapenieks, 2018).

Results

Approach of the studies analyzed

Within the educational domain, most blockchain technology (BCT) applications concentrate on certificate management, aiming to enhance the efficiency of administrative processes in higher education institutions (HEIs). As noted by Chen et al. (2018), these applications can be broadly categorized into two main areas: (i) formal contexts, involving the management of learning content, learning outcomes, and academic credentials; and (ii) informal contexts, encompassing the tracking of research experience, skill acquisition, and online learning activities. This dual categorization reflects a growing interest in using BCT to support lifelong learning and comprehensive academic profiling.

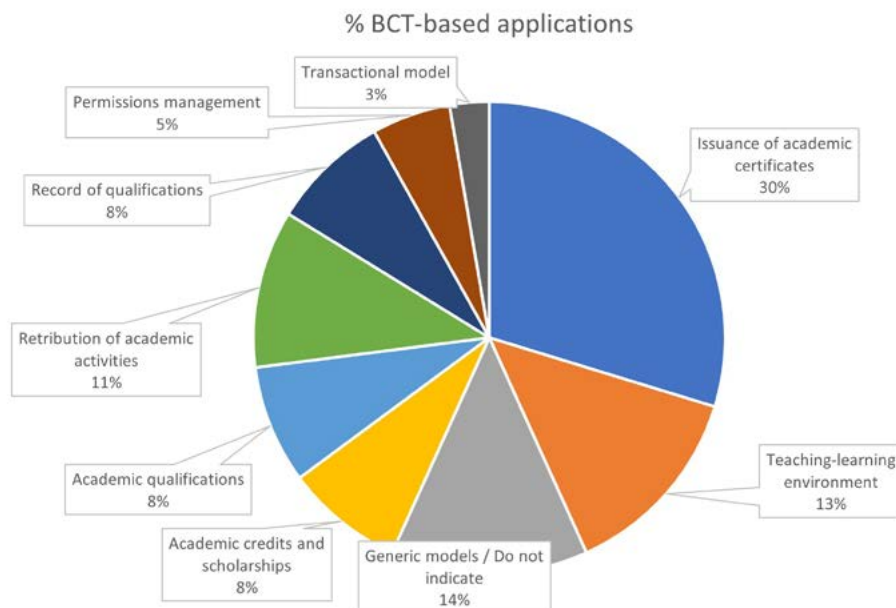
A recurring pattern across the literature is the emphasis on transparency, traceability, and decentralization as core benefits of BCT in academic settings. Notably, several studies propose the development of reward ecosystems that incentivize intellectual contributions. For instance, Sharples and Domingue (2016) introduce Kudos, a reputational reward currency designed to democratize recognition beyond traditional academic boundaries. Similarly, Mora et al. (2021) envision a model in which students receive BCT-based virtual currency for participating in academic or community engagement, aligning with the Sustainable Development Goals. These currencies could be used for tuition payments, access to institutional services, or even converted into fiat money, suggesting a potential shift toward value-based academic participation.

Another interesting analysis can be extracted from Table 2 by performing a classification or grouping of the models, platforms, or prototypes in which the different investigations are framed. Thus, the works carried out in accordance with the proposed application type are summarized in Table 4.

Table 4
Summary of Studies by Proposed Application Type

TYPE OF APPLICATION	REFERENCE	QTY.
Issuance of academic certificates	(Alnafrah & Mouselli, 2021), (Jaramillo & Piedra, 2020), (Luis Palma et al., 2019), (Srivastava et al., 2018), (Morales-Morales et al., 2020), (Guerreiro et al., 2022), (Badr et al., 2019), (Rane et al., 2020), (Lutfiani et al., 2022), (Rustemi et al., 2023), (Rasool et al., 2020) (Le Van Tan, & Pham Minh Hung, 2024) (Oluwaseyi, A, 2024)	13
Teaching-learning environment	(Hori et al., 2018), (Lizcano et al., 2020), (Chen et al., 2018), (Williams, 2019), (Bdiwi et al., 2018) (Silaghi, D. L., & Popescu, D. E, 2024) (Tahora, S., Saha, B., Sakib, N., Shahriar, H., & Haddad, H.2024))	7
Generic models / do not indicate	(Higinio Mora et al., 2021), (Rojas et al., 2020), (Alammery et al., 2019), (Tahora et al., 2023), (Zou et al., 2020), (Ocheja et al., 2022)	5
Academic credits and scholarships	(Bedi et al., 2020), (Turkanović et al., 2018), (Asamoah et al., 2023)	3
Academic qualifications	(Zhao et al., 2019), (Jirgensons & Kapenieks, 2018), (Awaji & Solaiman, 2022)	3
Retribution of academic activities	(Mohan, 2019), (Sharples & Domingue, 2016), (Battah et al., 2023), (Ayman et al., 2023)	4
Record of qualifications	(Nousias et al., 2022), (Li & Ma, 2021), (Garg, 2023)	3
Permissions management	(Gilda & Mehrotra, 2018), (Tariq et al., 2022) (Chaudhari, S., & Shirole, M., 2024)	3
Transactional model	(Wu & Li, 2018)	1

Figure 3
Types of BCT-based models



Quantitative analysis reveals that 29.7% of the reviewed models focus on academic certificate issuance, while 13.5% aim to optimize the teaching and learning environment. Together, these categories represent over half of the studies analyzed (16 out of 42), as illustrated in Figure 3. The predominance of certificate-related applications highlights a key finding: BCT is primarily leveraged to enhance process efficiency and mitigate fraud risks in credential verification. This trend reflects the increasing demand for verifiable qualifications in a competitive labor market and highlights BCT's role in strengthening institutional integrity and operational transparency within HEIs.

Challenges in the academic environment

In the context of blockchain adoption within Higher Education Institutions (HEIs), a consistent pattern emerges regarding the challenges and limitations that hinder effective implementation. These difficulties are primarily associated with the lack of transparency and traceability across various academic processes. As identified by Bedi et al. (2020), the most recurrent issues include:

- Limited traceability in internal forms and procedures
- Loss of information or documentation at different stages of academic workflows
- Insufficient transparency in the dissemination of institutional data
- Difficulty for external entities to verify academic information
- Insecure storage of academic records

Key finding 1

The absence of robust mechanisms for traceability and data verification is a systemic issue in HEIs, which blockchain technology seeks to address through its inherent properties of immutability and decentralization.

Further analysis reveals additional structural and technological barriers. Grech & Camilleri (2017) highlight the lack of standardization in academic procedures and student record formats, as well as the complexity of blockchain systems—particularly regarding storage costs and consensus mechanisms. Moreover, reliance on third-party services (e.g., wallets, exchange platforms, token management systems) introduces integration challenges and potential security vulnerabilities.

Key finding 2

The fragmentation of academic systems and dependence on external technologies represent significant obstacles to seamless blockchain integration in higher education.

Technological limitations are also prominent. Alammary et al. (2019) identify several critical concerns:

- Scalability requires more efficient consensus algorithms to handle high transaction volumes
- Adoption costs, mainly linked to infrastructure transformation
- Network trustworthiness, demanding clear and enforceable data-sharing policies
- Immutability, which complicates the correction of inaccurate or outdated records

Badr et al. (2019) note that ensuring compliance with privacy regulations, such as GDPR, is a persistent challenge when storing sensitive academic data on blockchain platforms.

Key finding 3

The tension between blockchain’s immutability and the dynamic nature of academic data underscores the need for flexible yet secure data governance models.

Rustemi et al. (2023) further emphasize the importance of interoperability with existing university systems and the implementation of robust cybersecurity protocols to prevent unauthorized access. A particularly critical issue involves the correction or revocation of data, given blockchain’s irreversible architecture. Additionally, the precision required in defining automation rules within smart contracts is essential to ensure autonomous execution without external intervention.

Key finding 4

The technical complexity of blockchain systems, combined with the steep learning curve for institutional stakeholders, constitutes a significant barrier to widespread adoption in HEIs.

These challenges reflect the evolving maturity of blockchain technology, which remains in a developmental phase. Addressing them requires not only technical innovation but also institutional commitment to capacity building and strategic planning. A summary of these challenges is presented in Table 5.

Table 5
Challenges in deploying a BCT platform in HEI environments

TYPE OF DIFFICULTY	REFERENCE
Functional	• Poor traceability and transparency in internal processes • Academic processes with low standardization • Establish automation policies and rules • Learning curve
Information management	• Lack of transparency in the dissemination of information • Loss of information or documentation • Information privacy management • Data interoperability with other systems
Technological	• Security schemes for the storage and management of information • Complexity in the use of resources • Platform usage costs and infrastructure transformation • Technological dependence on third parties • Platform scalability • Chain immutability (revocation)

Key findings, benefits, challenges, and opportunities

The integration of blockchain technology (BCT) into Higher Education Institutions (HEIs) reveals consistent patterns and key findings that underscore its transformative potential. A recurring theme across literature is the emphasis on BCT’s technical advantages, particularly the immutability of records and the decentralization of data management, which collectively enhance integrity, transparency, and trust in academic processes. Studies such as Lutfiani et al. (2022) consistently highlight the capacity of BCT to optimize critical institutional functions, including degree certification, admissions, enrollment, and evaluation procedures, thereby reducing the risk of fraud and corruption.

Key finding 1

The predominant application of BCT in HEIs centers on credential verification and process automation, reflecting a clear pattern of prioritizing administrative efficiency and data integrity.

Despite these advantages, the literature also identifies several technical challenges that must be addressed to ensure successful implementation. These include:

- Network scalability which limits transaction throughput in high-volume environments.
- Interoperability with legacy academic systems hinders seamless integration.
- Data privacy management, especially in compliance with international regulations such as the GDPR.

Key finding 2

The most frequently cited barriers to adoption are technical in nature, suggesting that institutional readiness and infrastructure modernization are critical prerequisites for BCT deployment.

To mitigate these challenges, the following technical strategies are recommended:

- Implementing second-layer solutions or sidechains to improve scalability.
- Adopting standard protocols and open APIs to enhance interoperability.
- Utilizing advanced encryption and smart contracts to safeguard personal data.

In addition to technical solutions, the literature emphasizes the importance of a robust governance framework. This framework should define usage policies, participant roles, and consensus mechanisms tailored to the specific operational context of HEIs.

Key finding 3

The absence of standardized governance models is a significant limiting factor in BCT adoption, underscoring the need for institutional policies that evolve in tandem with technological advancements.

Ultimately, the successful integration of BCT in HEIs is projected to yield not only improved efficiency and security in academic processes but also foster educational innovation and interinstitutional collaboration.

Key finding 4

When supported by strategic planning and adaptive governance, BCT can serve as a catalyst for sustainable and resilient academic ecosystems.

UCE-Camp proposal as a sustainable university model

Considering proposals such as the one described in Ayman et al. (2023), the authors propose a sustainable University model by incorporating new functionalities and services that enhance the value and utility of a BCT-based application for users and interested parties within the academic community. The five Phases must be considered as described in Table 6.

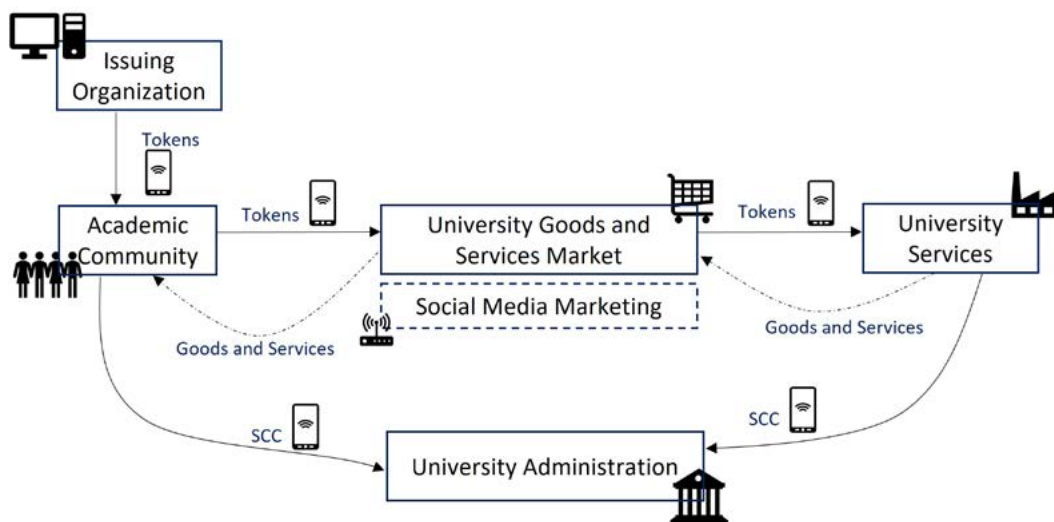
Table 6
Phases of the proposal

PHASE	DESCRIPTION
Phase 1	Analysis of the needs, objectives and requirements of users and interested parties of the UCE-Camp platform, through surveys, interviews and participatory workshops
Phase 2	Design of the new functionalities and services that will be incorporated into the UCE-Camp platform, using prototyping, modeling and simulation techniques

PHASE	DESCRIPTION
Phase 3	Implementation and testing of the new functionalities and services that will be incorporated into the UCE-Camp platform, using agile methodologies, automated testing and code reviews
Phase 4	Deployment and dissemination of the new functionalities and services that will be incorporated into the UCE-Camp platform, using effective strategies and channels for the promotion, training and support of users and interested parties.
Phase 5	Monitoring and improvement of new functionalities and services that will be incorporated into the UCE-Camp platform, using indicators and feedback mechanisms to measure performance, satisfaction and impact of the platform

The purpose of the model is to promote sustainable actions within the university environment and will allow the exchange of goods and services within the academic community. Such actions could be framed as support in tutoring, volunteering, serving as support chairs, publications, participating in research, among others. In turn, these activities will be rewarded with tokens that will be used to acquire goods or services provided by the University, such as courses, training, and laboratory time, among others. The general scheme is presented in Figure 4.

Figure 4
UCE-Camp Proposal



This proposal must also overcome several challenges, such as those described in previous sections, particularly related to:

- Enhance awareness, understanding, and confidence in BCT-based technology and new application among users and stakeholders.
- Establish standards, norms, and regulations that ensure interoperability, compatibility, and compliance of automation rules with legal and ethical requirements, through collaboration with relevant authorities and organizations.
- Optimize infrastructure, resources, and technical capabilities efficiently and securely to implement, maintain, and scale BCT technology and the UCE-Camp platform by adopting appropriate best practices and associated technologies.
- Generate evidence, evaluation, and validation of the impacts and results of BCT technology and the UCE-Camp platform on the quality, equity, and effectiveness of higher education, through the use of indicators and feedback mechanisms.

As an implementation strategy, we must consider:

- **Research and Development:**
 - **Feasibility Study:** Conduct a study to assess the technical and economic feasibility of implementing the UCE-Camp platform, which considers a social cryptocurrency in the university context.
 - **Prototype Development:** Create a prototype of the cryptocurrency based on blockchain technology, ensuring that it is secure, scalable, and complies with legal requirements.
- **Integration with University Infrastructure:**
 - **Exchange Platform:** Develop the UCE-Camp exchange platform within the university that allows students and staff to buy, sell, or exchange goods and services using cryptocurrency.
 - **Reward Systems:** Implement reward systems to incentivize behaviors that contribute to sustainable development, such as recycling, volunteering, or participation in sustainable research projects.
- **Cooperation and Alliances:**
 - **Strategic Alliances:** Establish alliances with local businesses and organizations that accept the cryptocurrency, thereby extending its use beyond the university campus.
 - **Joint Projects:** Promote joint projects between the university and the community to solve local problems using cryptocurrency as a means of financing.
- **Education and Awareness:**
 - **Educational Programs:** Incorporate courses and workshops on cryptocurrencies, blockchain, and sustainable development into the university curriculum, with an emphasis on the UCE-Camp platform.
 - **Awareness Campaigns:** Launch campaigns to educate the university community about the benefits and responsible use of social cryptocurrencies, as well as familiarize them with the UCE-Camp platform.
- **Evaluation and Scalability:**
 - **Monitoring and Evaluation:** Establish monitoring mechanisms to assess the impact of cryptocurrency on the university community and its contribution to sustainable development goals.
 - **Scalability Plans:** Develop plans to scale the cryptocurrency, allowing its adoption in other universities and communities.
- **Technical Issues and Feasibility:**
 - **Cybersecurity:** Ensuring protection against cyberattacks is fundamental to trust in the cryptocurrency; therefore, the UCE-Camp platform must be robust.
 - **Interoperability:** Ensure that the cryptocurrency can interact with other digital currencies and payment systems.
 - **Adoption and use:** Encouraging widespread adoption among potential users is a key challenge to the project's success.
 - **Regulation and Compliance:** Navigate the regulatory landscape to ensure compliance with financial and cryptocurrency laws.

This initial model must be refined to determine the scope and limitations in greater detail, prior to building a deployment or pilot prototype. In this context, thesis prototypes have been developed to exploit the benefits of BCT technology in HEI. Thus, Pazmiño (2023) proposes a social cryptocurrency model that promotes collaborative and sustainable activities in an academic environment. Similarly, Alpala (2024) proposes the use of an ERC-20 token-based cryptocurrency to promote environmental awareness and incentivize this behavior in the university community.

Discussion and Conclusions

The findings of this research, grounded in an up-to-date systematic review, have enabled the identification of the most relevant proposals and application models of blockchain technology (BCT) in academic processes, particularly within higher education institutions. The reviewed literature primarily focuses on secure certificate issuance and the enhancement of teaching and learning environments, although other domains have also been addressed. Key benefits include the prevention of errors, fraud, and corruption in processes such as academic record management, degree verification, and plagiarism detection. Moreover, blockchain ensures data integrity, strengthens information security, and validates the authenticity of issued documents.

Despite these advantages, practical implementations remain limited and have predominantly concentrated on certificate management platforms. The application of BCT in education is still in an emerging phase, with a clear gap between identified institutional needs and effective deployment. Adoption faces technical, organizational, and cultural challenges; however, the potential benefits justify continued exploration and the development of innovative solutions.

The main contribution of this study lies in its dual approach: it offers a comprehensive and current systematic review that provides insight into the state of blockchain technology in higher education, and it introduces the UCE-Camp model as a sustainable and applicable solution to improve efficiency, transparency, and quality of academic processes. Unlike previous studies that remain conceptual or focus on isolated cases, this research translates existing knowledge into a concrete proposal aligned with contemporary institutional demands.

The UCE-Camp model represents a strategic opportunity to transform the educational ecosystem by promoting more inclusive, collaborative, and autonomous academic management. Nonetheless, certain limitations must be acknowledged, such as the lack of longitudinal studies and the absence of real-world implementations, which hinder a complete assessment of their effectiveness. Additionally, issues such as system interoperability, technological scalability, and institutional acceptance continue to be significant barriers.

For future research, it is recommended that the UCE-Camp model be piloted to assess its technical, organizational, and cultural feasibility in real-world settings. This implementation should consider integration with online courses, digital certifications, academic portfolios, and social networks, thereby enriching the user learning experience. Furthermore, it is essential to explore new applications of blockchain technology in areas such as research management, innovation and knowledge transfer, institutional governance, administrative transparency, and data protection. These research directions will contribute to the continuous improvement of quality and excellence in higher education.

Acknowledgements and Declarations

The authors declared that, in the preparation of this article, AI tools were used.

Declaration of Conflicting Interests

The authors declared no potential conflicts of interest with respect to the research, authorship, and/or publication of this article.

Funding

The authors received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

References

- Alammary, A., Alhazmi, S., Almasri, M., & Gillani, S. (2019). Blockchain-Based Applications in Education: A Systematic Review. *Applied Sciences*, 9(12), 2400. <https://doi.org/10.3390/app9122400>
- Alnafra, I., & Mouselli, S. (2021). Revitalizing blockchain technology potentials for smooth academic records management and verification in low-income countries. *International Journal of Educational Development*, 85, 102460. <https://doi.org/10.1016/j.ijedudev.2021.102460>
- Alpala Calapaqui, J. S. (2024). Propuesta de un modelo de criptomoneda que promueva la conciencia ambiental en la Universidad Central del Ecuador. Retrieved from: <https://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/35636>
- Asamoah, K., Darko, A. P., Antwi, C. O., Kodjiku, S. L., Aggrey, E. S., Wang, Q., & Zhu, J. (2023). A Blockchain-Based Crowdsourcing Loan Platform for Funding Higher Education in Developing Countries. *IEEE Access*, 11(24162–24174). <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3252917>
- Awaji, B., & Solaiman, E. (2022). Design, Implementation, and Evaluation of Blockchain-based Trusted Achievement Record System for Students in Higher Education. *International Conference on Computer Supported Education, CSEDU - Proceedings*, 2, 225–237. <https://doi.org/10.5220/0011044200003182>
- Ayman, M., El-harty, Y., Rashed, A., Fathy, A., Abdullah, A., Wassim, O., & Gomaa, W. (2023). BlockCampus: A Blockchain-Based DApp for enhancing Student Engagement and Reward Mechanisms in an Academic Community for E-JUST University. *ArXiv Preprint ArXiv:2307.11662*. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/2307.11662>
- Badr, A., Rafferty, L., Mahmoud, Q. H., Elgazzar, K., & Hung, P. C. K. (2019). A permissioned blockchain-based system for verification of academic records. *2019 10th IFIP International Conference on New Technologies, Mobility and Security, NTMS 2019*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/NTMS.2019.8763831>
- Battah, A., Salah, K., Jayaraman, R., Yaqoob, I., & Khalil, A. (2023). Using Blockchain for Enabling Transparent, Traceable, and Trusted University Ranking Systems. *IEEE Access*, 11, 23792–23807. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3253948>
- Bdiwi, R., De Runz, C., Faiz, S., & Cherif, A. A. (2018). A blockchain based decentralized platform for ubiquitous learning environment. *2018 IEEE 18th International Conference on Advanced Learning Technologies (ICALT)*, 90–92. <https://doi.org/10.1109/ICALT.2018.00028>
- Bedi, P., Gole, P., Dhiman, S., & Gupta, N. (2020). Smart Contract based Central Sector Scheme of Scholarship for College and University Students. *Procedia Computer Science*, 171, 790–799. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.086>
- Casino, F., Dasaklis, T. K., & Patsakis, C. (2019). A systematic literature review of blockchain-based applications: Current status, classification and open issues. *Telematics and Informatics*, 36, 55–81. <https://doi.org/10.1016/j.tele.2018.11.006>
- Chaudhari, S., & Shirole, M. (2024). Blockchain-driven academic learning record management in higher education: A comprehensive review. *SN Computer Science*. <https://doi.org/10.1007/s42979-025-03952-z>
- Chen, G., Xu, B., Lu, M., & Chen, N.-S. (2018). Exploring blockchain technology and its potential applications for education. *Smart Learning Environments*, 5(1), 1–10. <https://doi.org/10.1186/s40561-017-0050-x>
- Conti, M., Sandeep, K. E., Lal, C., & Ruj, S. (2018). A survey on security and privacy issues of bitcoin. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 20(4), 3416–3452. <https://doi.org/10.1109/COMST.2018.2842460>
- Cortés, O., Pinto, A., & Atrio, S. (2015). E-portfolios as a tool for active constructionist learning in educational technology Rev. *Lasallista Investig.* vol.12 no.2 Caldas July/Dec. 2015.
- Efanov, D., & Roschin, P. (2018). The all-pervasiveness of the blockchain technology. *Procedia Computer Science*, 123, 116–121. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.01.019>

- Garg, R. (2023). *Data Management*. In *Blockchain for Real World Applications* (pp. 193–225). <https://doi.org/10.1002/9781119903765.ch9>
- Gilda, S., & Mehrotra, M. (2018). Blockchain for Student Data Privacy and Consent. *2018 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI)*, 1–5. IEEE.
- Grech, A., & Camilleri, A. F. (2017). Blockchain in Education. In *AIP Conference Proceedings (Vol. 2523)*. <https://doi.org/10.1063/5.0110211>
- Guerreiro, S., Ferreira, J. F., Fonseca, T., & Correia, M. (2022). Integrating an Academic Management System with Blockchain: A case study. *Blockchain: Research and Applications*, 3, 100099. <https://doi.org/10.1016/j.bcr.2022.100099>
- Hori, M., Ono, S., Miyashita, K., Kobayashi, S., Miyahara, H., Kita, T., ... Yamaji, K. (2018). Learning System based on Decentralized Learning Model using Blockchain and SNS. *Proceedings of the 10th International Conference on Computer Supported Education (CSEDU 2018)*, 1, 183–190.
- Jaramillo, M. P., & Piedra, N. (2020). Use of blockchain technology for Academic Certification in Higher Education Institutions. *Proceedings of the 15th Latin American Conference on Learning Technologies, LACLO 2020*, 0–7. <https://doi.org/10.1109/LACLO50806.2020.9381181>
- Jimenez, D. (2020). UNICEF lanza Os City: Certificación digital con Blockchain. Retrieved February 23, 2023, from *Cointelegraph*. <https://es.cointelegraph.com/news/unicef-launches-os-city-digital-certification-with-blockchain>
- Jirgensons, M., & Kapenieks, J. (2018). Blockchain and the future of digital learning credential assessment and management. *Journal of Teacher Education for Sustainability*, 20(1), 145–156. <https://doi.org/10.2478/jtes-2018-0009>
- Kitchenham, B. (2014). Procedures for Performing Systematic Reviews. Keele University Technical Report, 33, (1–26).
- Le Van Tan, & Pham Minh Hung. (2024). Driving digital transformation in certificate management: A blockchain-based solution for Vinh University. *International Journal of Information and Education Technology*, 14(1), 119–124. <https://doi.org/10.18178/ijiet.2024.14.1.2031>
- Li, Z., & Ma, Z. (2021). A blockchain-based credible and secure education experience data management scheme supporting for searchable encryption. *China Communications*, 18(6), 172–183. <https://doi.org/10.23919/JCC.2021.06.014>
- Lizcano, D., Lara, J., White, B., & Aljawarneh, S. (2020). Blockchain-based approach to create a model of trust in open and ubiquitous higher education. *Journal of Computing in Higher Education*, 32, 109–134.
- Lutfiani, N., Apriani, D., Nabila, E. A., & Juniar, H. L. (2022). Academic Certificate Fraud Detection System Framework Using Blockchain Technology. *Blockchain Frontier Technology*, 1(2), 55–64. <https://doi.org/10.34306/bfront.v1i2.55>
- MIT Media Lab. (n.d.). Digital Academic Credentials. Retrieved February 25, 2023, from *Digital Academic Credentials*. <https://www.media.mit.edu/projects/media-lab-digital-certificates/overview/>
- Mohan, V. (2019). On the use of blockchain-based mechanisms to tackle academic misconduct. *Research Policy*, 48(9), 103805. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.103805>
- Mora, H., Morales-Morales, M. R., Pujol-López, F. A., & Mollá-Sirvent, R. (2021). Social cryptocurrencies as model for enhancing sustainable development. *Kybernetes*, 50(10), 2883–2916. <https://doi.org/10.1108/K-05-2020-0259>
- Morales-Morales, M., Rosero-Correa, L., & Morales-Cardoso, S. (2020). Registro de títulos académicos mediante una aplicación basada en Blockchain y Smart Contracts. *Cátedra*, 3(2), 73–98. <https://doi.org/10.29166/catedra.v3i2.2200>

- Nousias, N., Tsakalidis, G., Michoulis, G., Petridou, S., & Vergidis, K. (2022). A process-aware approach for blockchain-based verification of academic qualifications. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 121, 102642. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2022.102642>
- Ocheja, P., Agbo, F. J., Oyelere, S. S., Flanagan, B., & Ogata, H. (2022). Blockchain in Education: A Systematic Review and Practical Case Studies. *IEEE Access*, 10, 99525–99540. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3206791>
- Oluwaseyi, A. (2024). Utilizing blockchain technology for university certificate verification. *International Journal of Advanced Information Systems*, 12(45), 1–10. <https://www.ijais.org/archives/volume12/number45/oluwaseyi-2024-ijca-451977.pdf>
- Oyelere, S. S., Sanusi, I. T., & Suhonen, J. (2020). Tecnología Blockchain en Educación: una revisión sistemática. *SciELO*. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442023000300326
- Palma, L., Gomes, F., Vigil, M., & Martina, J. (2019). A Transparent and Privacy-Aware Approach Using Smart Contracts for Car Insurance Reward Programs. *International Conference on Information Systems Security*, pp. 3-20. Springer, Cham.
- Palma, L., Vigil, M., Pereira, F., & Martina, J. (2019). Blockchain and smart contracts for higher education registry in Brazil. *International Journal of Network Management*, 29(3), e2061.
- Pazmiño Valverde, K. R. (2023). *Propuesta de un modelo de criptomoneda social basada en Blockchain que impulse actividades colaborativas y de sostenibilidad en la Universidad Central del Ecuador*. Disponible en: <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/30787>
- Rane, M., Singh, S., Singh, R., & Amarsinh, V. (2020). Integrity and Authenticity of Academic Documents Using Blockchain Approach. *ITM Web of Conferences*, 32, 03038. <https://doi.org/10.1051/itmconf/20203203038>
- Rasool, S., Saleem, A., Iqbal, M., Dagiuklas, T., Mumtaz, S., & ul Qayyum, Z. (2020). Docschain: Blockchain-based IoT solution for verification of degree documents. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 7(3), 827–837. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2020.2973710>
- Rivera-Vargas, P., & Lindin, C. (2020). Blockchain en Educación. Entre la búsqueda de seguridad en el mundo digital y el determinismo tecnológico. *Revista de la Educación Superior*, 49(194). DOI: 10.36857/resu.2020.194.1129159.
- Rojas, W., Gayoso Martínez, V., & Queiruga-Dios, A. (2020). Blockchain in education: New challenges. *13th International Conference on Computational Intelligence in Security for Information Systems (CISIS 2020)*, 380–389. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-57805-3>
- Rustemi, A., Dalipi, F., Atanasovski, V., & Risteski, A. (2023). A Systematic Literature Review on Blockchain-Based Systems for Academic Certificate Verification. *IEEE Access*, 11, 64679–64696. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3289598>
- Silaghi, D. L., & Popescu, D. E. (2024). A systematic review of blockchain-based initiatives in comparison to best practices used in higher education institutions. *Computers*, 14(4), 141. <https://doi.org/10.3390/computers14040141>
- Sharples, M., & Domingue, J. (2016). The blockchain and kudos: A distributed system for educational record, reputation and reward. *Lecture Notes in Computer Science (Including Subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*, 9891 LNCS, 490–496. https://doi.org/10.1007/978-3-319-45153-4_48
- Srivastava, A., Bhattacharya, P., Singh, A., Mathur, A., Prakash, O., & Pradhan, R. (2018). A distributed credit transfer educational framework based on blockchain. *2018 Second International Conference on Advances in Computing, Control and Communication Technology (IAC3T)*, 54–59. <https://doi.org/10.1109/iac3t.2018.8674023>

- Swan, M. (2018). Chapter Five - Blockchain for Business: Next-Generation Enterprise Artificial Intelligence Systems. *Advances in Computers*, 111, 121–162. <https://doi.org/doi.org/10.1016/bs.adcom.2018.03.013>
- Swiss Quality Consulting. (2023). Blockchain in academic credential verification: A case study of Malaysia's Ministry of Education. *The Swiss Quality*. <https://theswissquality.ch/blockchain-in-academic-credential-verification-a-case-study-of-malaysias-ministry-of-education/>
- Tahar, M., Hammi, B., Bellot, P., & Serhrouchni, A. (2018). Bubbles of Trust: A decentralized blockchain-based authentication system for IoT. *Computers & Security*, 78, 126–142. <https://doi.org/doi.org/10.1016/j.cose.2018.06.004>
- Tahora, S., Saha, B., Sakib, N., Shahriar, H., & Haddad, H. (2023). Blockchain Technology in Higher Education Ecosystem: Unraveling the Good, Bad, and Ugly. *Proceedings - International Computer Software and Applications Conference, 2023-June*, 1047–1056. <https://doi.org/10.1109/COMPSAC57700.2023.00160>
- Tahora, S., Saha, B., Sakib, N., Shahriar, H., & Haddad, H. (2024). Blockchain technology in higher education ecosystem: Unraveling the good, bad, and ugly. *arXiv preprint*. <https://arxiv.org/pdf/2306.04071>
- Tariq, A., Haq, H. B., & Ali, S. T. (2022). Cerberus: A blockchain-based accreditation and degree verification system. *IEEE Transactions on Computational Social Systems*, 10(4), 1503–1514. <https://doi.org/10.1109/TCSS.2022.3188453>
- Tinoco Plasencia, C. J., Juárez Trinidad, A. S., Gonzáles Rosas, F. A., & Tamayo Franco, J. W. (2023). Tecnología Blockchain en Educación: una revisión sistemática. *Conrado*, 19(92).
- Trejo H. (2019). Recursos digitales para la elaboración de e-portafolios educativos, *Sincronia*, 75. <https://www.redalyc.org/journal/5138/513857794017/513857794017.pdf>
- Turkanović, M., Hölbl, M., Košič, K., Heričko, M., & Kamišalić, A. (2018). EduCTX: A blockchain-based higher education credit platform. *IEEE Access*, 6, 5112–5127. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2789929>
- Van Damme, D. (2001). Higher Education in the Age of Globalization: The need for a new regulatory framework for recognition, quality assurance and accreditation Introductory Paper for the *UNESCO Expert Meeting*. Introductory Paper for the UNESCO Expert Meeting Paris, 10-11 September 2001, 1–13. Retrieved from <http://www.immagic.com/eLibrary/ARCHIVES/GENERAL/UNESCO/U011011V.pdf>
- Williams, P. (2019). Does competency-based education with blockchain signal a new mission for universities? *Journal of Higher Education Policy and Management*, 41(1), 104–117. <https://doi.org/10.1080/1360080X.2018.1520491>
- Wohlin, C. (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. *ACM International Conference Proceeding Series*. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>
- Wu, B., & Li, Y. (2018). Design of Evaluation System for Digital Education Operational Skill Competition Based on Blockchain. *15th International Conference on E-Business Engineering (ICEBE)*, 102–109. *IEEE*.
- Yerramsetti, S. U. K. S. M., Velagapudi, R., Vennam, S. R., Ratnamala, B., & Reddyvaari, V. R. (2023). A review on student document management system based on Ethereum Blockchain (PERSONAL-D). *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 12(8). <https://www.ijert.org/a-review-on-student-document-management-system-based-on-ethereum-blockchain-personal-d>
- Zhang, S., & Lee, J.H. (2020). Analysis of the main consensus protocols of blockchain. *ICT Express*, 6(2), 93. <https://doi.org/10.1016/j.icte.2019.08.001>
- Zhao, W., Liu, K., & Ma, K. (2019). Design of student capability evaluation system merging blockchain technology. *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1168, No.3), 032123. IOP Publishing.
- Zou, Y., Meng, T., Zhang, P., Zhang, W., & Li, H. (2020). Focus on blockchain: A comprehensive survey on academic and application. *IEEE Access*, 8, 187182–187201. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3030491>

Ticec²⁰²⁵

Información para autores

Information for authors

Evaluación por pares

La Revista Tecnológica Espol - RTE es una revista arbitrada que se rige por el sistema doble par anónimo. Los artículos enviados por los autores son evaluados previamente por el Editor Asociado para comprobar si se ajustan a las normas de edición y a las políticas temáticas de la revista. Cuando el artículo pasa ese primer filtro es enviado a dos evaluadores externos expertos en la temática abordada por el autor. Para cumplir y defender la ética de la investigación, estos evaluadores desconocen el nombre de el/los autores/as y la identificación de la/s institución/es a la que pertenece el artículo, encargándoseles dictaminar si responde a los intereses científicos de la revista y si procede su publicación. En la valoración final, los revisores deciden entre las siguientes opciones: publicable, publicable con modificaciones menores, publicable con modificaciones mayores o no publicable. En el caso de que haya disparidad de opinión entre revisores del Comité Científico, se someterá al juicio de un tercer experto, que dirimirá en conflicto de pareceres.

En el siguiente link [Guía de revisores](#), se detalla paso a paso el proceso de evaluación a seguir por los pares ciegos asignados

Las responsabilidades específicas de los revisores se encuentran declaradas en el link [Código de ética y buenas prácticas de publicación](#).

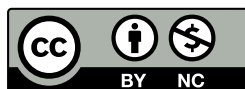
Derechos de autor (Copyright)

*Los originales publicados, en las ediciones impresa y electrónica, de la **Revista Tecnológica Espol - RTE**, bajo derechos de primera publicación, son propiedad de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Guayaquil, República del Ecuador, siendo absolutamente necesario citar la procedencia en cualquier reproducción parcial o total de los contenidos (textos o imágenes) publicados. RTE proporciona un acceso abierto e inmediato a su contenido, pues creemos firmemente en el acceso público al conocimiento, lo cual no obsta para que la cita de la fuente sea obligatoria para todo aquél que desee reproducir contenidos de esta revista.*

De igual modo, la propiedad intelectual de los artículos o textos publicados en la revista RTE pertenece al/la/los/las autor/a/es/as, quienes conservan sus derechos de autor y dominio irrestricto de su obra.

Esta circunstancia ha de hacerse constar expresamente de esta forma cuando sea necesario.

Todo el contenido de RTE mantiene una licencia de contenidos digitales otorgada por Creative Commons.



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0 International](#).

Directrices para autores

Los textos postulados deben:

1. Corresponder a las categorías universalmente aceptadas como producto de investigación.
2. Ser originales e inéditos.
3. Sus contenidos responden a criterios de precisión, claridad y brevedad.

Se clasifican en:

3.1. Artículos. En esta sección se publican:

- 3.1.1. Artículos de investigación científica o tecnológica: presenta de manera detallada los resultados originales de proyectos terminados de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro aportes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.
- 3.1.2. Artículo de revisión: resultado de una investigación terminada donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de investigaciones, publicadas o no, ya sea en el campo científico, artístico o artístico tecnológico, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo.

Próximos Volúmenes

PROGRAMACIÓN

Vol. 37, Núm. 2

Volumen Abierto Semestral

- i. **Convocatoria abierta:** envío de artículos hasta el 15 de septiembre de 2025
- ii. **Notificación de artículos seleccionados después de revisión por pares ciegos:** hasta el 30 de noviembre de 2025
- iii. **Publicación del volumen:** diciembre 2025

Sección Especial: I Congreso Internacional de Investigación en Contabilidad, Auditoría y Finanzas

- i. **Convocatoria abierta:** envío de artículos hasta el 30 de mayo de 2025
- ii. **Notificación de artículos seleccionados después de revisión por pares ciegos:** hasta el 31 de julio de 2025
- iii. **Publicación del volumen:** diciembre 2025

Próximos Volúmenes

PROGRAMACIÓN

Vol. 38, Núm. 1

Volumen Abierto Semestral

- i. *Convocatoria abierta: envío de artículos hasta el 15 de abril de 2026*
- ii. *Notificación de artículos seleccionados después de revisión por pares ciegos: hasta el 30 de mayo de 2026*
- iii. *Publicación del volumen: junio 2026*

PROGRAMACIÓN

Vol. 38, Núm. 2

Volumen Abierto Semestral

- i. *Convocatoria abierta: envío de artículos hasta el 15 de septiembre de 2026*
- ii. *Notificación de artículos seleccionados después de revisión por pares ciegos: hasta el 30 de noviembre de 2026*
- iii. *Publicación del volumen: diciembre 2026*

PROGRAMACIÓN

Vol. 39, Núm. 1

Volumen Abierto Semestral

- i. *Convocatoria abierta: envío de artículos hasta el 15 de abril de 2027*
- ii. *Notificación de artículos seleccionados después de revisión por pares ciegos: hasta el 30 de mayo de 2027*
- iii. *Publicación del volumen: junio 2027*

NOTA: Para interés en publicaciones de volúmenes o secciones especiales, se invita a universidades y organizaciones relacionadas con investigación a contactarnos a nsolorza@espol.edu.ec

NOTE: For interest in publications of special issues or special sections, universities and organizations related to research are invited to contact us at nsolorza@espol.edu.ec



espol[®]

cedia



rte.espol.edu.ec