



Tecnura

Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

Volumen 28 - Número 82
Octubre - Diciembre de 2024

p-ISSN: 0123-921X
e-ISSN: 2248-7638



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Revista TECNURA
Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad Tecnológica

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

EDITORIA

Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

EDITORES ASISTENTES

MSc. Ronald González Silva
Carlos David Ballén Ladino

COMITÉ EDITORIAL-CIENTÍFICO

Jimmy Barco Burgos Ph.D.
Concordia University, Canada

Mario Ricardo Arbulu Saavedra, Ph.D. Ing
Corporación Universitaria del Huila.

Martín Pedro Gómez, Ph.D.
Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.

Oreste Piro, Ph.D.
Universidad de les Illes Balears. España.

Manuel Karim Sapag, Ph.D. Ing
Universidad Nacional de San Luis, Argentina.

Fernando Martirena, Ph.D. Ing
Universidad Central de Las Villas, Cuba.

Adriana Martínez Hernández, Ph.D. Ing
Universidad Iberoamericana, México.

Alma De León Hernández, Ph.D. IngPh.D
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Miguel Ángel Padilla Castañeda, Ph.D.
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Joao Vidal de Carvalho, Ph.D.
Instituto Politécnico do Porto Escola Superior de Educação,
Portugal.

EVALUADORES

Mateo Ospino Díaz
Loma Linda University, Estados Unidos

Yesica Paola Moscote Daza
Fundación Universitaria del Área Andina, Colombia.

Gladys Esperanza Bejarano Tenza
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia.

Víctor Martín Pérez Moreno
Universidad de Oriente, Venezuela.

Cristian Lozano
Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia.

José Isaías Montaña Galán
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia.

Jesús Águila León
Universidad de Guadalajara, México.

José Orlando Maldonado Bautista
Universidad de Pamplona, Colombia.

Martín Salamero
Universidad Blas Pascal, Argentina.

Sandra Rojas Sevilla
Universidad de Sucre, Colombia.

José Solorzano
Escuela Superior de Administración Pública – ESAP,
Colombia

Carlos Granados
Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia.

Óscar Javier Suárez Sierra
Universidad de Pamplona, Colombia.

COORDINACIÓN EDITORIAL

Fernando Piraquive
Oficina de Investigaciones
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

REVISTA TECNURA

La revista Tecnura es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas de carácter científico-tecnológico, arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

PERIODICIDAD

Es una publicación de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

COBERTURA TEMÁTICA

Las áreas temáticas de interés de la revista Tecnura están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publicará únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión.

MISIÓN

La revista Tecnura tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de la ingeniería, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado.

PÚBLICO OBJETIVO

La revista Tecnura está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de la ingeniería.

INDEXACIÓN

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en los índices regionales pubindex indexada y clasificada en categoría B, Scielo Colombia y Redalyc (México); además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), IndexCorpernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España); también hace

parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México); Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

FORMA DE ADQUISICIÓN

La revista Tecnura se puede adquirir a través de canje o suscripción en el portal de la de la revista.

REPRODUCCIÓN

Se autoriza la reproducción total o parcial de los artículos de esta revista para uso académico o interno de las instituciones citando la fuente y el autor. Las ideas expresadas se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial de la revista.

DIRECCIÓN POSTAL

Enviar a Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras
Director y Editor Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Dirección: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogotá
Teléfono: 571-3239300
Bogotá, D.C., Colombia
Correo electrónico:
tecnura.ud@udistrital.edu.co
Tecnura en internet:
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA ESPAÑOL

MSc. Fernando Carretero Padilla

CORRECCIÓN DE ESTILO PARA INGLÉS

MSc. Alexander Olave

DISEÑO DE CUBIERTA

Andrés Enciso

DIAGRAMACIÓN Y DISEÑO L^AT_EX*

MSc. Julian Arcila-Forero

*Modificada bajo las condiciones del LaTeX Project Public License
<http://www.latex-project.org/lppl.txt>



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

TECNURA Journal
Technology And Culture, Affirming Knowledge
District University Francisco José De Caldas
Faculty Of Technology

p-ISSN: 0123-921X - e-ISSN: 2248-7638

EDITOR

Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras
Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia

ASSISTANT EDITOR

MSc. Ronald González Silva
Carlos David Ballén Ladino

EDITORIAL-SCIENTIFIC COMMITTEE

Jimmy Barco Burgos Ph.D.
Concordia University, Canada

Mario Ricardo Arbulu Saavedra, Ph.D. Ing
Corporación Universitaria del Huila.

Martín Pedro Gómez, Ph.D.
Comisión Nacional de Energía Atómica, Argentina.

Oreste Piro, Ph.D.
Universidad de les Illes Balears. España.

Manuel Karim Sapag, Ph.D. Ing
Universidad Nacional de San Luis, Argentina.

Fernando Martirena, Ph.D. Ing
Universidad Central de Las Villas, Cuba.

Adriana Martínez Hernández, Ph.D. Ing
Universidad Iberoamericana, México.

Alma De León Hernández, Ph.D. IngPh.D
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Miguel Ángel Padilla Castañeda, Ph.D.
Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Joao Vidal de Carvalho, Ph.D.
Instituto Politécnico do Porto Escola Superior de Educação,
Portugal.

EVALUATORS

Mateo Ospino Díaz
Loma Linda University, Estados Unidos

Yesica Paola Moscote Daza
Fundación Universitaria del Área Andina, Colombia.

Gladys Esperanza Bejarano Tenza
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia.

Víctor Martín Pérez Moreno
Universidad de Oriente, Venezuela.

Cristian Lozano
Fundación Universitaria Los Libertadores, Colombia.

José Isaías Montaña Galán
Servicio Nacional de Aprendizaje SENA, Colombia.

Jesús Águila León
Universidad de Guadalajara, México.

José Orlando Maldonado Bautista
Universidad de Pamplona, Colombia.

Martín Salamero
Universidad Blas Pascal, Argentina.

Sandra Rojas Sevilla
Universidad de Sucre, Colombia.

José Solorzano
Escuela Superior de Administración Pública – ESAP,
Colombia

Carlos Granados
Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia.

Óscar Javier Suárez Sierra
Universidad de Pamplona, Colombia.

EDITORIAL COORDINATION

Fernando Piraquive
Oficina de Investigaciones
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

TECNURA JOURNAL

Tecnura Journal is an institutional scientific-technological publication from the Faculty of Technology at District University Francisco José de Caldas, arbitrated by means of a double-blinded peer review process. The periodicity for its Scientific and Editorial committees line-up is subject to the publication of articles in internationally indexed magazines by its own members.

PERIODICITY

Tecnura journal is a scientific-technological publication with quarterly periodicity, published in January, April, July and October. Its first edition appeared in the second term, 1997 and its editions have normally continued from that year and on.

THEMATIC COVERAGE

The thematic areas of interest at Tecnura journal are focused on all fields of engineering such as electronical, telecommunications, electrical, computer, industrial, mechanical, cadastral, civil, environmental, etc. However, it is not restricted to those, there is also room for education and health topics as well, as long as they are related to engineering. The journal will only publish scientific and technological research, reflection and review articles.

MISSION

Tecnura journal is aimed at publishing research project results carried out in the field of engineering, through the publishing of original and unpublished articles written by academics and professionals from national or international public or private institutions.

TARGET AUDIENCE

Tecnura journal is directed to professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and the monitoring of the scientific-technological research processes in the field of engineering.

INDEXING

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica of the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet of the Universidad de la Rioja (Spain); it is also part of the

following directories: Online Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), bibliographic index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden), Ulrich of Proquest (United States).

FORM OF ACQUISITION

Tecnura journal is available through purchase, exchange or subscription.

REPRODUCTION

The total or partial reproduction of the articles of this journal is authorized for academic or internal purpose of the institutions citing the source and the author. Ideas expressed are published under exclusive responsibility of the authors and they do not necessarily reflect the thought of the editorial committee of the journal.

POSTAL ADDRESS

Enviar a Ph.D. Lely Adriana Luengas Contreras
Director y Editor Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Dirección: Cl. 68d Bis A Sur # 49 F - 70, Bogotá
Teléfono: 571-3239300
Bogotá, D.C., Colombia
E-mail:
tecnura.ud@udistrital.edu.co
Tecnura on internet:
<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

STYLE CORRECTION IN SPANISH

MSc. Fernando Carretero Padilla

STYLE CORRECTION IN ENGLISH

MSc. Alexander Olave

TITLE PAGE DISEGN

Andrés Enciso

LAYOUT AND L^AT_EX* DESIGN

MSc. Julian Arcila-Forero

* modified under the conditions of the LaTeX Project Public License
<http://www.latex-project.org/lppl.txt>

El comité editorial de la revista **Tecnura** está comprometido con altos estándares de ética y buenas prácticas en la difusión y transferencia del conocimiento, para garantizar el rigor y la calidad científica. Es por ello que ha adoptado como referencia el Código de Conducta que, para editores de revistas científicas, ha establecido el Comité de Ética de Publicaciones (COPE: Committee on Publication Ethics) dentro de los cuales se destaca:

Obligaciones y responsabilidades generales del equipo editorial

En su calidad de máximos responsables de la revista, el comité y el equipo editorial de **Tecnura** se comprometen a:

- Aunar esfuerzos para satisfacer las necesidades de los lectores y autores.
- Propender por el mejoramiento continuo de la revista.
- Asegurar la calidad del material que se publica.
- Velar por la libertad de expresión.
- Mantener la integridad académica de su contenido.
- Impedir que intereses comerciales comprometan los criterios intelectuales.
- Publicar correcciones, aclaraciones, retractaciones y disculpas cuando sea necesario.

Relaciones con los lectores

Los lectores estarán informados acerca de quién ha financiado la investigación y sobre su papel en la investigación.

Relaciones con los autores

Tecnura se compromete a asegurar la calidad del material que publica, informando sobre los objetivos y normas de la revista. Las decisiones de los editores para aceptar o rechazar un documento para su publicación se basan únicamente en la relevancia del trabajo, su originalidad y la pertinencia del estudio con relación a la línea editorial de la revista. La revista incluye una descripción de los procesos seguidos en la evaluación por pares de cada trabajo recibido. Cuenta con una guía de autores en la que se presenta esta información. Dicha guía se actualiza regularmente y contiene un vínculo a la presente declaración ética. Se reconoce el derecho de los autores a apelar las decisiones editoriales. Los editores no modificarán su decisión en la aceptación de envíos, a menos que se detecten irregularidades o situaciones extraordinarias. Cualquier cambio en los miembros del equipo editorial no afectará las decisiones ya tomadas, salvo casos excepcionales en los que confluyan graves circunstancias.

Relaciones con los evaluadores

Tecnura pone a disposición de los evaluadores una guía acerca de lo que se espera de ellos. La identidad de los evaluadores se encuentra en todo momento protegida, garantizando su anonimato.

Proceso de evaluación por pares

Tecnura garantiza que el material remitido para su publicación será considerado como materia reservada y confidencial mientras que se evalúa (doble ciego).

Reclamaciones

Tecnura se compromete responder con rapidez a las quejas recibidas y a velar para que los demandantes insatisfechos puedan tramitar todas sus quejas. En cualquier caso, si los interesados no consiguen satisfacer sus reclamaciones, se considera que están en su derecho de elevar sus protestas a otras instancias.

Fomento de la integridad académica

Tecnura asegura que el material que publica se ajusta a las normas éticas internacionalmente aceptadas.

Protección de datos individuales

Tecnura garantiza la confidencialidad de la información individual (por ejemplo, de los profesores y/o alumnos participantes como colaboradores o sujetos de estudio en las investigaciones presentadas).

Seguimiento de malas prácticas

Tecnura asume su obligación para actuar en consecuencia en caso de sospecha de malas prácticas o conductas inadecuadas. Esta obligación se extiende tanto a los documentos publicados como a los no publicados. Los editores no sólo rechazarán los manuscritos que planteen dudas sobre una posible mala conducta, sino que se consideran éticamente obligados a denunciar los supuestos casos de mala conducta. Desde la revista se realizarán todos los esfuerzos razonables para asegurar que los trabajos sometidos a evaluación sean rigurosos y éticamente adecuados.

Integridad y rigor académico

Cada vez que se tenga constancia de que algún trabajo publicado contiene inexactitudes importantes, declaraciones engañosas o distorsionadas, debe ser corregido de forma inmediata.

En caso de detectarse algún trabajo cuyo contenido sea fraudulento, será retirado tan pronto como se conozca, informando inmediatamente tanto a los lectores como a los sistemas de indexación.

Se consideran prácticas inadmisibles, y como tal se denunciarán las siguientes: el envío simultáneo de un mismo trabajo a varias revistas, la publicación duplicada o con cambios irrelevantes o parafraseo del mismo trabajo, o la fragmentación artificial de un trabajo en varios artículos.

Relaciones con los propietarios y editores de revistas

La relación entre editores, editoriales y propietarios estará sujeta al principio de independencia editorial. **Tecnura** garantizará siempre que los artículos se publiquen con base en su calidad e idoneidad para los lectores, y no con vistas a un beneficio económico o político. En este sentido, el hecho de que la revista no se rija por intereses económicos, y defienda el ideal de libre acceso al conocimiento universal y gratuito, facilita dicha independencia.

Conflicto de intereses

Tecnura establecerá los mecanismos necesarios para evitar o resolver los posibles conflictos de intereses entre autores, evaluadores y/o el propio equipo editorial.

Quejas/denuncias

Cualquier autor, lector, evaluador o editor puede remitir sus quejas a los organismos competentes

The editorial board of *Tecnura* journal is committed to ethics high standards and good practice for knowledge dissemination and transfer, in order to ensure rigour and scientific quality. That is why it has taken as reference the Code of Conduct, which has been established by the Committee on Publication Ethics (COPE) for scientific journal editors; outlining the following:

General duties and responsibilities of the editorial board

As most responsible for the journal, **Tecnura** committee and the editorial board are committed to:

- Joining efforts to meet the readers and authors' needs.
- Tending to the continuous improvement of the Journal.
- Ensuring quality of published material.
- Ensuring freedom of expression.
- Maintaining the academic integrity of their content.
- Prevent commercial interests compromise intellectual standards.
- Post corrections, clarifications, retractions and apologies when necessary.
- Relations with readers.
- Readers will be informed about who has funded re- search and their role in the research.

Relations with authors

Tecnura is committed to ensuring the quality of published material, informing the goals and standards of the journal. The decisions of publishers to accept or reject a paper for publication are based solely on the relevance of the work, originality and pertinence of the study with journal editorial line. The journal includes a description of the process for peer evaluation of each received work, and has an authors guide with this information. The guide is regularly updated and contains a link to this code of ethics. The journal recognizes the right of authors to appeal editorial decisions Publishers will not change their decision in accepting or rejecting articles, unless extraordinary circumstances or irregularities are detected. Any change in the editorial board members will not affect decisions already made, except for unusual cases where serious circumstances converge.

Relations with evaluators

Tecnura makes available to reviewers a guide to what is expected from them. Reviewers' identity is protected at all times, ensuring anonymity.

Peer review process

Tecnura ensures that material submitted for publication will be considered private and confidential issue while being reviewed (double blind).

Claims

Tecnura is committed to respond quickly to complaints and ensure that dissatisfied claimant can process all complaints. In any case, if applicants fail to satisfy their claims, the journal considers that they have the right to raise their protests to other instances.

Promoting Academic Integrity

Tecnura ensures that the published material conforms to internationally accepted ethical standards.

Protection of individual data

Tecnura guarantees the confidentiality of individual information (e.g. participant teachers and/or students as collaborators or subjects of study in the presented research).

Tracking malpractice

Tecnura accepts the obligation to act accordingly in case of suspected malpractice or misconduct. This obligation extends both to published and unpublished documents. The editors not only reject manuscripts with doubts about possible misconduct, but they are considered ethically obligated to report suspected cases of misconduct. From the journal every reasonable effort is made to ensure that works submitted for evaluation are rigorous and ethically appropriate.

Integrity and academic rigour

Whenever evidence that a published work contains significant misstatements, misleading or distorted statements, it must be corrected immediately.

In case of any work with fraudulent content is detected, it will be removed as soon as it is known, and immediately informing both readers and indexing systems.

Practices that are considered unacceptable and as such will be reported: simultaneous sending of the same work to various journals, duplicate publication with irrelevant changes or paraphrase of the same work, or the artificial fragmentation of a work in several articles.

Relations with owners and journal editors

The relation between editors, publishers and owners will be subject to the principle of editorial independence. **Tecnura** will ensure that articles are published based on their quality and suitability for readers, and not for an economic or political gain. In this sense, the fact that the journal is not governed by economic interests, and defends the ideal of universal and free access to knowledge, provides that independence.

Conflict of interest

Tecnura will establish the necessary mechanisms to avoid or resolve potential conflicts of interest between authors, reviewers and/or the editorial board itself.

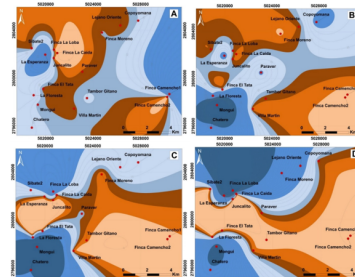
Complaints / allegations

Any author, reader, reviewer or editor may refer their complaints to the competent authorities.

Geofísica aplicada en la exploración de aguas subterráneas de la Formación Monguí, Riohacha (Colombia) 12

Geophysics applied to groundwater exploration of the Mongui Formation, Riohacha (Colombia)

Jorge Javier Gómez Martínez, Jaime Segundo Manjarrés Cogollo, Elías Ernesto Rojas Martínez, Dino Carmelo Manco Jaraba y Frank David Lascarro Navarro



A: -20 m.s.n.m. B: -60 m.s.n.m. C: -90 m.s.n.m. D: -120 m.s.n.m.

Enfoque STEAM y modelo TPACK en los métodos numéricos aplicados con *software* 27

STEAM approach and TPACK model in Numerical methods applied with software

Sonia Valbuena Duarte, Luis Márquez Herrera, Robinson Conde Carmona y María Fernanda Chiquillo Varela



Alianzas interorganizacionales e innovación: una revisión exploratoria 48

Interorganizational alliances and innovation. A scoping review

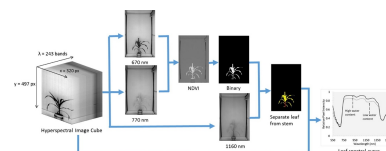
Ana Isabel Gómez Acevedo, Hugo Ernesto Martínez Ardila y Elda Alejandra Torres Reyes



Monitoreo de cultivos y suelos en agricultura de precisión con UAV e inteligencia artificial: una revisión 75

Crop and Soil Monitoring in Precision Agriculture with UAVs and Artificial Intelligence: A Review

Elías Buitrago Bolívar, John Alexander Rico Franco y Sócrates Rojas Amador



Metaanálisis de la auditoría de mantenimiento como herramienta de gestión en la producción industrial 104

Meta-analysis of maintenance auditing as a management tool in industrial production

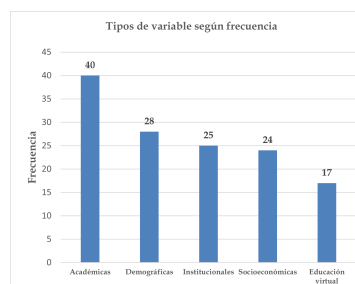
José Isaías Salas Hernández, Fernando Arturo Soler López, Jhonatan Ospina Molina, Andrés Felipe Medina Gamba y Tony Castillo Calzadilla



Modelos de inteligencia artificial en minería de datos educativos para predecir la deserción en Educación Superior: una revisión integral 134

Artificial Intelligence Models in Educational Data Mining for Predicting Dropout in Higher Education: A Comprehensive Review

José Leonardo Pérez Niño, Oscar Eduardo Gualdrón Guerrero y Diego José Barrera Oliveros



Caficultor digital: tecnologías 4.0 para producción de café mediante modelos predictivos 156

Digital Coffee Farmer: Industry 4.0 technologies for the Coffee Production Process through Prediction Models

César Osimani, Jaime Andrés Arévalo y William Ruiz Martínez







Instrucciones para los autores 178

Instructions for authors 191

Geofísica aplicada en la exploración de aguas subterráneas de la Formación Monguí, Riohacha (Colombia)

Geophysics applied to groundwater exploration of the Mongui Formation, Riohacha (Colombia)

Jorge Javier Gómez Martínez ¹, Jaime Segundo Manjarrés Cogollo ², Elías Ernesto Rojas Martínez ³, Dino Carmelo Manco Jaraba ⁴ y Frank David Lascarro Navarro ⁵

Fecha de Recepción: 23 de marzo de 2024

Fecha de Aceptación: 01 de diciembre de 2024

Cómo citar: Gómez Martínez, J. J., Manjarrés Cogollo, J. S., Rojas Martínez, E. E., Manco Jaraba, D. C., y Lascarro Navarro, F. L. (2025). Geofísica aplicada en la exploración de aguas subterráneas de la Formación Monguí, Riohacha (Colombia). *Tecnura*, 28(82), 12-26. <https://doi.org/10.14483/22487638.22004>


Resumen


Contexto: a lo largo de la historia, se ha constatado la escasez de agua en el departamento de La Guajira, y el profundo impacto en las necesidades esenciales de las poblaciones locales.


Objetivo: esta investigación propende a aplicar métodos geofísicos exploratorios en la Formación Monguí, mediante 17 sondeos eléctricos verticales (SEV) para identificar, clasificar y caracterizar las resistividades de los materiales existentes y determinar el potencial acuífero.


Metodología: los datos se procesaron en el programa *IPI2WIN*, diseñado para la interpretación 1D de las curvas de SEV a lo largo de un perfil. A partir de los datos obtenidos, se implementaron modelos de superposición de capas isorresistivas, gracias a los cuales se establecieron zonas potenciales para la captación de agua subterránea de la Formación Monguí.


Resultados: los valores encontrados por encima de los 12 ohmios resultan de interés debido a que se asocian con limos o arenas de grano fino saturadas con agua dulce o rocas masivas; áreas que resultan las más promisorias para la captación de agua subterránea.

¹Ingeniero geólogo. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Correo electrónico: diegojara1920@gmail.com

²Ingeniero geólogo. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Correo electrónico: keilajobar@gmail.com

³M. C. Geología Económica, Geólogo. Fundación Universitaria del Área Andina. Valledupar, Colombia. . Correo electrónico: eliaser@hotmail.com

⁴M. C. Gestión Ambiental y Energética en las Organizaciones, Ingeniero de Minas. Docente Ocasional Universidad de La Guajira. Riohacha. Colombia. . Correo electrónico: dinomancojaraba@gmail.com, dcmancoj@uniguajira.edu.co

⁵Ingeniero geólogo. Fundación Universitaria del Área Andina sede Valledupar. Valledupar. Colombia. . Correo electrónico: frank.lascarro@unmsm.edu.pe

Conclusiones: la zona suroeste del área evaluada se presenta como la más promisoría para la captación de agua subterránea. Los SEV en la Formación Monguí arrojaron valores de resistividad que indican presencia probable de limos o arenas de grano fino saturadas con agua dulce.

Palabras clave: formación monguí, geofísica, isorresistividades, sondeos eléctricos verticales, sufer.

Abstract

Context: Throughout history, water scarcity has been noted in the department of La Guajira and the profound effect it has had in relation to the essential needs of local populations.

Objective: This research aims to apply exploratory geophysical methods to the Monguí Formation, through 17 vertical electrical soundings (VES) to identify, classify and characterize the resistivities of the existing materials and determine the aquifer potential.

Methodology: The data were processed using IPI2WIN software, designed for the 1D interpretation of the vertical electrical sounding curves (SEV) along a profile. Based on these data obtained, isoresistive layer superposition models were implemented to establish potential zones for groundwater capture in the Monguí Formation.

Results: values found above 12 ohms are of interest because they are associated with fine-grained silts or sands saturated with fresh water or massive rocks; being these areas the most promising for groundwater abstraction.

Conclusions: The southwestern (SW) zone of the evaluated area is presented as the most promising for groundwater abstraction. The vertical electrical soundings of Monguí yielded resistivity values that indicate the probable presence of silts or fine-grained sands saturated with fresh water.

Keywords: Geophysics, Isoresistivities, Mongui Formation, Vertical electrical soundings, Surfer.

Introducción

La geofísica se plantea como solución a las problemáticas para la exploración de agua subterráneas (Auge, 2008; Bakkali, 2006; Bhattacharya y Shalivahan, 2016; Fernández, 2012; Mena Hernández, 2020; Paganini Gismondi, 2019; Paredes Ruiz, 2019; Rodríguez Hernández, 2015). Los sondeos eléctricos verticales (SEV) son métodos geofísicos que buscan reconocer la distribución de las resistividades del suelo, por medio de la determinación de las propiedades de las rocas con relación a la presencia de agua subterránea (Auge, 2008; Bakkali, 2006).

Las aguas subterráneas son fuente importante; además de suplir necesidades de irrigación en la agricultura (Fernández, 2012), contribuyen al sostenimiento de corrientes, lagos, humedales y otros ecosistemas asociados (Mendoza, 2019). En este sentido, constituyen un recurso natural estratégico y fundamental para el desarrollo de los ecosistemas y poblaciones que dependen de poder explotarlos de forma sostenible y sustentable (Corpoguajira y Universidad de Antioquia, 2013; Daza-Daza *et al.*, 2018; León y Acosta, 2015; Ordoñez Gálvez, 2011).

A lo largo de la historia, la escasez de agua en el departamento de La Guajira ha sido constante; situación que ha generado impactos en la satisfacción de las necesidades básicas de las comunidades locales. Esta problemática reviste gran relevancia; sin embargo, en múltiples ocasiones, ante escenarios de sequía, las autoridades regionales no han adoptado medidas efectivas ni sostenibles para enfrentarla; en consecuencia, se han incrementado los niveles de riesgo y vulnerabilidad en las zonas afectadas ([León y Acosta, 2015](#)).

Debido a la necesidad del agua potable de manera sustentable y eficiente para el desarrollo del departamento de La Guajira, es pertinente evaluar continuamente los acuíferos a través de estudios geofísicos e hidrogeológicos ([Fragozo, 2016](#)). Esta investigación tiene como objetivo caracterizar geofísicamente la Formación Monguí, para la exploración de aguas subterráneas en el corregimiento de Monguí, Riohacha (Colombia).

La Formación Monguí (N1m), según [Mosquera *et al.* \(1976\)](#), está conformada por arcillolitas arenosas de color amarillo pardo a amarillo verdoso, semicompactas e intercaladas con areniscas de color amarillo verdoso de grano medio a grueso, friables; conglomerados color amarillo pocos cohesivos, con cantos de tamaño de 0,5 a 5 cm de diámetros de origen ígneo y englobados en una matriz areno arcillosa. La formación está dispuesta por una sucesión semiconsolidada de arcillolitas a la base, que suprayace por un paquete de arenitas, finalizando al tope con un conglomerado matriz soportado semiconsolidado, lo cual le asigna una edad miocena (figura 1). Según [Rodríguez y Londoño \(2002\)](#) se encuentra cubierta discordantemente por depósitos cuaternarios (Qal) (Qca) no consolidados, con presencia de depósitos eólicos de arena fina cuarzosa.

Localización

El área de estudio está en el corregimiento de Monguí, municipio de Riohacha, departamento de La Guajira (Colombia), que limita al norte con el municipio de Riohacha; al sur, con el departamento del Cesar; y al oeste, con Venezuela (figura 1).

Metodología

Para el desarrollo de esta investigación, primero se efectuó una revisión histórica documental en diferentes bases de datos; posteriormente, se programaron salidas de campo para indagar la disponibilidad del recurso hídrico y características geológicas. De estas, se evidenció la necesidad de implementar 17 SEV aleatorios. Los datos se procesaron en el programa *IP12WIN*, diseñado para la interpretación 1D de las curvas de SEV a lo largo de un perfil. De esta manera, fue posible comparar curvas de campo con curvas sintéticas generadas de modelos hipotéticos;

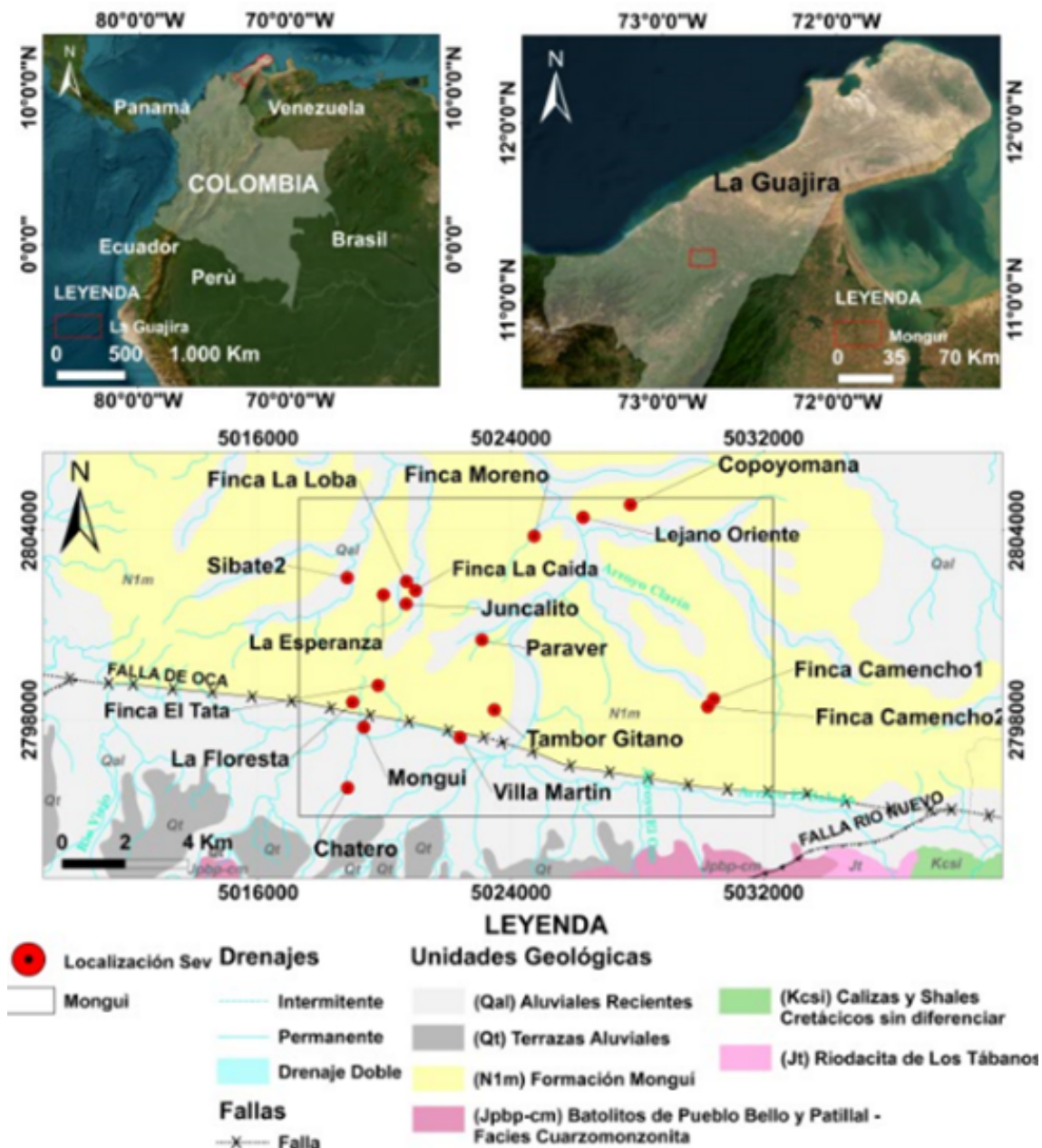


Figura 1. Localización del área de estudio

comparación que fue realizable hasta que ambos tipos de curvas alcanzaran un ajuste predefinido de bajo error (Esquivel, 2003).

Se establecieron relaciones entre los diferentes puntos de observación por medio de la elaboración de perfiles geoelectricos; se analizó la variación de la resistividad del subsuelo tanto

lateralmente como en profundidad. Con el procesamiento de los datos adquiridos y su interpretación, se diseñó el modelo geofísico de la Formación Monguí en la plancha 14IIIB. La modelación fue realizada a partir de las resistividades obtenidas a diferentes profundidades, mediante los SEV. Los datos se procesaron empleando el *software* SURFER., y se efectuó una distribución espacial de estos, en cada SEV. Esta se extendió hasta encontrarse resistividades de igual valor, para generar así zonas isorresistivas. Se elaboraron mapas de isorresistividad a diferentes niveles de cota de la siguiente manera: 60, 40, 20, 0, -20, -60, -90 y -120 m s. n. m. Estos niveles se seleccionaron con el fin de que representaran ampliamente la distribución lateral y vertical de las resistividades del subsuelo.

Resultados

Los SEV son una técnica geofísica para investigar las propiedades del subsuelo, especialmente la resistividad eléctrica de los materiales que lo componen. La interpretación de los datos obtenidos de estos sondeos y su correlación con los materiales presentes en el subsuelo son cruciales para comprender las estructuras geológicas y características hidrogeológicas de la zona de estudio.

En la tabla 1, se presentan los rangos y valores de resistividad asociados con diversos materiales geológicos; por ejemplo, aquellos altamente conductivos, como algunas capas de suelos saturados, tienden a valores de resistividad más bajos. Por otro parte, las rocas compactas, secas o con menor contenido de agua, suelen mostrar valores de resistividad más altos.

La interpretación de los datos con base en la tabla 1 ayuda a inferir la presencia de diferentes estratos geológicos, a identificar capas con aguas subterráneas, a evaluar la calidad de los acuíferos y a diferenciar la distribución de los materiales en el subsuelo.

Interpretación de las líneas geofísicas de sondeos eléctricos verticales (SEV)

En la figura 2 se ilustra la interpretación de nueve SEV, con base en el comportamiento de las resistividades. A continuación, se detallan las resistividades encontradas:

- *Figura 2A.* En los primeros metros de profundidad se presentan resistividades entre los 4,334 ohm-m y los 83,14 ohm-m correspondiente al primer paquete de materiales, constituido por sedimentos de textura muy gruesa, arenas, depósitos sin estructura, limos y arcillas. La segunda capa exhibe una resistividad de 29,11 ohm-m, relacionada con arenas finas a medias. La tercera sección se identifica con resistividad de 8,33 ohm-m integrada

Tabla 1. Rangos de resistividades

Ohm-m	Litología - Granulometría
0.1 3	Sedimentos con agua salobre
3 6.5	Arcillas y arenas de ambiente transicional saturadas.
6.5 12	Limos de ambiente transicional. Arcillas fluviales.
12 18	Limos o arenas finas saturadas (fluviales).
18 40	Arenas finas a medias saturadas.
40 120	Arenas medias a gruesas saturadas.
120 180	Gravas saturadas, rocas masivas fracturadas.
180 500	Arenas secas, rocas masivas fracturadas.
500 2000	Arenas medias a gruesas secas rocas masivas.
2000 5000	Gravas gruesas secas, rocas masivas.

por limos de ambiente transicional y arcillas fluviales. El cuarto segmento muestra resistividad de 27,14 ohm-m, asociado con arenas finas a medias., La quinta capa registra resistividad de 8,137 ohm-m, correspondientes a limos y arcillas. El sexto material reporta resistividad de 6,453 ohm-m constituida por arcillas y arenas saturadas.

- *Figura 2B.* En los primeros metros de profundidad hay resistividades entre los 31,63 ohm-m y los 152,3 ohm-m, correspondientes a sedimentos de textura muy gruesa, arenas, depósitos sin estructura, limos y arcillas. El segundo segmento presenta resistividad de 12,45 ohm-m, relacionada con limos o arenas finas. La tercera capa reporta resistividad de 3,546 ohm-m, asociada con arcillas y arenas. La cuarta sección exhibe resistividad de 11,82 ohm-m, integrada por limos de ambiente transicional y arcillas fluviales. El quinto material presenta resistividad de 149,7 ohm-m; está constituido por gravas saturadas o rocas masivas fracturadas. La sexta sección muestra una resistividad de 13,39 ohm-m relacionada con limos o arenas finas saturadas. Por último, se registra un paquete de materiales con resistividades de 0,8656 ohm-m y 2,23 ohm-m, integrado por sedimentos con agua salobre.
- *Figura 2C.* En los primeros metros de profundidad se presentan resistividades entre los 2,066 ohm-m y los 75,69 ohm-m, correspondientes al primer segmento de materiales constituido por sedimentos de textura muy gruesa, arenas, depósitos sin estructura, limos y

arcillas. La segunda capa registra una resistividad 8,375 ohm-m, relacionada con limos de ambiente transicional y arcillas fluviales. En la tercera sección hay resistividad de 2,109 ohm-m, integrada por sedimentos limos y arcillas. La cuarta capa muestra resistividad 134,6 ohm-m, asociada con gravas saturadas o rocas masivas fracturadas. La quinta capa reporta resistividad de 10,88 ohm-m, con limos de ambiente transicional y arcillas fluviales. Por último, se muestra un paquete de materiales con resistividades de 1,334 ohm-m y 1,721 ohm-m constituidos por sedimentos con agua salobre.

- *Figura 2D.* En los primeros metros de profundidad se presentan resistividades entre los 8,395 ohm-m y los 11,96 ohm-m, correspondientes al primer paquete de materiales constituido por sedimentos limos de ambiente transicional y arcillas fluviales. La segunda sección presenta un paquete de resistividades de 10,78 ohm-m y 11,31 ohm-m, y se relaciona con sedimentos limo-arenosos y arenas finas. El tercer segmento, identificado con resistividad de 83,79 ohm-m, se asocia con arenas finas a medias. El cuarto material presenta un segmento de resistividades de 15,38 ohm-m y 18,07 conformado por limos o arenas finas saturadas.
- *Figura 2E.* En los primeros metros de profundidad hay resistividades entre los 4,232 ohm-m y los 85,82 ohm-m; primer paquete de materiales constituido por sedimentos superficiales secos, arenas medias a gruesas. La segunda capa ostenta una resistividad de 12,17 ohm-m, relacionada con limos o arenas finas. La tercera sección se identifica con resistividad de 22,6 ohm-m, propia de arenas finas a medias. El cuarto segmento reporta resistividad de 3,37 ohm-m, integrada por arcillas y arenas de ambiente transicional. El quinto material tiene resistividad de 11,78 ohm-m, propia de limos de ambiente transicional y arcillas fluviales. El sexto paquete con resistividad de 44,26 ohm-m, constituido por arenas medias a gruesas saturadas. La séptima sección registra resistividad de 19,72 ohm-m, relacionada con arenas finas a medias saturadas.
- *Figura 2F.* En los primeros metros de profundidad se presentan resistividades entre los 91,42 ohm-m y 203,2 ohm-m, correspondientes al primer segmento de materiales constituidos por sedimentos superficiales y arenas secas. En la segunda sección hay una resistividad de 16,74 ohm-m, relacionada con limos o arenas finas. La tercera capa, identificada con resistividad de 184,8 ohm-m, se asocia con arenas secas o roca masiva fracturada. El cuarto paquete exhibe resistividad de 51,68 ohm-m, integrado por arenas medias a gruesas. La quinta capa reporta resistividad de 13,56 ohm-m, propia de limos o arenas finas. El sexto paquete tiene una resistividad de 196,2 ohm-m, y está constituido por arenas secas. La séptima capa, con resistividad de 9,868 ohm-m, se relaciona con limos de ambiente transicional y arcillas fluviales. Por último, la octava capa registra resistividad de 132,1 ohm-m, y está integrada por gravas saturadas o rocas masivas fracturadas.

- *Figura 2G.* En los primeros metros de profundidad se presentan resistividades entre los 10,2 ohm-m y 109 ohm-m, correspondientes al primer paquete de materiales constituido por sedimentos superficiales, arenas y arcillas secas. La segunda capa registra una resistividad de 3,907 ohm-m, relacionada con arcillas y arenas de ambiente transicional. La tercera sección se identifica con resistividad de 53,17 ohm-m, y se asocia con arenas medias a gruesas. El cuarto segmento presenta resistividad de 3,064 ohm-m, y está integrado por arcillas y arenas de ambiente transicional. El material quinto reporta resistividad de 42,76 ohm-m, correspondiente a arenas medias a gruesas. La sexta capa ostenta un paquete de materiales con resistividades de 1,516 ohm-m y 3,11 ohm-m, correspondientes a arenas y arcillas saturadas. Por último, el séptimo paquete exhibe una resistividad de 6,481 ohm-m, y está relacionado con arcillas y arenas de ambiente transicional saturadas.
- *Figura 2H.* En los primeros metros de profundidad se presentan resistividades entre los 12 ohm-m y 15,27 ohm-m, y un primer paquete de materiales constituido por sedimentos superficiales arenas y limos secos. La segunda sección exhibe una resistividad de 72,41 ohm-m, relacionada con arenas medias a gruesas. La tercera capa se identifica con un paquete de materiales con resistividades de 8,805 ohm-m y 12,44 ohm-m, integrado por limos o arenas finas. El cuarto segmento registra una resistividad de 2,339 ohm-m, asociada con arcillas o limos saturados. La quinta capa muestra una resistividad de 18,69 ohm-m, correspondiente a arenas finas a medias. Por último, el sexto material reporta una resistividad de 77,64 ohm-m, y está conformado por arenas medias a gruesas saturadas.
- *Figura 2I.* En los primeros metros de profundidad se presentan resistividades entre los 42,05 ohm-m y los 71,09 ohm-m, correspondiente al primer paquete de materiales constituido por sedimentos de arenas medias a gruesas secas. La segunda sección muestra una resistividad de 23,73 ohm-m, y se relaciona con arenas finas a medias. El tercer segmento registra una resistividad de 5,559 ohm-m, y está integrado por arcillas y arenas de ambiente transicional. La cuarta capa presenta resistividad de 8,256 ohm-m, y se asocia con limos y arcillas de ambiente transicional. El quinto material exhibe una resistividad de 1,511 ohm-m, correspondiente a sedimentos con agua salobre. La sexta capa tiene una resistividad de 20,51 ohm-m, y está constituida por arenas finas a arenas medias saturadas. Por último, el séptimo paquete muestra resistividad de 730,7 ohm-m, y está asociado con gravas saturadas o roca masiva fracturada.

Distribución de frecuencias de las resistividades de la Formación Monguí

Teniendo en cuenta que la resistividad es la oposición de un material frente al paso de corriente eléctrica, en la figura 3 se representan las distribuciones de frecuencias de las resistivi-

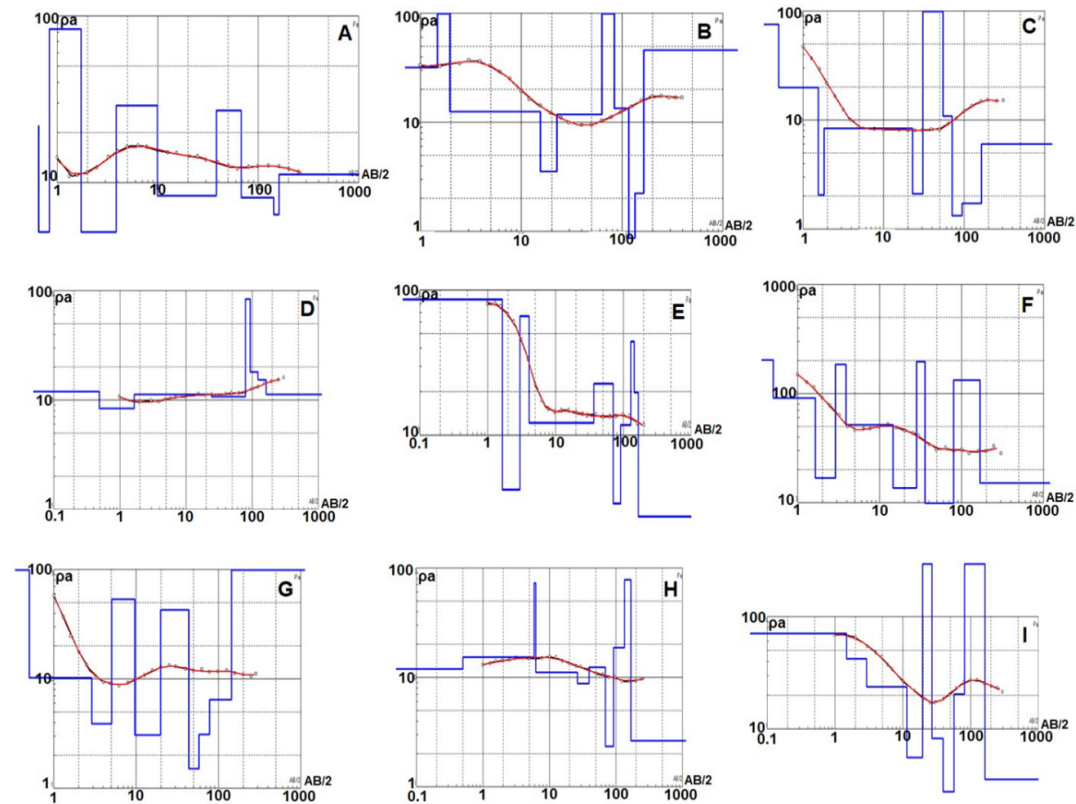


Figura 2. Líneas geofísicas de sondeos eléctricos verticales (SEV)

dades del subsuelo en la Formación Monguí, obtenidas de los SEV. Allí se observan los valores de resistividades más reiterativos en el presente estudio.

El análisis de las distribuciones de frecuencias de resistividades proporciona una visión detallada de la heterogeneidad del subsuelo en la Formación Monguí. Esas distribuciones representan prevalencia y ocurrencia de ciertos valores de resistividad en el subsuelo, y proporcionan información fundamental sobre la composición y la estructura de la Formación Monguí. Los valores de resistividad más frecuentes sugieren características geológicas particulares, como zonas de fracturación o cambios abruptos en la litología.

La observación de valores de resistividad reiterativos revela patrones significativos en la composición del subsuelo. La repetición de valores de resistividad indica presencia de capas homogéneas de material geológico con propiedades eléctricas similares como: estratos sedimentarios, rocas porosas o estratos saturados. Estas capas pueden ser de gran importancia en la evaluación de la calidad y la disponibilidad de recursos hídricos en la zona.

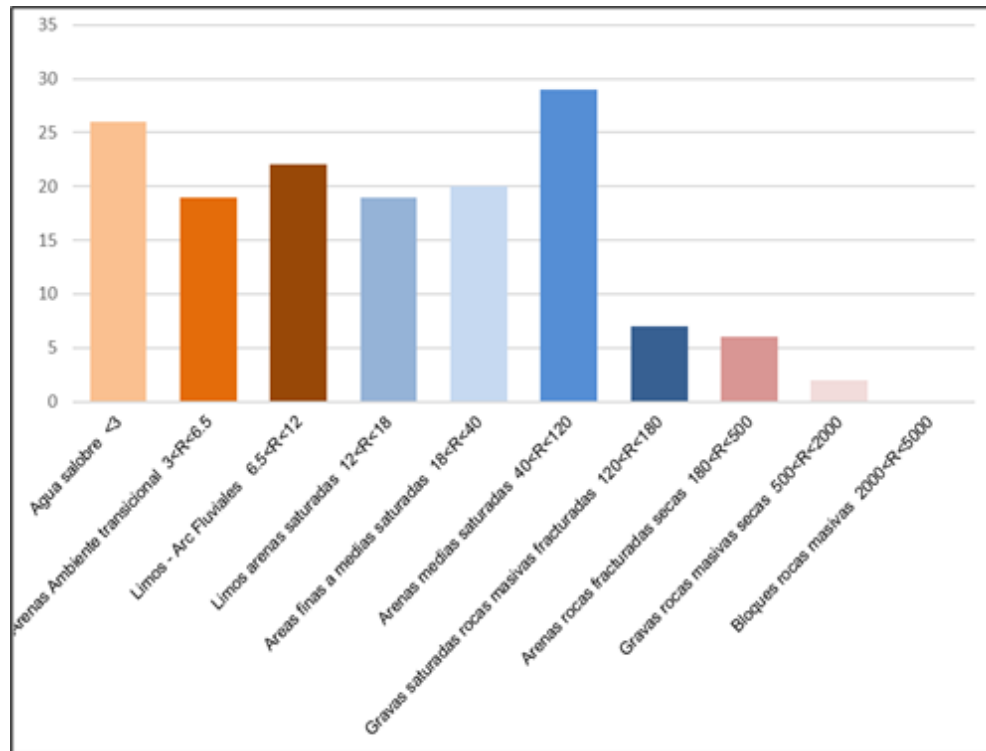
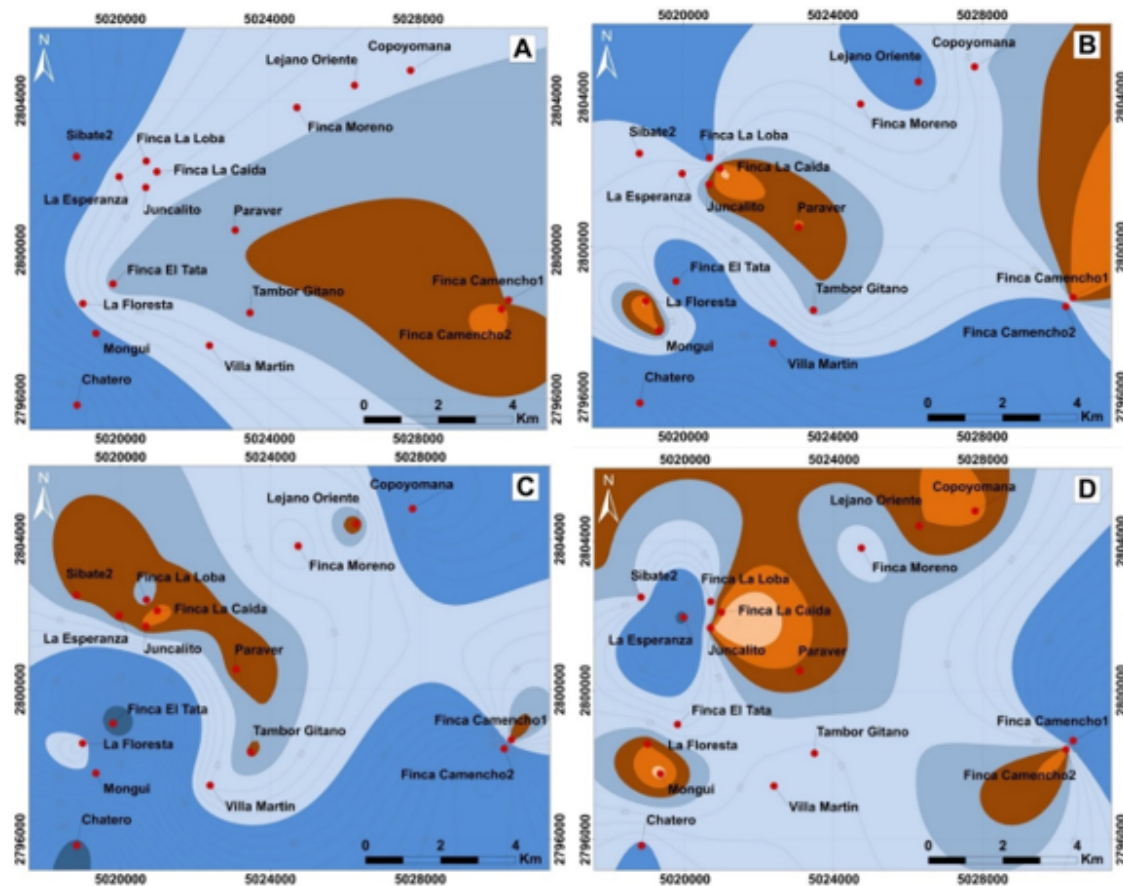


Figura 3. Distribución de frecuencias de las resistividades de la Formación Monguí

Modelación a partir de los datos geofísicos de la Formación Monguí

Las capas en la cota 60 m s. n. m. presentan interés hidrogeológico, debido a los valores de resistividad exhibidos mayores a 12 ohm-m, y están asociadas con limos y arenas de grano finos, suturadas con agua dulce o roca masiva en el área occidental en toda la distribución norte-sur (NS) de la zona evaluada en la plancha 14IIIB (figura 4A). En la cota 40 m s. n. m., los valores de interés hidrogeológico se muestran en las áreas noroeste (NO) y sur (S) de la zona (figura 4B), mientras que en la cota 20 m s. n. m. se presentan hacia el noreste (NE) y S (figura 4C), y en la cota 0 m s. n. m. los valores mayores a 12 ohm-m se distribuyen hacia el NE y el sector central sur de la zona evaluada (figura 4D).

Además, las capas en la cota -20 m s. n. m. presentan interés hidrogeológico, debido a los valores de resistividad exhibidos mayores a 12 ohm-m, y están asociadas a limos y arenas de grano finos, suturadas con agua dulce en las áreas NE y SO de la zona evaluada (figura 5A). En la cota -60 m s. n. m., los valores mayores a 12 ohm-m se distribuyen hacia el NE y SO de la zona evaluada (figura 5B), mientras que en la cota -90 m s. n. m. las zonas de interés se muestran al N y SO de la zona (figura 5C). En la cota -120 m s. n. m. los valores mayores a 12 ohm-m se distribuyen al NO y SO (figura 5D).

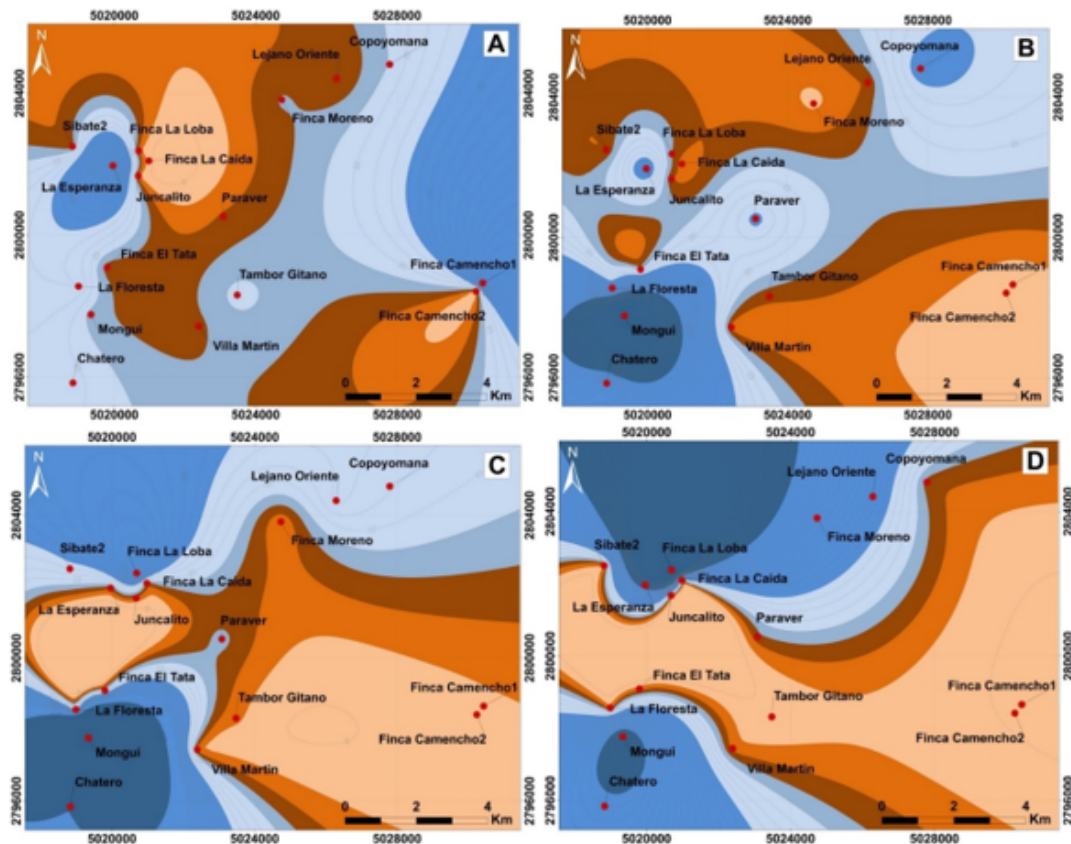


A: 60 m.s.n.m. B: 40 m.s.n.m. C: 20 m.s.n.m. D: 0 m.s.n.m.

Figura 4. Modelamiento de las resistividades de la Formación Monguí a diferentes profundidades

A: 60 m.s.n.m. B: 40 m.s.n.m. C: 20 m.s.n.m. D: 0 m.s.n.m.

Con base en la superposición de capas de los mapas de isorresistividades a diferentes niveles de cotas (60, 40, 20, 0, -20, -60, -90 y -120 m s. n. m.), se establece la probabilidad de encontrar agua subterránea si se parte de los valores de resistividad necesarios. En la zona de estudio los resultados corresponden a resistividades que oscilan entre 0,1 a 180 ohmios, donde se pueden encontrar sedimentos con agua salada, sedimentos con agua salobre y sedimentos con agua dulce. Aquellos valores que superan los 12 ohmios son de interés debido a que se asocian con limos o arenas de grano fino, saturadas con agua dulce. Se observa que el área SO de la zona evaluada es la más promisoría para la captación de agua subterránea, donde está situado el SEV de Monguí, con una profundidad de 178,02 metros en la cota -120 m s. n. m. (figura 6).



A: -20 m s. n. m. B: -60 m s. n. m. C: -90 m s. n. m. D: -120 m s. n. m.

Figura 5. Modelamiento de las resistividades de la Formación Monguí a diferentes profundidades

A: -20 m s. n. m. B: -60 m s. n. m. C: -90 m s. n. m. D: -120 m s. n. m.

Conclusiones

Debido a la aplicación de la geofísica en la exploración de aguas subterráneas en la Formación Monguí, se identificaron zonas de interés hidrogeológico, que contribuyen significativamente a la gestión eficiente y responsable de los recursos hídricos en la Formación.

La relevancia de los valores por encima de 12 ohmios, como indicadores de importancia hidrogeológica, se ha establecido y asociado principalmente con limos o arenas de grano fino, saturadas con agua dulce. Esta relación es crucial para la determinación de posibles áreas con potencial para la captación de agua subterránea en la Formación Monguí.

La zona suroeste (SO) del área evaluada se muestra como la más promisoría para la captación de agua subterránea, debido a la ubicación específica del sondeo eléctrico vertical (SEV)

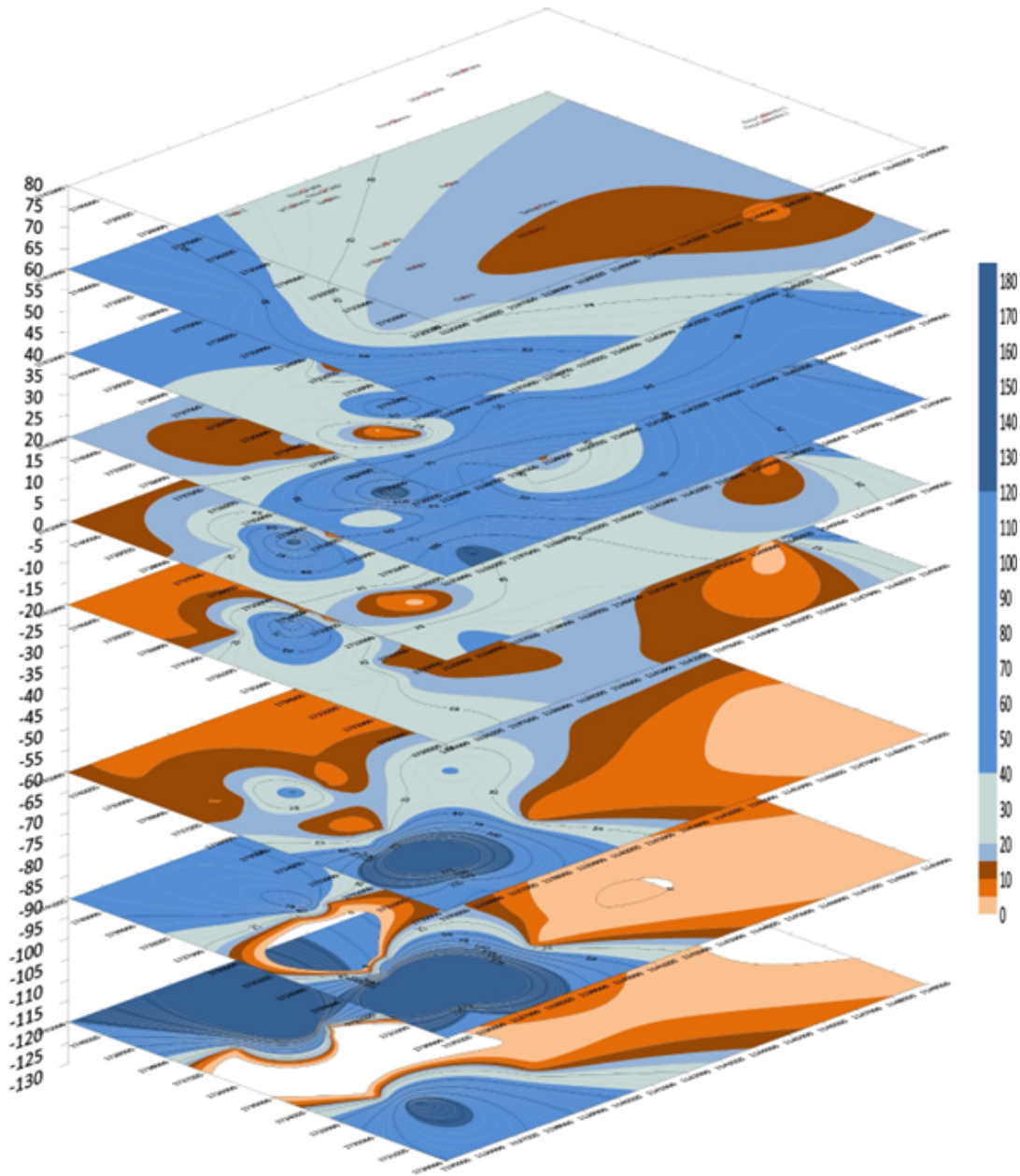


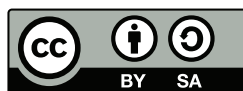
Figura 6. Modelo de superposición de resistividades a diferentes profundidades de la Formación Monguí

de Monguí, que arrojó valores de resistividad que indican la presencia probable de limos o arenas de grano fino, saturadas con agua dulce a una profundidad de 178,02 metros en la cota -120 m s. n. m. Este sector es fundamental para la toma de decisiones en la gestión de recursos hídricos, el desarrollo sostenible y la planificación de proyectos que requieren acceso a fuentes de agua subterránea.

Referencias

- Auge, M. P. (2008). *Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea*. Universidad de Buenos Aires. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/153281>
- Bakkali, S. (2006). Utilización de sondeos eléctricos para el diagnóstico del potencial hídrico de la región de Tizeght (anti-atlas marroquí). *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 7(2), 71-84. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1405-77432006000200001&script=sci_abstract
- Bhattacharya, B. B., y Shalivahan, S. (2016). *Geoelectric methods: theory and application*. McGraw-Hill Education.
- Corpoguajira y Universidad de Antioquia. (2013). *Plan de manejo ambiental de acuífero (PMAA). Cuenca del río Ranchería. Informe final*. Convenio Interadministrativo 143 de 2013. https://www.corpoguajira.gov.co/web/attachments_Joom/article/1180/Informe%20Final%20PMAA%20Fase%20I.pdf
- Daza-Daza, A. R., Rodríguez-Valencia, N., y Carabalí-Angola, A. (2018). El recurso agua en las comunidades indígenas wayuu de La Guajira colombiana. Parte 1: una mirada desde los saberes y prácticas ancestrales. *Información Tecnológica*, 29(6), 13-24. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000600013>
- Esquivel, J. (2003). *Prospección geoelectrica para agua subterránea en los municipios de Los Patios y Villa del Rosario, departamento Norte de Santander*. Subdirección de Ensayo y Servicios Tecnológicos.
- Fernández, A. (2012). El agua: un recurso esencial. *Química Viva*, 11(3), 147-170. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=86325090002>
- Fragozo Maestre, J. A. (2016). *Caracterización espacial mediante prospección geoelectrica del acuífero Moguí localizado en la cuenca del río Ranchería* [Tesis de grado, Fundación Universitaria del Área Andina]. Repositorio Institucional AREANDINA. <https://digitk.areandina.edu.co/handle/areandina/924>
- León Linares, E., y Acosta Arias, C. M. (2015). *Análisis de vulnerabilidad del territorio por sequía en el departamento de La Guajira, Colombia, a partir de una visión basada en necesidades básicas insatisfechas* [Tesis de grado, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional UCAC. <http://hdl.handle.net/10983/2706>
- Mena Hernández, A. E. (2020). *Sondeos eléctricos verticales, en la localidad de Santa María, San Pedro Huamelula, Oaxaca, para fines geohidrológicos* [Tesis de pregrado, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/11815>

- Mendoza Veirana, G. (2019). *Determinación del basamento hidrogeológico en el sector sur de la Cuenca Interserrana mediante sondeos eléctricos verticales* [Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional de la UNLP. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/98501>
- Mosquera, F., Arango, J., Carreño, J., Aguilera, H., y Valencia, M. (1976). *Exploración de acuíferos de la alta y media Guajira. Capítulo I, Geología*. Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras.
- Ordoñez Gálvez, J. J. (2011). *Cartilla técnica: aguas subterráneas-acuíferos*. Sociedad Geográfica de Lima. <https://agua.org.mx/biblioteca/cartilla-tecnica-aguas-subterraneas-acuiferos/>
- Paganini Gismondi, F. A. (2019). *Evaluación de resultados de sondeos eléctricos verticales en la prospección de agua subterránea en la provincia de Neuquén, Argentina* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Comahue]. Repositorio Digital Institucional de la UNCo. <http://rdi.uncoma.edu.ar/handle/uncomaid/15494>
- Paredes Ruiz, A. V. (2019). *Potencial acuífero mediante el sondeo eléctrico vertical (SEV) en las unidades litoestratigráficas en la zona de Agocucho 2019* [Tesis de licenciatura]. Repositorio de la Universidad Privada del Norte. <http://hdl.handle.net/11537/21795>
- Rodríguez Hernández, N. (2015). *Determinación de zonas potencialmente almacenadoras de agua a partir de sondeos eléctricos verticales en la localidad de José María Morelos, municipio de Cuapiaxtla, Tlaxcala* [Tesis de licenciatura, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla]. Repositorio de la BUAP. <https://hdl.handle.net/20.500.12371/9036>
- Rodríguez, G., y Londoño, A. C. (2002). *Memoria explicativa del mapa geológico del departamento de La Guajira. Geología, recursos minerales y amenazas potenciales*. (2.^a ed.). Instituto Nacional de Investigaciones Geológico Mineras.



Enfoque STEAM y modelo TPACK en los métodos numéricos aplicados con *software*

STEAM approach and TPACK model in Numerical methods applied with software

Sonia Valbuena Duarte ¹, Luis Márquez Herrera ², Robinson Conde Carmona ³ y María Fernanda Chiquillo Varela ⁴

Fecha de recepción: 14 de julio de 2024


Fecha de aceptación: 10 de diciembre de 2024

Cómo citar: Valbuena Duarte, S., Márquez Herrera, L., Conde Carmona, R., y Chiquillo Varela, M. F. (2024). Enfoque STEAM y modelo TPACK en los métodos numéricos aplicados con *software*. *Tecnura*, 28(82), 27-47. <https://doi.org/10.14483/22487638.22481>


Resumen

El presente estudio explora las perspectivas y experiencias de docentes en formación inicial de matemáticas, particularmente en el contexto del curso de métodos numéricos aplicados con *software*. La investigación se enmarca en el enfoque *ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas* (STEAM, por su sigla en inglés) y el modelo *conocimiento tecnológico, pedagógico y del contenido* (TPACK, por su sigla en inglés). La metodología cualitativa adoptada utiliza un diseño de casos múltiples y emplea herramientas como cuestionarios, observación participante, grupos focales y registros audiovisuales. La muestra está compuesta por 16 docentes en formación inicial de una universidad pública en la costa Caribe colombiana. Según los resultados, la apropiación de conocimientos y habilidades por parte de los docentes en formación promueve el pensamiento tecnológico y creativo, así como el fortalecimiento de las habilidades matemáticas y tecnológicas. En conclusión, se sugiere la implementación del enfoque STEAM y el modelo TPACK como una alternativa efectiva para potenciar la enseñanza de métodos numéricos en el ámbito educativo.

Palabras clave: métodos numéricos, enfoque STEAM, modelo TPACK, docente de matemática en formación, *softwares* matemáticos.

¹Licenciada en Matemáticas y Física, especialista en Informática, especialista en Física, Msc. en Educación, M. C. en Matemática, Ph. D. en Ciencias- Matemática. Docente de Licenciatura en Matemáticas, Universidad del Atlántico (Colombia) . Líder de grupo de investigación GIMED, investigador sénior MinCiencias. Correo electrónico: soniabalbuena@mail.uniatlantico.edu.co

²Licenciado en Matemática. Correo electrónico: larquezh@mail.uniatlantico.edu.co

³Licenciado en Matemáticas; especialista en Métodos Numéricos Aplicados; Ph. D. en Educación Matemática. Docente de cátedra, Licenciatura en Matemática, Universidad del Atlántico  y Universidad de La Salle (Colombia). Integrante del grupo de investigación GIMED. Investigador asociado. MinCiencias. Correo electrónico: rjconde@mail.uniatlantico.edu.co

⁴Licenciada en Matemática(e). Correo electrónico: mfchiquillo@mail.uniatlantico.edu.co

Abstract

This study explores the perspectives and experiences of pre-service mathematics teachers, specifically within the context of the course on numerical methods applied with software. The research is framed within the STEAM (Science, Technology, Engineering, Arts, and Mathematics) approach and the TPACK (Technological Pedagogical Content Knowledge) model. The qualitative methodology employed utilizes a multiple-case design, incorporating tools such as ad-hoc questionnaires, participant observation, focus groups, and audiovisual records. The sample consists of 16 pre-service mathematics teachers from a public university in the Colombian Caribbean region. Results reveal the acquisition of knowledge and skills by pre-service teachers, emphasizing the promotion of technological and creative thinking, along with the enhancement of mathematical and technological skills. In conclusion, the implementation of the STEAM approach and the TPACK model emerges as an effective alternative for enhancing the teaching of numerical methods in the educational context.

Keywords: Numerical Methods, STEAM Approach, TPACK Model, Pre-service Mathematics Teacher, Mathematical Software.

Introducción

En el escenario educativo internacional, la pedagogía de las matemáticas ha sufrido una metamorfosis radical con la incorporación de la tecnología digital. Esta transformación no solo ha reconfigurado los métodos didácticos convencionales, sino que también ha abierto nuevos caminos para examinar nociones matemáticas intrincadas de una manera más interactiva y asequible. Así, el empleo de técnicas numéricas se ha vuelto un elemento medular, al brindarles a los discentes un enfoque pragmático y aplicado de las matemáticas, lo cual les permite entender y resolver problemáticas del mundo real con eficacia ([Castro-Maldonado et al., 2023](#), [Chai, 2019](#), [Buteau et al., 2022](#), [Hidalgo et al., 2023](#)).

La computación ofrece una vasta variedad de herramientas para modelar fenómenos complejos y ejecutar cálculos sofisticados que anteriormente hubiesen sido irrealizables. Así, los estudiantes pueden articular conceptos abstractos al explorar escenarios y datos reales, en lugar de limitarse a fórmulas descontextualizadas. Esta orientación práctica motiva su aprendizaje y les dota de competencias valiosas para encarar los desafíos contemporáneos. En definitiva, la incursión de la informática ha revolucionado la educación matemática, y la ha hecho más tangible, atractiva y relevante para los educandos ([Atmojo et al., 2022](#)).

En particular, los métodos numéricos, una rama esencial de las matemáticas, han adquirido una relevancia renovada en la era digital. Además de fundamentales para la aproximación y resolución de problemas matemáticos que de otro modo serían intratables, se han convertido en una herramienta indispensable en la enseñanza y el aprendizaje matemático para el caso. La habilidad para implementar métodos numéricos mediante *software* y aplicaciones tecnológicas enriquece la comprensión

de los estudiantes sobre conceptos matemáticos, y los prepara para aplicaciones prácticas en diversas disciplinas científicas y de ingeniería (Karampelas, 2023).

Esta nueva era exige que los profesores de matemáticas en formación desarrollen competencias tecnológicas sólidas, ya que su papel va más allá de la simple transmisión de conocimientos matemáticos (Valbuena *et al.*, 2021). Ellos deben estar equipados para guiar a los estudiantes a través de un paisaje educativo donde la tecnología desempeña un papel central. Desarrollar estas competencias mejora su capacidad para enseñar matemáticas de manera efectiva, y les permite integrar métodos numéricos y herramientas tecnológicas en su enseñanza; así, enriquecen la experiencia de aprendizaje (Buteau *et al.*, 2022).

En este sentido, la incorporación de métodos numéricos en la formación de profesores de matemáticas ofrece múltiples ventajas como el hecho de facilitar una comprensión más intuitiva y aplicada de conceptos matemáticos, facilitar la simulación de escenarios complejos y proporcionar una oportunidad para que los estudiantes experimenten con aplicaciones prácticas de las matemáticas (Chai, 2019, Montes *et al.*, 2023). Esta experiencia práctica es invaluable, ya que prepara a los estudiantes para los desafíos del mundo real y fomenta una apreciación más profunda de la utilidad y la belleza de las matemáticas.

Para articular efectivamente la integración de la tecnología y los métodos numéricos en la enseñanza de las matemáticas, es esencial adoptar metodologías y marcos pedagógicos adecuados. Enfoques como el de *ciencia, tecnología, ingeniería, arte y matemáticas* (STEAM, por su sigla en inglés) y el modelo *conocimiento tecnológico, pedagógico y de contenido* (TPACK) ofrecen estructuras sólidas para esta integración. STEAM, por ejemplo, enfatiza un enfoque interdisciplinario, donde las matemáticas se conectan con otras disciplinas, mientras que TPACK se centra en la integración efectiva de la tecnología en la enseñanza (Chai, 2019, Chai *et al.*, 2020, Karampelas, 2023, Merlano *et al.*, 2022).

Sin embargo, surge una interrogante fundamental: ¿cómo se puede diseñar e implementar una estrategia que no solo integre de manera efectiva los métodos numéricos y la tecnología en la enseñanza de las matemáticas, sino que también prepare a los profesores de matemáticas en formación para utilizar estos recursos de manera innovadora y pedagógica? Este problema de investigación plantea la necesidad de explorar estrategias y prácticas educativas que puedan unir los beneficios de la tecnología, los métodos numéricos y los marcos pedagógicos modernos, a la vez que creen un enfoque de enseñanza de matemáticas verdaderamente integrado.

Investigaciones recientes como las de Lv y otros autores (Lv *et al.*, 2023, Karampelas, 2023, Merlano *et al.*, 2022, Torggler *et al.*, 2023) muestran que en el estado del arte existe una tendencia a investigar la integración de los enfoques STEAM y TPACK en la enseñanza de las matemáticas, mediante

el uso de tecnología. Estos estudios señalan un camino prometedor para abordar las preocupaciones planteadas en el presente trabajo, respecto a cómo diseñar e implementar estrategias efectivas que integren métodos numéricos, tecnología y marcos pedagógicos innovadores en la formación de profesores de matemáticas. La literatura reciente apunta a la necesidad de seguir explorando el potencial de unir los beneficios del enfoque STEAM, el modelo TPACK y los recursos tecnológicos en la enseñanza de las matemáticas.

A pesar de los avances reportados en la literatura, se identifican importantes limitaciones en los estudios revisados. En primer lugar, existe una escasez de investigaciones que aborden específicamente la integración simultánea de métodos numéricos, tecnología y marcos pedagógicos como STEAM y TPACK en la formación inicial de profesores de matemáticas. Además, los estudios existentes tienden a enfocarse en contextos educativos específicos sin considerar las particularidades y desafíos propios de la formación docente en matemáticas. Por otra parte, se evidencian problemas recurrentes en la formación inicial de profesores de matemáticas, entre ellos la dificultad para integrar conocimientos tecnológicos con contenidos pedagógicos y disciplinares, la falta de experiencias prácticas significativas con métodos numéricos aplicados, y la limitada preparación para implementar enfoques interdisciplinarios en sus futuras prácticas docentes. Estas limitaciones y problemáticas revelan una brecha significativa entre el potencial teórico de la integración tecnológica y su implementación efectiva en la formación de futuros profesores de matemáticas, lo cual justifica la necesidad de investigar las experiencias y perspectivas de los docentes en formación respecto a esta integración.

Esta investigación surge con el propósito de conocer las perspectivas, experiencias y opiniones de los docentes en formación de licenciatura en matemáticas, a partir del enfoque STEAM y el modelo TPACK. El trabajo se desarrolló durante un semestre, durante el curso electivo denominado Métodos Numéricos Aplicados con Software.

TPACK y enseñanza de matemática

El modelo TPACK ha permeado diversos campos educativos en los que se busca integrar tecnologías digitales para potenciar los aprendizajes. Autores como ([Chai et al., 2013](#), [Chai et al., 2020](#), [Si-mangunsong et al., 2023](#)) han revisado su creciente influencia como marco teórico y práctico para comprender esta integración.

En educación matemática, múltiples estudios dan cuenta de iniciativas basadas en TPACK para formación inicial docente ([Merlano et al., 2022](#), [Karampelas, 2023](#), [Chai et al., 2020](#), [Chai, 2019](#)), evaluación de competencias tecnopedagógicas ([El Nagdi et al., 2018](#), [Harris y Hofer, 2011](#)) y diseño de intervenciones para áreas como geometría, álgebra o cálculo ([Valbuena-Duarte et al., 2021](#), [Berrió et](#)

al., 2021, OzgunOzgun *et al.*, 2010, Willis *et al.*, 2023, Pedraza y Valbuena, 2014, Duarte y Roca, 2014) y otras en campos propios de la computación (Trejos-Buriticá y Muñoz-Guerrero, 2023).

Específicamente, en campos más avanzados como la enseñanza de programación y métodos numéricos, también existen antecedentes. Por ejemplo, en programación computacional, se ha adaptado y validado el instrumento TPACK considerando aspectos propios de este dominio (Rodríguez *et al.*, 2021). Los hallazgos revelan dificultades para que los futuros profesores integren conocimientos pedagógicos y de programación al seleccionar tecnologías para la enseñanza. Asimismo, (Kong *et al.*, 2017) emplearon el modelo TPACK para el diseño de un curso sobre métodos matemáticos asistido por tecnologías. Los resultados muestran aumentos significativos en las subdimensiones del conocimiento tecnológico y pedagógico de los participantes.

Por tanto, el objetivo de esta investigación es analizar las perspectivas, experiencias y percepciones de los docentes en formación de licenciatura en matemáticas sobre la integración de métodos numéricos, tecnología y marcos pedagógicos STEAM y TPACK durante el desarrollo de la asignatura Métodos Numéricos Aplicados con Software.

STEAM y enseñanza de matemática

STEAM corresponde a la integración de las disciplinas de ciencia, tecnología, ingeniería, artes y matemáticas, y representa una evolución de este movimiento, el cual busca otorgar mayor énfasis al desarrollo creativo y las habilidades de diseño e innovación en los estudiantes (El Nagdi *et al.*, 2018, Atmojo *et al.*, 2022, Chai, 2019, Lv *et al.*, 2023, Watson y Watson, 2013). Se espera que al aplicar principios STEAM en educación matemática se logren beneficios como: mayor motivación estudiantil al conectar contenidos teóricos con proyectos interdisciplinarios, desarrollo de pensamiento crítico y resolución de problemas ante desafíos reales, comprensión integrada de conceptos complejos, y construcción de competencias digitales en áreas de modelado, simulación y diseño (Herro y Quigley, 2017, Díaz *et al.*, 2023).

Si bien su implementación en matemáticas escolares es aún incipiente, el potencial parece prometedor. En programación, algunos trabajos como el de (Kokotsaki *et al.*, 2016) mostraron cómo proyectos de robótica y modelado 3D con enfoque STEAM mejoran habilidades técnicas y motivación de estudiantes. Por su parte, (Moreno *et al.*, 2021) evidenciaron beneficios en términos creativos y de aprendizaje al integrar programación y música con electrónica en proyectos STEAM.

En métodos numéricos avanzados, (El Nagdi *et al.*, 2018, Teo y Ke, 2014) señalan que STEAM entrega un marco propicio para motivar a los estudiantes e impulsar soluciones innovadoras que integren tecnologías emergentes. Finalmente, en formación de profesores de matemáticas, desarro-

llar competencias STEAM parece clave para su futuro desempeño profesional en aulas con crecientes demandas por proyectos interdisciplinarios.

En conclusión, aunque se requiere más evidencia, integrar el enfoque STEAM en educación matemática y áreas como programación o métodos numéricos parece una alternativa fructífera para conectar la enseñanza con necesidades profesionales actuales.

La tecnología en la enseñanza de los métodos numéricos

Métodos numéricos para la interpolación, aproximación, integración y derivación numérica son fundamentales, debido a su amplia aplicabilidad en la ciencia, la ingeniería y la economía. Sin embargo, históricamente su enseñanza ha sido muy teórica, con poca oportunidad para que los estudiantes experimenten con aplicaciones reales. La tecnología abre nuevas posibilidades para un aprendizaje práctico y significativo de estos métodos con *software* especializado como *MatLab*, *Mathematica*, *Octave* y *Mathcad* entre otros, dando la oportunidad al estudiante de trabajar con algoritmos avanzados para analizar y visualizar datos experimentales; esto promueve una comprensión más profunda y experiencial de los conceptos (Buteau *et al.*, 2022, Berrío *et al.*, 2021). Por otro lado, los proyectos STEAM ofrecen oportunidades de aplicar creativamente conceptos de análisis numérico en contextos interdisciplinarios de arte computacional, diseño industrial o telecomunicaciones (Sotiriou *et al.*, 2023).

Por otra parte, para implementar efectivamente estas tecnologías, los docentes requieren una sólida base en TPACK: entendimiento conceptual de los métodos numéricos (CK), estrategias pedagógicas activas centradas en la indagación (PK), y habilidades técnicas en lenguajes de programación como *Matlab*, *Octave*, *Excel*, *Python*, *Mathematica* u otros (TK) (Merlano *et al.*, 2022).

La tecnología es clave para una enseñanza de los métodos numéricos contextual, práctica y centrada en la indagación. Marcos teóricos como TPACK y STEAM sirven de guía para que los docentes integren efectivamente estas herramientas en pos de un aprendizaje significativo, y que promuevan creatividad, pensamiento crítico y competencias evaluadas en la actualidad (Karampelas, 2023).

El objeto de estudio de esta investigación son las experiencias vividas por docentes en formación de licenciatura en matemáticas, durante el desarrollo de la asignatura de métodos numéricos aplicados con *software*, y cómo el uso de la tecnología mejoró y facilitó su aprendizaje e interpretación de los métodos.

Materiales y método

Teniendo en cuenta el objetivo de estudio, se adopta un enfoque cualitativo, debido a que este busca la comprensión, interpretación y análisis en profundidad de experiencias de estudiantes en

relación con el enfoque STEAM y el modelo TPACK. Además, porque le otorga relevancia al diseño de estudio de casos múltiples (Dawson, 2007), ya que describe la experiencia de cada docente en formación con la asignatura de métodos numéricos. Con el fin de obtener una conclusión general y detallada del contenido, que se lleva a cabo durante la asignatura.

Participantes

Participan 16 docentes de matemáticas en formación inicial de una universidad pública del departamento de Atlántico (Colombia), que cursan una electiva de métodos numéricos aplicados con *software*. Se oferta a estudiantes de octavo a noveno semestre. La muestra es conformada por 10 hombres y 6 mujeres con edades entre 21 y 26 años. Los criterios de selección de muestra son por conveniencia propia al estudio que estuvieran matriculados en el curso electivo.

Técnicas e instrumentos

Se diseñan y aplican dos cuestionarios. El primero tiene 13 preguntas, entre única respuesta y abiertas, por Google Forms, y se divulga por WhatsApp. En el segundo responden 10 preguntas abiertas. Además, se realizan observaciones participantes (Busetto *et al.*, 2020) en todas las clases, con registros audiovisuales y fotográficos de las sesiones presenciales, grabadas también por Meet. Luego, se hace un grupo focal para conocer opiniones, percepciones y experiencias de los participantes con la asignatura (tabla 1).

Tabla 1. Técnicas e instrumentos para la recolección de información y sus objetivos

Técnicas e instrumentos	Objetivo
Encuestas	Conocer la experiencia de los docentes en formación con relación a la electiva de métodos numéricos aplicados con <i>software</i>
Observación participante	Conocer las actividades, trabajos e interacciones que se presentaron en el desarrollo de la electiva de métodos numéricos aplicados con <i>software</i>
Grupo focal	Conocer la forma en que los docentes en formación vivieron su experiencia en las aplicaciones de métodos numéricos con <i>software</i>
Registro audiovisual	Tener acceso a las clases y actividades realizadas por <i>Meet</i> y evidencias de estas

Resultados

En este estudio se presentan hallazgos sobre las opiniones, experiencias y vivencias de los docentes en formación que cursaban la electiva de Métodos Numéricos Aplicados con Software. Mediante cuestionarios, observación participante y un grupo focal, se evaluaron componentes como: (a) disciplinar, (b) teoría y práctica, (c) tecnología, (d) creatividad y (e) experiencias, con el fin de obtener percepciones sobre el desarrollo de clases y cómo la asignatura aportaba a su formación en relación

con los enfoques STEAM y el modelo TPACK. En el primer cuestionario, más de la mitad reconocía el enfoque STEAM, mientras que el 40 % no tenía conocimientos previos, por lo que se indagó si lo identificaban durante la asignatura; así, se destacaron componentes como el uso de tecnología para resolver métodos numéricos. La observación participante dio a conocer el desarrollo de las actividades, y el grupo focal confirmó las experiencias descritas en los cuestionarios.

Ya que se usan programas como *Matlab*, *Octave* y *Excel*, es fundamental explorar las capacidades de estas herramientas y evaluar si sus componentes tecnológicos facilitan el aprendizaje. El más utilizado en este estudio fue *Matlab*, seguido por *Octave* y *Excel*. Según los resultados, el uso de *software* especializado para implementar métodos numéricos complejos les permite a los futuros docentes de matemáticas tener una comprensión más práctica y aplicada de conceptos matemáticos abstractos. Al modelar y resolver problemas reales mediante simulaciones y herramientas computacionales, se promueve un aprendizaje significativo, ya que se conectan las matemáticas con otras disciplinas y contextos profesionales, gracias a lo cual se aprecia la utilidad y aplicabilidad de los conceptos matemáticos en situaciones prácticas, y se fomenta una mayor motivación y compromiso con el aprendizaje.

Asimismo, el enfoque STEAM posibilita a los profesores en formación desarrollar proyectos interdisciplinarios que integren creativamente el conocimiento de métodos numéricos con aplicaciones tecnológicas innovadoras en campos como ingeniería, arte computacional o análisis de datos. Esto redunda en un aprendizaje situado y en una valoración más profunda de la utilidad de las matemáticas para dar solución a problemáticas contemporáneas.

La simbiosis entre dominio conceptual de métodos numéricos, alfabetización digital y enfoque STEAM en la formación docente empodera a los futuros profesores de matemáticas para implementar metodologías de enseñanza activas y contextualizadas, que preparen significativamente a las nuevas generaciones para los requerimientos de un mundo cada vez más tecnológico e interdisciplinario.

Categorías de análisis desde los marcos teóricos STEAM y TPACK

Para el análisis de los resultados se establecieron categorías específicas derivadas de los marcos teóricos STEAM y TPACK; estas ayudan a valorar, de manera sistemática, las experiencias y perspectivas de los docentes en formación:

Categorías del enfoque STEAM

Ciencia (S): aplicación del método científico y pensamiento crítico en la resolución de problemas numéricos. Tecnología (T): uso e integración de *software* especializado (*Matlab*, *Octave*, *Excel*) en el

proceso de aprendizaje. Ingeniería (E): diseño y desarrollo de soluciones computacionales para problemas matemáticos complejos. Arte (A): desarrollo de creatividad, innovación y diseño en la creación de aplicaciones interactivas. Matemáticas (M): comprensión y aplicación de métodos numéricos como interpolación, derivación e integración.

Categorías del Modelo TPACK

Conocimiento del contenido (CK): dominio conceptual de métodos numéricos y teorías matemáticas. Conocimiento pedagógico (PK): estrategias didácticas, metodologías de enseñanza y habilidades docentes. Conocimiento tecnológico (TK): Competencias en programación, manejo de software y herramientas digitales. Intersecciones TPACK: Integración efectiva de conocimientos disciplinares, pedagógicos y tecnológicos.

Estas categorías guían el análisis de las respuestas de los cuestionarios, observaciones y grupos focales, y ayudan a identificar cómo se articulan funcionalmente ambos marcos teóricos en la formación de futuros docentes de matemáticas.

Para caracterizar el componente de arte en el enfoque STEAM, se formula el siguiente interrogante: “¿Sentiste que tu imaginación y creatividad estaban restringidas durante las clases? Explica tu respuesta”. En su mayoría, se registran respuestas negativas, con las cuales expresan que el ambiente de participación y la metodología de la clase fomentaron la imaginación y creatividad a la hora de realizar las actividades propuestas. Esto se observa en las siguientes respuestas: docente uno (D1): “No, puesto que siempre se nos permitió ser miembros activos de la clase, y la docente ha estado dispuesta a escucharnos”; docente dos (D2): “No. Realmente siento que conocer un nuevo lenguaje de programación me permitió desarrollar imaginación y, en consecuencia, la creatividad también tomó rumbo a mi favor. Es decir, sentí que mi creatividad también se desarrolló”.

Luego, al ser docentes en formación, se busca indagar la influencia que generó cursar la electiva en su práctica pedagógica con el siguiente interrogante: “Luego de ver la asignatura, ¿consideras que enriqueció tu práctica pedagógica? ¿En qué aspectos?”. En las respuestas se encuentra cómo el uso de la tecnología impactó a los estudiantes del curso y cómo, con la ayuda de estas herramientas, se puede aprender matemáticas, además de que despertó el interés por nuevas áreas de conocimiento para el aprendizaje. Se ve en respuestas como: docente uno (D1): “Sí, esta asignatura me ayudó a expandir mis horizontes sobre otros campos en los que se puede desarrollar un licenciado en matemáticas y aportó significativamente a mi forma de ver la programación”; docente dos (D2): “Sí. No consideré antes que las matemáticas podían enseñarse con desarrollo de códigos. Ahora pienso que su enseñanza en sociedades globalizadas debe considerar estos aspectos, pues apuntan al desarrollo de nuevas tecnologías”; docente (D): “La enriqueció en manejo de *software*. La enseñanza de mate-

máticas de la mano con herramientas informáticas”.

Los hallazgos resaltan que cursar una asignatura enfocada en métodos numéricos mediante programa especializado amplía los horizontes pedagógicos de los profesores de matemáticas en formación. Al experimentar directamente cómo estas técnicas computacionales permiten modelar y resolver problemas complejos, los docentes aprecian el potencial de integrar códigos y programación en la enseñanza de las matemáticas. Esto les proporciona nuevas competencias para analizar contenidos matemáticos en contexto y acorde a las demandas de la era digital. Además, dominar métodos numéricos mediante prácticas con tecnología les ayuda a diseñar actividades de aprendizaje significativo, donde sus estudiantes puedan aplicar conceptos abstractos en la solución de problemas reales de diversas disciplinas.

Como pregunta final (“¿Consideras positivo el uso de la tecnología en la enseñanza de las matemáticas? ¿Por qué?”), se busca conocer la percepción de los estudiantes sobre la integración de la tecnología en el proceso de enseñanza de las matemáticas. En las respuestas se identifica un impacto positivo respecto al uso de la tecnología. Esto se expresa en respuestas de algunos docentes como: docente (D): “La tecnología facilita la visualización de conceptos matemáticos abstractos. Gráficos interactivos, simulaciones y herramientas de visualización pueden ayudar a los estudiantes a comprender mejor los conceptos complejos al ver representaciones visuales”; docente (D): “Sí, porque las matemáticas usan pensamiento computacional, y utilizar estas tecnologías hace que el estudiante interiorice más el aprendizaje, siendo una buena práctica”.

Según los resultados del segundo cuestionario, sobre el modelo TPACK, el 30 % lo conocen por lecturas, lo cual no es relevante ni interfiere en el análisis, dado que no se evalúa puntualmente. La mayoría no está familiarizada con programación, lo cual no impidió el desarrollo y apropiación de las clases; las cuales se iniciaron con fundamentos y brindaron herramientas y recursos para la apropiación del lenguaje.

En el desarrollo de la electiva se usó con mayor frecuencia el programa *MatLab*, el cual fue trabajado en línea y la mayoría de los estudiantes consideran que les facilita resolver problemas con métodos numéricos. Un docente (D) responde: “Dentro de las herramientas tecnológicas que me ayudaron en el curso, destaco el software *MatLab*, puesto que a partir de la creación de códigos de métodos numéricos iterativos reduce el tiempo necesario para resolver problemas y ejercicios, y permite centrarnos en aspectos más importantes como la interpretación de resultados y el significado implícito de cada método”.

Por otra parte, los docentes en formación consideran que durante el curso no solo se maneja conocimiento disciplinar y didáctico, sino que también se desarrolla lo práctico y teórico, ya que cada tema se ponía en práctica mediante *software*. Según las indagaciones, el conocimiento tecnológico es

fundamental para el buen desarrollo de la electiva. Los estudiantes tuvieron la oportunidad de presenciar diferentes formas en que se aplican recursos y herramientas tecnológicas en la enseñanza de contenidos de la electiva, con lo cual se logró desarrollar nuevas habilidades y fortalecer conocimientos.

El 100 % de los docentes en formación, antes del curso, no había experimentado el uso de tecnología para resolución de problemas con métodos numéricos. Esto fue nuevo e innovador, y constituyó un gran aporte para su profesión al experimentar distintas formas de analizar la resolución de problemas por métodos numéricos. Los docentes en formación demostraron buena disposición al uso de herramientas y *software* para las actividades y clases.

Por último, los participantes manifiestan que haber cursado la electiva les hizo comprender distintas formas de solucionar problemas por medio de recursos tecnológicos y *software*, con los que sus estudiantes puedan experimentar y explorar conceptos matemáticos complejos, y visualizarlos. Gracias a esos programa, pueden dimensionar y representar problemas numéricos para un análisis visual de lo que sucede al resolverlos.

Observación participante y grupo focal en sustentaciones de proyectos

Los proyectos finales desarrollados por los futuros profesores evidencian una apropiación profunda de conceptos de métodos numéricos, al diseñar creativamente aplicaciones con *software* que integran interpolación, derivación numérica, sistemas de ecuaciones lineales y otras técnicas para modelar situaciones matemáticas complejas. Los programas computacionales especializados les ayudó a implementar algoritmos sofisticados, analizar visualmente los resultados y validar soluciones; lo que demuestra las ventajas de la computación para comprender y aplicar métodos numéricos.

Asimismo, al vincular sus aplicaciones a contextos educativos, pusieron en práctica los principios STEAM, y conectaron las matemáticas con la tecnología y la ingeniería computacional para crear recursos digitales interactivos e innovadores.

Asimismo, evidenciaron la integración efectiva de conocimientos disciplinares, pedagógicos y tecnológicos (TPACK), al emplear *software* de forma didáctica para facilitar la enseñanza y el aprendizaje de las matemáticas. El desarrollo de estos proyectos consolida la importancia de los métodos numéricos y el uso de tecnología en la formación STEAM de los futuros docentes de matemáticas, para empoderarlos en metodologías activas apoyadas en computación.

Durante la observación de la sustentación y las respuestas del grupo focal, se evidenció variedad de temáticas correspondientes a la construcción de cada aplicación; expresaron creatividad e innova-

ción en cada diseño, y una apropiación de las herramientas que les ofrecía el *software*. Esta actividad, junto con el desarrollo total del curso, fue destacada por los estudiantes debido a la metodología de la clase al ser desarrollada de forma práctica y teórica haciendo uso de la tecnología. Esto se alinea con la investigación realizado por ([Kong et al., 2017](#)) quienes, al aplicar el modelo TPACK en un curso de métodos matemáticos, desarrollaron el conocimiento pedagógico y tecnológico en los participantes.

De igual forma sucede con los docentes en formación, lo que se infiere de por sus apreciaciones en el grupo focal y en la exposición de sus trabajos. Ellos expresan que fue un reto usar la tecnología y a su vez relacionarla con el contenido matemático propuesto en el curso, lo cual los llevó a consolidar el contenido disciplinar necesario para cumplir con los objetivos del curso. Todo esto fue propiciado por el uso de los componentes del enfoque STEAM y da indicios de la motivación que surge en los estudiante al hacer uso de este enfoque, lo cual se evidenció por medio de los comentarios de los docentes.

Además, los comentarios de los docentes del grupo focal tuvieron como punto en común el beneficio que les generó recurrir a la tecnología para su formación como docentes en matemáticas; manifestaron que les despertó su interés por profundizar en esta herramienta como metodología de aprendizaje, por lo que alcanzaron un manejo sobresaliente de los diferentes programas utilizados, como se pudo evidenciar en la presentación de las aplicaciones tras demostrar un conocimiento profundo de cada función de las herramientas computacionales y de la capacidad para generar líneas de código de cada una de las temáticas vistas en la electiva.

A diferencia de los hallazgos en la investigación de Rodríguez y otros autores ([Rodríguez et al., 2021](#)), que encontraron dificultades en la integración de los conocimientos pedagógicos y de programación, podemos resaltar la importancia de la metodología empleada para llevar a cabo la relación de estas áreas de conocimiento y también las facilidades que otorga la parte computacional para lograr la conexión de ambos conocimientos. A pesar de que al inicio del curso un grupo significativo no tenía conocimiento previo de programación computacional (como mencionan en el grupo focal que se realizó al final del curso), lograron la comprensión de cada temática de la electiva, desarrollar interés por el uso de herramientas digitales y el pensamiento crítico al interesarse por conocer a profundidad las ventajas del uso de software. Lo anterior es lo esperado al considerar durante el transcurso de la electiva elementos del enfoque STEAM al contemplar los beneficios descritos por ([Moreno et al., 2021](#), [El Nagdi et al., 2018](#), [Chai, 2019](#), [Sotiriou et al., 2023](#)) en el empleo de este enfoque.

A continuación, se presenta una muestra de las aplicaciones presentadas por los docentes en formación durante las socializaciones y los desarrollos realizados en los grupos focales llevados a cabo en el curso (figura 1). En general, se destaca el uso de los conocimientos adquiridos en el transcurso de la electiva, como el lenguaje de programación y los diferentes temas de métodos numéricos para

resolver problemas de las ciencias.



Figura 1. Socialización de aplicaciones

En la figura 2 del lado izquierdo se presenta un listado de recomendaciones, elaborado por los docentes, para su implementación óptima. En la misma figura del lado derecho se presenta la interfaz creada por uno de los equipos de docentes en formación en la cual se expone cómo utilizar diferentes métodos tales como *bisección*, *secante* y Newton, Raphson para calcular raíces de ecuaciones no lineales y de sistemas de ecuaciones en el último método; con la applets interactivas creadas por los estudiantes, pudieron modelar visualmente ideas abstractas como convergencia, error o estabilidad de los métodos iterativos, modificar parámetros de entrada vía interface creada y observar estos efectos dinamicamente.

En el diseño utilizaron varias herramientas que proporciona *MatLab*: el “Tab group”, para organizar cada método en pestañas, botones para crear interfaces, tablas, cajas de texto editables y no editables, entre otras.

Con la figura 3 se crea un ambiente de aprendizaje digital, mediante la aplicación de diferentes métodos numéricos. En el caso los métodos de bisección y secante, se permitía ingresar la función y el intervalo candidato de búsqueda de la raíz; también se da la posibilidad de graficar la función y a partir de ella obtener un intervalo o raíz candidata a raíz. Con la interfaz creada puede tener información de errores de aproximación, visualizar la función y resaltar el cero o raíz aproximada obtenida con el método numérico aplicado.

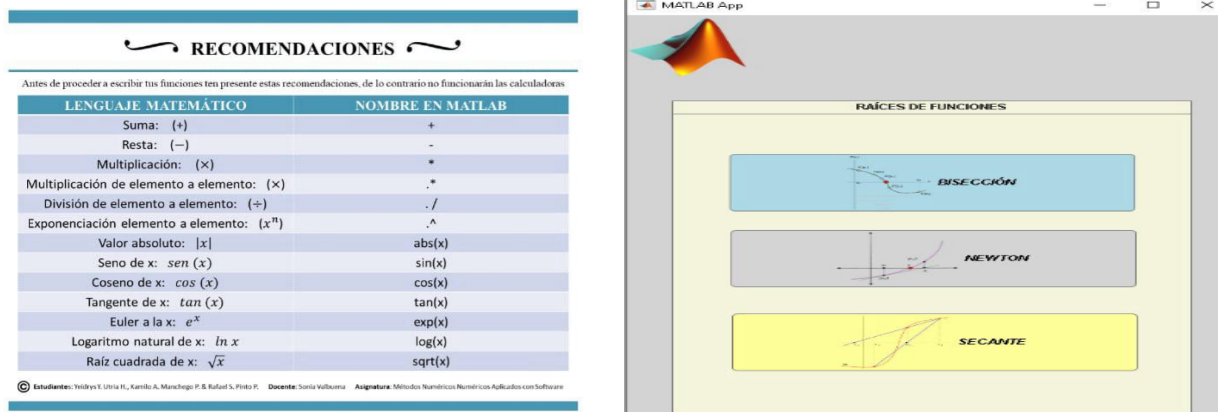
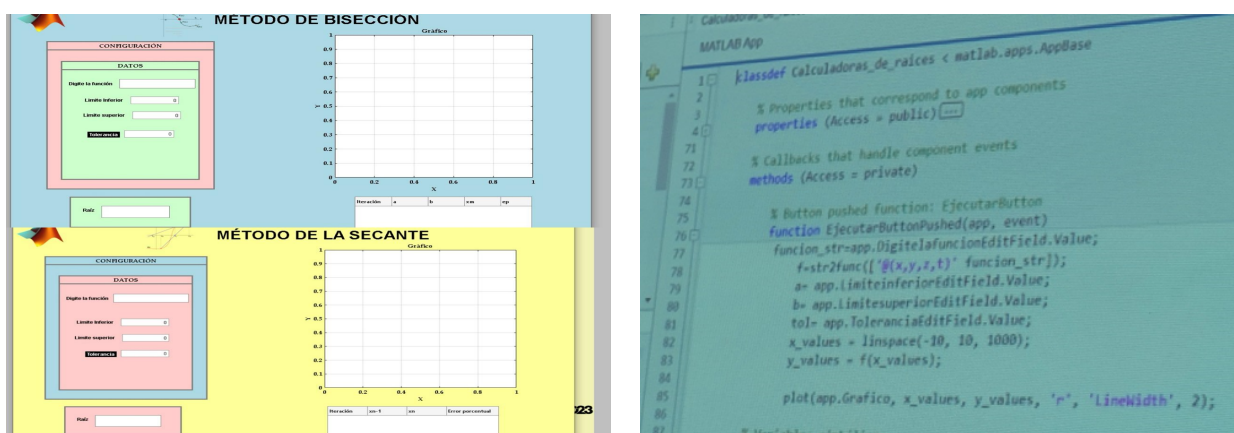


Figura 2. Presentación de aplicaciones

Nota: Elaboración propia



mental para la profesión docente. La experimentación es un aspecto novedoso que, integrado a la tecnología, les permite a los alumnos aprender de forma autónoma y adquirir una experiencia valiosa, como en el desarrollo de la electiva donde las clases se trabajaron por medio de herramientas tecnológicas. Esto les facilitó a los docentes en formación una visión para resolver métodos numéricos con *software* y observar la visualización gráfica de los métodos numéricos, gracias a un mejor análisis e interpretación de estos.

Por otra parte, la educación con enfoque STEAM guía a los estudiantes a indagar, desarrollar pensamiento crítico y creativo, a apropiarse del conocimiento y a desarrollar habilidades necesarias para este siglo. En cada clase, los docentes en formación ponían en práctica habilidades cuando interactuaban con los diferentes *softwares*, lo cual les despertó la creatividad para generar las soluciones a los problemas con diferentes métodos numéricos.

Implementar articuladamente el enfoque STEAM en procesos educativos genera impacto significativo, tanto para el estudiante como la institución. Desde una electiva se puede incentivar a romper con tradiciones en el proceso enseñanza-aprendizaje e innovar formas donde los estudiantes se sientan partícipes, experimenten todas sus habilidades y puedan seguir formándose con bases tecnológicas, presente y futuro de este siglo.

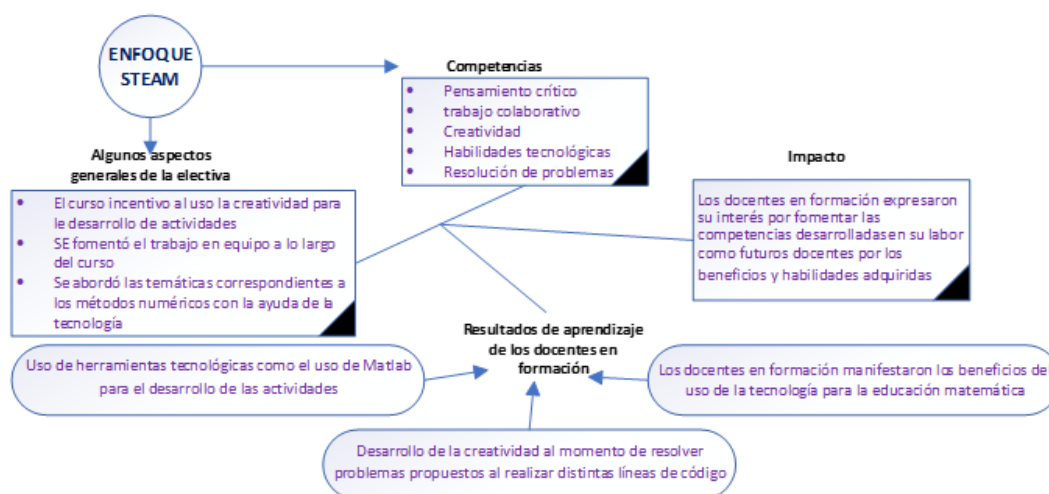


Figura 4. Enfoque STEAM desde los métodos numéricos con *software*

En la figura 4, la representación gráfica sintetiza efectivamente la integración de los métodos numéricos dentro del enfoque pedagógico STEAM. En el centro se ubican las matemáticas, específicamente los métodos numéricos como la interpolación, derivación e integración numérica. Estos constituyen un conocimiento disciplinar clave que se busca aplicar de forma interdisciplinaria. Luego, mediante las conexiones con la tecnología, se destaca cómo los métodos numéricos cobraron una

nueva dimensión y utilidad al ser implementados en *softwares* y lenguajes de programación. Esto ayuda a modelar y resolver problemas complejos con estos algoritmos.

Asimismo, y según el vínculo con la ingeniería, numerosos campos del saber y disciplinas, como la mecánica, electrónica y telecomunicaciones, recurren a técnicas numéricas computacionales para análisis de datos y procesamiento de señales. A su vez, el arte se integra creativamente mediante aplicaciones como el arte generativo, la animación 3D y el procesamiento de imágenes, que se apoyan en métodos numéricos. Finalmente, el nexa con las ciencias refleja la utilidad de estas técnicas para modelado y simulación en campos como la física, química y biología computacional.

En conclusión, esta representación sintetiza cómo los métodos numéricos adquieren mayor potencial, utilidad y aplicabilidad interdisciplinaria al integrarse efectivamente en el enfoque STEAM, enriqueciendo la formación de los futuros profesores de matemáticas.

Así que, para diseñar e implementar una estrategia efectiva que integre métodos numéricos y tecnología en la enseñanza de matemáticas, preparando a futuros docentes para utilizar estos recursos de forma innovadora, podría ser de gran utilidad:

1. Incorporar en los programas de formación docente materias sobre alfabetización digital, pensamiento computacional y uso de tecnologías educativas, que provean competencias básicas para integrar tecnología en la enseñanza.
2. Desarrollar cursos especializados en aplicaciones concretas como software matemático, programación para modelar problemas y creación de recursos digitales interactivos, para una transferencia directa a la práctica pedagógica.
3. Realizar capacitación continua a través de talleres, seminarios y comunidades para actualizar a los docentes en tendencias, herramientas y estrategias de tecnología educativa.
4. Promover la colaboración interdisciplinaria en proyectos que integren conceptos matemáticos, habilidades digitales y aplicaciones del mundo real, fomentando un aprendizaje contextualizado.

Brindar acompañamiento y retroalimentación durante la implementación de estas metodologías, para guiar a los docentes en el uso adecuado de recursos tecnológicos con fines pedagógicos. Con el aporte que visiona este trabajo se podrían diseñar estrategias innovadoras y efectivas para el aprendizaje de la programación de computadoras y el aprendizaje de los métodos numéricos aplicados con *softwares*.

Conclusiones

Luego de analizar los resultados, se puede determinar que el enfoque STEAM se desarrolló durante las clases. Este enfoque, por manejar múltiples áreas del conocimiento, facilitó en los estudiantes una mayor comprensión de los métodos numéricos, haciéndolos despertar su creatividad y habilidades tecnológicas.

En el desarrollo de las clases de métodos numéricos se deja a un lado la forma tradicional de resolverlos y se innova, gracias al uso de *softwares* y herramientas tecnológicas. Esto los llevó por caminos más eficientes para resolver métodos numéricos, sin necesidad de realizar muchos cálculos. Este mismo ejercicio arrojó una visualización de gráficos óptimos para un análisis más eficiente.

El uso de ciencias, tecnologías, ingeniería, arte y matemáticas estuvo presente en cada clase de la electiva. Los docentes en formación fomentaron el pensamiento tecnológico, creativo y crítico para la toma de decisiones en sus actividades; esto les mostró una visión pragmática del área de matemáticas.

Es necesario dominar el contenido que se enseña para conocer las herramientas tecnológicas adecuadas a utilizar. En este sentido, se debe realizar un análisis del contenido para comprobar su compatibilidad con la tecnología elegida. El uso de esta es un factor que le otorga autonomía al docente para seleccionar la herramienta que mejor se ajuste al contenido a enseñar.

Con esta electiva, los futuros docentes participantes adquirieron nuevos conocimientos tecnológicos, habilidades y herramientas para impactar su proceso de enseñanza/aprendizaje. Además, le aportó a las metodologías de enseñanza implementadas en su labor, a la vez que los llevó a modificar el modelo tradicional de abordar problemas matemáticos y les fortaleció sus competencias pedagógicas y tecnológicas.

Los docentes, como agentes de cambio del sistema educativo, deben estar abiertos a transformaciones actuales que requieren cada vez más de tecnología para generar mayores impactos positivos y aprendizajes significativos en sus alumnos. Esta electiva solamente mostró algunos contenidos de métodos numéricos y cómo analizarlos y resolverlos con *software*. Queda la tarea de abarcar mucho más contenido que fortalezca ampliamente las habilidades tecnológicas, matemáticas y creativas, así como desarrollo del pensamiento matemático crítico.

En conclusión, la electiva aportó un sinnúmero de experiencias significativas, fortaleció habilidades matemáticas y tecnológicas, y mostró diferentes formas de abordar métodos numéricos. Se considera pertinente investigar, en asignaturas y cursos relacionados con el uso de tecnología en matemáticas, cómo esta se desarrolla y su aporte a los alumnos.

Referencias

- Atmojo, I. R. W., Saputri, D. Y., y Fajri, A. K. (2022). Analysis of STEAM-based TPACK integrated activities in elementary school thematic books. *Elementary School Forum*, 9(2), 317-335. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ1363573.pdf>
- Berrío, J. D., Cantillo, S. L., y Calderón, O. W. (2021). Enseñanza del método de bisección en la secundaria con Geogebra como medio didáctico. *Boletín Redipe*, 10(10), 313-327. <https://revista.redipe.org/index.php/1/article/view/1489>
- Busetto, L., Wick, W., y Gumbinger, C. (2020).. How to use and assess qualitative research methods. *Neurological Research and Practice*, 2, art. 14. <https://doi.org/10.1186/s42466-020-00059-z>
- Buteau, C., Broley, L., Mgombelo, J. (2022). University students learning programming-based practices for mathematical inquiry: Contributions of an institutional approach. *Conference: CERME 12, Twelfth Congress of the European Society for Research in Mathematics Education* https://www.researchgate.net/publication/369622656_University_students_learning_programming-based_practices_for_mathematical_inquiry_Contributions_of_an_institutional_approach
- Castro-Maldonado, J. J., Gómez-Macho, L. K., y Camargo-Casallas, E. (2023). La investigación aplicada y el desarrollo experimental en el fortalecimiento de las competencias de la sociedad del siglo XXI. *Tecnura*, 27(75), 140-174. <https://doi.org/10.14483/22487638.19171>
- Chai, C. S., Koh, J. H. L. y Tsai, C. C. (2013). A review of technological pedagogical content knowledge. *Journal of Educational Technology & Society*, 16(2), 31-51. <http://www.jstor.org/stable/jeductechsoci.16.2.31>
- Chai, C. S. (2019). Teacher professional development for science, technology, engineering and mathematics (STEM) education: a review from the perspectives of technological pedagogical content (TPACK). *The Asia-Pacific Education Researcher*, 28(1), 5-13. <https://doi.org/10.1007/s40299-018-0400-7>
- Chai, C. S., Rahmawati, Y., y Jong, M. S. Y. (2020). Indonesian science, mathematics, and engineering preservice teachers' experiences in STEM-TPACK design-based learning. *Sustainability*, 12(21), 9050. <https://doi.org/10.3390/su12219050>
- Dawson, C. (2007). *A practical guide to research methods a user-friendly manual for mastering research techniques and projects*. (3.^a ed.). Oxford : How To Books, 2007. <https://www.loc.gov/item/2009659371/>
- Díaz Cedeño, V., Salazar Caraballo, I. M., y López Brito, R. (2023). STEAM: una breve conceptualización de una metodología orientada al desarrollo de competencias del siglo XXI. *Revista Educare*. 27(2), 73-91. <https://doi.org/10.46498/reduipb.v27i2.1916>

- Duarte, S. V., y Roca Arroyo, D. C. (2014). Simulación numérica por MDF para la solución de la ecuación diferencial parcial que modela el flujo de contaminantes de un acuífero. *Revista MATUA*, 1(1). <https://revistas.uniatlantico.edu.co/index.php/MATUA/article/view/1037>
- El Nagdi, M. *et al.* (2018). STEAM education: a methodological guiding framework for learning analytics. En E. Lavoué É., H. Drachsler, K. Verbert, J. Broisin, y M. Pérez-Sanagustín (eds.), *Data driven approaches in digital education. ECTEL 2018. Lecture Notes in Computer Science*. (Vol. 11082). Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-66610-5?page=2#toc>
- Harris, J., y Hofer, M. (2011). Technological pedagogical content knowledge (TPACK) in action. *Journal of Research on Technology in Education*, 43(3), 211-229. <https://doi.org/10.1080/15391523.2011.10782570>
- Herro, D., y Quigley, C. (2017). Exploring teachers perceptions of STEAM teaching through professional development: implications for teacher educators. *Professional Development in Education*, 43(3), 416-438. <https://doi.org/10.1080/19415257.2016.1205507>
- Hidalgo, C. G., Bucheli-Guerrero, V. A., y Ordóñez-Eraso, H. A. (2023). Artificial intelligence and computer-supported collaborative learning in programming: a systematic mapping study. *Tecnura*, 27(75), 175-206. <https://doi.org/10.14483/22487638.19637>
- Karampelas, K. (2023). Examining the relationship between TPACK and STEAM through a bibliometric study. *European Journal of Science and Mathematics Education*, 11(3), 488-498. <https://doi.org/10.30935/scimath/12981>
- Kokotsaki, D., Menzies, V., y Wiggins, A. (2016). Project-based learning: a review of the literature. *Improving Schools*, 19(3), 267-277. <https://doi.org/10.1177/1365480216659733>
- Kong, S. C., Looi, C. K., y Huang, R. (2017). Teacher development in computational thinking education. *On the Horizon*, 25(2), 153-163. <https://doi.org/10.1108/OTH-02-2016-0005>
- Lv, L., Zhong, B., y Liu, X. (2023). A literature review on the empirical studies of the integration of mathematics and computational thinking. *Education and Information Technologies*, 28(7), 8171-8193. <https://dx.doi.org/10.1007/s10639-022-11518-2>
- Magiera, M. T., y Lesser, L. (2022). GeoGebra applets: enhancing the teaching and learning of numerical analysis. *TIDES: Teaching Innovation and Digital Education Solutions*, 1(1), 7-15. <https://doi.org/10.54839/tides2022v1i1pp7-15>
- Merlano, D., Valbuena, S., y Conde, R. (2022). Conocimiento de contenido tecnológico y pedagógico (TPACK) y creencias sobre las TIC de profesores de matemáticas en formación inicial. *Revista Hamutay*, 9 (1), 12-23. <http://dx.doi.org/10.21503/hamu.v9i1.2372>

- Montes, N., Zapatera, A., Ruiz, F., Zuccato, L., Rainero, S., Zanetti, A., ... Marathefti, M. (2023). A novel methodology to develop STEAM projects according to national curricula. *Education Sciences*, 13(2), 169. <https://doi.org/10.3390/educsci13020169>
- Moreno, J. E. *et al.* (2021). STEAM methodology for learning computer programming and electronics through the development of musical projects. *Sustainability*, 13(12), 6604. <https://doi.org/10.3390/su13126604>
- Ozgun Koca, S. A., Meagher, M. y Edwards, M. T. (2010). Preservice teachers' emerging TPACK in a technology-rich methods class. *Mathematics Educator*, 19(2), 10-20. <https://files.eric.ed.gov/fulltext/EJ882221.pdf>
- Pedraza C. L., y Valbuena D. S. (2014). Plataforma móvil con realidad aumentada para la enseñanza de los cálculos. *Revista Ventana Informática*. 30(1), 205-216. <https://doi.org/10.30554/ventanainform.30.292.2014>
- Rodríguez, G., Sáez-López, J. M., Román-González, M., y Vázquez-Cano, E. (2021). Analysis of pre-service teachers technological pedagogical content knowledge to teach computer programming in secondary education. *Computer Applications in Engineering Education*, 29(1), 259-269. <https://doi.org/10.1002/cae.22329>
- Simangunsong, M. F., Waspada, I., Rasto, R., Muhammad, I., Triansyah, F. A., y Gunawan, A. (2023). The impact of technological pedagogical content knowledge (TPACK) on learning outcomes: a bibliometric review. *Jurnal EDUCATIO (Jurnal Pendidikan Indonesia)*, 9(2), 1098-1107. <https://doi.org/10.29210/1202323188>
- Sotiriou, S. *et al.* (2022). STEAM frameworks for 21st century learning skills. En P. J. Williams, y D. Gedera (eds.), *Technology tools for teaching and learning* (pp. 38-54). EdTech Books. <https://edtechbooks.org/steam>
- Teo, T. W., y Ke, K. J. (2014). Challenges in STEM teaching: implication for preservice and inservice teacher education program. *Theory Into Practice*, 53(1), 18-24. <https://doi.org/10.1080/00405841.2014.862117>
- Torggler, C., Miesera, S., y Nerdel, C. (2023). From TPACK to N-TPACK framework for vocational education and training with a focus on nutritional science and home economics. *International Journal for Research in Vocational Education and Training*, 10(2), 168-190. <https://doi.org/10.13152/IJRVET.10.2.2>
- Trejos-Buriticá, O. I., y Muñoz-Guerrero, L. E. (2023). Aprendiendo programación de computadores a partir de STEAMRW en ingeniería de sistemas. *Tecnura*, 27(76), 95-110. <https://doi.org/10.14483/22487638.15985>

- Valbuena D., S., Medina G., A., y Teherán B., V. (2021). Empoderamiento docente para la integración de las TIC en la práctica pedagógica, a partir de la problematización del saber matemático. *Revista Academia y Virtualidad*, 2021, 14(1), 41-61. https://www.researchgate.net/publication/352013229_Empoderamiento_docente_para_la_integracion_de_las_TIC_en_la_practica_pedagogica_a_partir_de_la_problematizacion_del_saber_matematico
- Valbuena-Duarte, S., Tamara-Gutiérrez, Y., y Berrío-Valbuena, J. (2021). Intervención didáctica tecnológica para el estudio de las secciones cónicas basada en el potencial semiótico. *Formación Universitaria*, 14(1), 181-194. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-50062021000100181>
- Watson, A., y Watson, G. (2013). Transitioning STEM to STEAM: reformation of engineering education. *The Journal for Quality and Participation*, 36(1), 1-5. <https://asq.org/quality-resources/articles/bonus-article-transitioning-stem-to-steam-reformation-of-engineering-education?id=f71f8226f1674b5ca44d303fab0e431>
- Willis Elías, L. Valbuena D., S., y Berrío, V. D. (2023). Pensamiento computacional en matemáticas con Code.org. *Revista Cedotic*, 9(1). 95-113. <https://revistas.uniatlantico.edu.co/index.php/CEDOTIC/article/view/3999>



Alianzas interorganizacionales e innovación: una revisión exploratoria

Interorganizational alliances and innovation. A scoping review

Ana Isabel Gómez Acevedo ¹, Hugo Ernesto Martínez Ardila ² y Elda Alejandra Torres Reyes ³

Fecha de Recepción: 20 de julio de 2023

Fecha de Aceptación: 1 de noviembre de 2024

Cómo citar: Gómez Acevedo A.I., Martínez Ardila H.E. y Torres Reyes E.A. Alianzas interorganizacionales e innovación: una revisión exploratoria. *Tecnura*, 28(82), 48-74. <https://doi.org/10.14483/22487638.21004>


Resumen


Objetivo: las alianzas se posicionan como uno de los modos más comunes para obtener capacidades tecnológicas en la actualidad. Sin embargo, un gran porcentaje de estas alianzas no obtiene los resultados esperados en términos de innovación, lo cual supone un desperdicio de tiempo y recursos para los socios colaboradores. Por tanto, resulta imperativo analizar los atributos de las alianzas tecnológicas, para así lograr un máximo desempeño innovador. En este sentido, este artículo tiene como objetivo identificar el estado actual de la literatura y ofrecer un panorama sobre los conceptos, elementos clave y sus relaciones.


Metodología: para esta revisión, se adoptó la metodología de revisión exploratoria desarrollada por Arksey y O'Malley en 2005, la cual incluye las definiciones de *pregunta de investigación*, *selección de las fuentes de información*, *desarrollo de la revisión* y *síntesis de la información*. Durante el proceso se trabajaron diferentes criterios de selección para los artículos y revisiones publicados entre 2015 y 2023, así como estrategias de diagramación y categorización para organizar la información.

Resultados: se identificaron los indicadores más frecuentes en la literatura reciente para medir el desempeño innovador. Además, se planteó el marco conceptual sobre las alianzas interorganizacionales, con hincapié en los conceptos derivados de dichas alianzas que influyen en el desempeño innovador.

Conclusiones: es posible superar los límites de las organizaciones en términos de innovación al adoptar tecnologías externas, y reconocer que las alianzas son fundamentales para la transferencia y generación de conocimiento. Sin embargo, para lograr un mejor desempeño innovador, los socios colaboradores deben establecer una estrategia para la gestión de sus relaciones interorganizacionales y un proceso de interacción adecuado para transferir nuevos

¹Estudiante de Ingeniería Industrial de la Universidad Industrial de Santander  Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: ana2190267@correo.uis.edu.co

²Doctor en Ingeniería, magíster en Ingeniería Electrónica, ingeniero electrónico. Profesor titular en la Universidad Industrial de Santander  Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: hemarti@uis.edu.co

³Ingeniera industrial, estudiante de la Maestría en Ingeniería Industrial de la Universidad Industrial de Santander  Bucaramanga, Colombia. Correo electrónico: elda2228398@correo.uis.edu.co

y diversos conocimientos, aprovechando la diversidad interna de las organizaciones.

Palabras clave: alianzas, innovación, proximidad tecnológica, desempeño.

Abstract

Objective: Alliances are currently one of the most common ways of developing technological capabilities. However, a large percentage of these alliances fail to achieve the expected results in terms of innovation, which implies a waste of time and resources for the collaborating parties. Therefore, it is essential to analyze the attributes of technological alliances that must be taken into account in order to achieve maximum innovative performance. In this sense, this article aims to identify the current state of the literature and provide an overview of the concepts, key elements and their relationships.

Methodology: This study was carried out by adapting the scoping review methodology developed by Arksey y O'Malley in 2005, which covers the definition of the research question, the selection of information sources, the development of the review and the synthesis of the information. During the process, different selection criteria were used for articles and reviews published between 2015 and 2023, as well as diagramming and categorization strategies to organize the information.

Results: The indicators most commonly used in recent literature to measure innovative performance were identified. In addition, the conceptual framework on interorganizational alliances is presented, emphasizing the concepts derived from such alliances that influence innovative performance.

Conclusions: It is possible to overcome the limits of organizations in terms of innovation by adopting external technologies and recognizing that alliances are fundamental for the transfer and generation of knowledge. However, to achieve better innovative performance, collaborative partners must establish a strategy for managing their inter-organizational relationships and an adequate interaction process to transfer new and diverse knowledge, taking advantage of the internal diversity of organizations.

Keywords: Alliances; Innovation; Technological Proximity, Performance.

Introducción

En la actualidad, las organizaciones se enfrentan a un entorno empresarial altamente competitivo y complejo, lo que ha impulsado la adopción de estrategias de colaboración y cooperación a través de alianzas interorganizacionales, como una forma de fomentar la innovación y el crecimiento. Esta colaboración ha sido clave para sobrevivir y prosperar en este contexto desafiante (Subramanian *et al.*, 2018).

Se ha demostrado la importancia de esas alianzas para el desempeño de la innovación en las empresas, ya que generan sinergias; comparten conocimientos, recursos, y promueven la exploración de nuevas ideas (Ho *et al.*, 2018; Martínez Ardila *et al.*, 2018). Pese a esto, la tasa de fracaso de las alianzas se sitúa entre el 60 % y el 70 % (Hughes y Weiss, 2007; Martínez Ardila *et al.*, 2020; Zineldin *et al.*, 2015; Zoogah *et al.*, 2015).

Colombia no es ajeno a este panorama, y la evidencia de ello es su calificación en el *índice mundial de innovación* (GII, por su sigla en inglés) de 2022, el cual es publicado anualmente por la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual ([World Intellectual Property Organization \[WIPO\], 2022](#)). Este mide el rendimiento innovador de los países en términos de 80 indicadores, entre los que se incluyen la inversión en I+D, el impacto de la tecnología y la creatividad empresarial. En el último informe, Colombia ocupó el puesto 63 entre 132 países evaluados, lo cual supone un potencial significativo para mejorar en innovación.

El GII incluye dos subíndices. El primero es el de insumos de innovación con cinco pilares críticos que favorecen la innovación; y el segundo, de producción de innovación a cargo de los resultados de las actividades innovadoras. En el pilar *s sofisticación empresarial*, que captura qué tan propicias son las empresas para la actividad de innovación, hay dos subpilares fuertemente relacionados con esta investigación: *vínculos de innovación y absorción de conocimiento*. El primero incluye el número de negocios en *joint ventures* y alianzas estratégicas para la innovación, en el que Colombia obtuvo una calificación de 0,0. Por otro lado, se obtuvo un puntaje de 34,7 en *absorción de conocimiento*.

Esto indicaría que, si bien el país tiene capacidades medias-altas para absorber potencialmente conocimiento, existe una debilidad en cuanto al aprovechamiento de mecanismos como las alianzas estratégicas. Por tanto, es vital analizar los atributos de las alianzas que deben tenerse en cuenta para mejorar el desempeño innovador en el país, y así captar y generar riqueza.

Metodología

En esta sección se describe en detalle el proceso para alcanzar los objetivos planteados. Incluye la ecuación de búsqueda y los criterios de selección utilizados para construir el marco de referencia final y los procedimientos de análisis y mapeo de la información.

La revisión exploratoria es una “evaluación preliminar del tamaño y el alcance potencial de la bibliografía de investigación disponible”. Su objetivo es identificar la naturaleza y relevancia de las evidencias de la indagación ([Grant y Booth, 2009](#)). En este estudio, se adapta la metodología inicialmente propuesta por [Arksey y O'Malley \(2005\)](#). El desarrollo de la investigación se compone de una primera fase de preparación o diseño de la revisión, una fase operativa o de desarrollo y una fase de síntesis y reporte de resultados (figura 1).



Figura 1. Esquema metodológico

Nota: adaptada de [Dallasega et al. \(2018\)](#).

Fase 1: diseño de la revisión

Esta revisión exploratoria tiene como objetivo proporcionar una visión general sobre las alianzas interorganizacionales y el desempeño de la innovación. Para esto, se aborda en primera instancia la pregunta de investigación: ¿cuáles son los conceptos y elementos más destacados de las alianzas interorganizacionales relacionadas con el desempeño de la innovación, según los estudios más recientes en la literatura científica?

Enseguida, se recurre a Web of Science para la revisión de la literatura. La elección de esta base de datos se justifica por varias razones: en primer lugar, es una plataforma integral y extensa, con datos bibliográficos, citas y referencias de publicaciones científicas de diversas disciplinas del conocimiento; en segundo lugar, porque proporciona información bibliográfica precisa, además de herramientas para evaluar y analizar el rendimiento y la calidad científica de la investigación. También, facilita información detallada sobre la afiliación institucional de autores, lo que resulta valioso en estudios bibliométricos.

En un tercer momento, se construye el criterio de búsqueda, a partir de las palabras clave extraídas de las investigaciones y textos académicos especializados en innovación. El resultado es una ecuación que se organiza en tres categorías: (i) términos relacionados con alianzas, (ii) innovación y (iii) tesauros que abarcan conceptos como *proximidad*, *distancia*, *similitud*, *complementariedad*, *solapamiento* y *relación* en el ámbito del conocimiento o la tecnología:

(alliance* OR collaborati* OR partnership OR cooperation)AND (innovat* AND ("techn* distance" OR "techn* proximity" OR "techn* complement*" OR "techn* relatedness" OR "techn* overlap*" OR "techn* similar*" OR "techn* space" OR

"knowledge distance" OR "knowledge proximity" OR "knowledge complement"
OR "knowledge relatedness" OR "knowledge overlap*" OR "knowledge similar"
OR "knowledge space" OR "cognitive distance" OR "cognitive proximity" OR "cognitive relatedness" OR "cognitive similar*" OR "cognitive space"))

Para validar la función de búsqueda anterior, se registran las principales modificaciones y versiones de la ecuación durante su construcción. Además, se verifica que los resultados sean los apropiados para los temas a investigar, lo que ayuda a minimizar el ruido en la ecuación final.

Fase 2: desarrollo de la revisión

Para la identificación de los estudios relevantes se consideran criterios prácticos como el idioma, el año de publicación, los tipos de documentos, así como criterios metodológicos para evaluar la calidad de los estudios, que incluyen las categorías del conocimiento relacionadas con el tema de investigación (tabla 1).

Tabla 1. Criterios de selección para la revisión

Criterio	Descripción
Idioma	Inglés-español
Ventana de tiempo	2015-2023
Tipos de documentos	Artículos y artículos de revisión.
Categorías de conocimiento	<i>Management, business, economics, multidisciplinary sciences, geography, urban studies, social sciences interdisciplinary, development studies, mathematics applied, engineering manufacturing, mathematics interdisciplinary applications, social sciences mathematical methods, engineering multidisciplinary, operations research management science, engineering industrial.</i>

Con los artículos ya identificados, en el proceso de selección de los posibles documentos relevantes, se examinan los títulos, resúmenes y conclusiones de los artículos. Luego, se clasifican utilizando la técnica del semáforo, donde se descartan aquellos documentos marcados en rojo o amarillo, mientras que los marcados en verde se consideran candidatos prometedores. Esta clasificación se basa en criterios *post hoc* establecidos por los autores y detallados a continuación:

- Se incluyen documentos asociados a *alianzas interorganizacionales, colaboración, cooperación o asociación*.

- Se incluyen documentos que mencionen *innovación, desempeño o rendimiento de innovación o coinversión, capacidad de innovación, innovación exploratoria, explotativa o recombinatoria*.
- Se incluyen artículos que tengan palabras clave como *distancia tecnológica, proximidad tecnológica, complementariedad tecnológica, similitud tecnológica, relación tecnológica, solapamiento tecnológico, espacio tecnológico*.
- Se incluyen artículos que tengan como objeto de estudio temas de distancia, proximidad, complementariedad, similitud, relación, solapamiento o espacio cognitivo o del conocimiento.
- Se incluyen documentos que estudien las organizaciones y no la industria, los sectores o las regiones.
- Se excluyen documentos que se centren en tópicos de *emprendimiento, marketing, medioambiente, capital social, academia, turismo, sector hospitalario, deporte, y cadenas de suministro o la relación con los clientes, competidores, proveedores*. Se excluyen todos los que no analicen los temas de la ecuación de búsqueda.

En la figura 2 se detalla el proceso de selección.

Fase 3: síntesis y reporte de resultados

A través del análisis de la información, se busca clasificar los documentos, establecer relaciones, descubrir nuevos conceptos, tendencias y comprensiones que previamente eran difíciles de percibir. Para lograr esto, se organiza la información, a través de diagramas donde se presenta la relación de las variables estudiadas en las investigaciones. A partir de la información registrada en los *softwares Citavi y Visio*, se sintetizan los resultados en una estructura narrativa. Así, se logra una comprensión más profunda y significativa de los datos analizados.

Resultados

Alianzas interorganizacionales

Relaciones interorganizacionales

La noción de *alianzas interorganizacionales* es ampliamente utilizada en la literatura para referirse a acuerdos que benefician mutuamente a las organizaciones, a la par que preservan su independencia corporativa. De esta manera, se transfieren o se absorben conocimientos entre sí, mientras incursionan en nuevos horizontes o maximizan el aprovechamiento de activos complementarios (Gilsing et al., 2007; Nan et al., 2018).

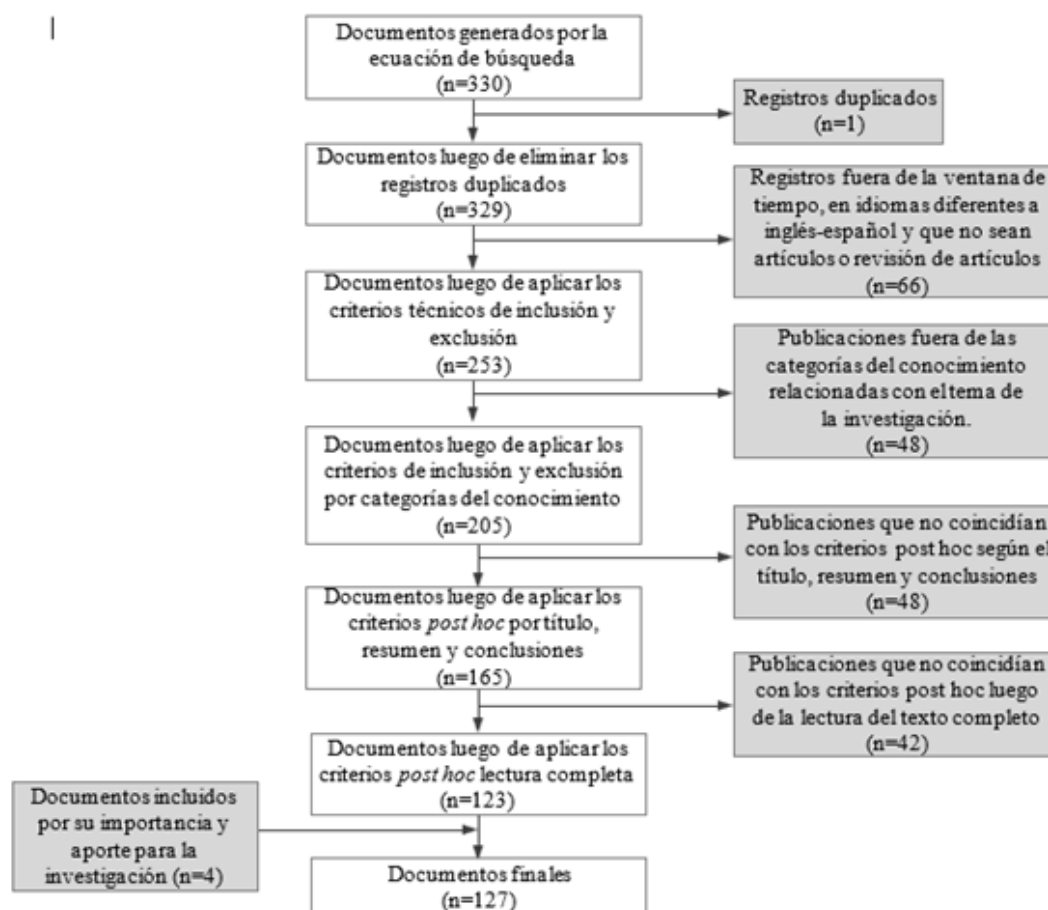


Figura 2. Proceso de selección de los estudios para la revisión exploratoria

Es habitual encontrar expresiones como *cooperación* y *colaboración* para explicar la misma idea de relaciones de aprendizaje interempresarial. Al respecto, [Hagedoorn \(2002\)](#) define las colaboraciones en investigación y desarrollo (I+D) como tratados de apoyo entre dos o más organizaciones independientes que unen sus recursos para desplegar nuevas tecnologías. En contraste, [Gulati et al. \(2012\)](#) recurren a la expresión *cooperación interorganizativa* para definir la búsqueda conjunta de uno o varios objetivos acordados, de manera que corresponde a un entendimiento compartido sobre las contribuciones y beneficios de cada involucrado.

Clasificación funcional

[Krammer \(2016\)](#) sostiene que existen dos grandes categorías en las relaciones interempresariales, según el principal objetivo de la colaboración. Por un lado, los acuerdos exploratorios

suponen el intercambio bilateral de tecnologías; así, los involucrados se centran en la búsqueda de nuevos conocimientos y competencias (Müller et al., 2021); ello sucede en las asociaciones universidad/empresa, las colaboraciones en I+D, las *spin-off* y las alianzas tecnológicas (Cohen y Levinthal, 1989).

Por otra parte, los acuerdos de explotación, como las subcontrataciones, los acuerdos de licencia o los *joint ventures*, hacen hincapié en la apropiación de conocimientos y tecnologías ya existentes para percibir el beneficio común (March, 1991).

Clasificación según naturaleza

Según el tipo de socios, los acuerdos de colaboración se distinguen entre *verticales*, *horizontales competitivos* y *horizontales cooperativos* (Peña y Aranguren, 2002). La cooperación vertical es aquella que se realiza a lo largo de la cadena de suministro, de acuerdo con el vínculo que mantiene una empresa con sus proveedores o clientes. Este tipo de socios surgen de relaciones comerciales duraderas en el tiempo (Ariño, 2007).

Los proveedores representan un socio potencial para colaborar, ya que proporcionan los insumos necesarios a la empresa para acortar el tiempo que se tarda en sacar un nuevo producto al mercado, mejorar sus procesos, y aumentar la eficiencia y calidad de sus productos. La facilidad de estas colaboraciones se basa en que los intereses económicos de ambas partes están bien alineados, lo cual redundará en que tanto la empresa como sus proveedores se beneficiarán; cuanto más se vendan los productos, más se favorecerán ambos (Criscuolo et al., 2018).

Por su parte, las alianzas con los clientes involucran a quienes comprenden bien el portafolio de productos ofrecidos por la empresa y están dispuestos a crear nuevas maneras de satisfacer sus propias necesidades junto con la organización. La ventaja de estas colaboraciones, sobre las colaboraciones horizontales, radica en la facilidad con la cual la empresa puede acceder al conocimiento, ya que es poco probable que los clientes y proveedores sean celosos con la información sobre sus necesidades y expectativas (Lee y Kim, 2014).

La colaboración horizontal con competidores del mismo sector industrial, denominada también *coopetición*, es señalada por algunos estudiosos como una estrategia viable para impulsar la capacidad de las empresas de mejorar su músculo tecnológico (Un y Rodríguez, 2018; Yan et al., 2020). Lo anterior se debe a que las colaboraciones con competidores permiten tener un entendimiento más profundo del mercado y los estándares de producto, además de aunar esfuerzos de investigación.

Por último, la cooperación horizontal complementaria es la que se da entre organizaciones que no son rivales, y ambos socios fomentan el intercambio de conocimientos tácitos y explícitos que residen en la mente de los colaboradores. Un ejemplo es el desarrollo de vínculos de colaboración con las universidades, donde las empresas pueden aprovechar las habilidades y el conocimiento de la academia para mejorar sus capacidades, ampliar el alcance de su tecnología y mejorar su competitividad (Song *et al.*, 2022).

Redes de las alianzas interorganizacionales

Las alianzas en las que se involucra una compañía forman su red interorganizacional, que no es más que el conjunto de empresas que interactúan en un entorno económico para coordinar sus actividades de intercambio con el objetivo de crear valor (Martínez Ardila *et al.*, 2018). Khanna (1998) denomina como *gestión de las relaciones* al conjunto de procesos internos en una empresa para establecer, mantener y reorganizar sus vínculos con otras compañías. Según Sarkar *et al.* (2009), la gestión de las relaciones engloba prácticas de coordinación, comunicación y vinculación que ayudan a superar los problemas de cooperación y las imperfecciones relacionales.

Por su parte, otros autores sugieren que las diferencias en los resultados de las alianzas se deben a la interacción entre tres cualidades de la red: alcance, riqueza y centralidad. (Gulati *et al.*, 2011)

Por *alcance* se entiende la medida en que la red de vínculos de la organización se conecta con socios distantes y directos (Gulati *et al.*, 2011). La *riqueza* valora la calidad del conocimiento externo y el resultado potencial de una buena combinación y un acuerdo aditivo entre las bases de conocimiento de los socios (Mindruta *et al.*, 2016). Finalmente, la *centralidad* denota la posición estratégica de la empresa en la red y la cantidad de vínculos significativos que mantiene (Martínez Ardila *et al.*, 2018).

Atributos especiales de las alianzas interorganizacionales

Dhir *et al.* (2021) y Subramanian *et al.* (2018) han identificado puntos clave que cumplen un papel importante en la efectividad de las alianzas interorganizacionales, a saber: la selección de los socios, los atributos relacionales, la capacidad de absorción, la similitud y complementariedad del conocimiento, y la gestión del desbordamiento del conocimiento.

En primera instancia, Shah y Swaminathan (2008) establecen las tres dimensiones de la selección de socios más relevantes para el rendimiento de las alianzas: complementariedad, compatibilidad y compromiso de los socios. Por otro lado, Krammer (2016) y otros autores

reconocen que, aunque todos estos atributos son vitales para formar una alianza, sus efectos dependen de otros elementos, como el contexto de los socios, su experiencia previa (Rothaermel y Boeker, 2008), el nivel de confianza mutua (Ho et al., 2018), las características intrínsecas de los directivos (Chen, 2020) y de los propios acuerdos (Shah y Swaminathan, 2008).

En segundo lugar, varias investigaciones han demostrado que, entre los atributos relacionales de las alianzas tecnológicas, la confianza, la reciprocidad desarrollada a través de asociaciones frecuentes, lazos fuertes y las redes cohesivas son elementos clave que moderan los beneficios derivados de la colaboración en alianzas (Collins y Riley, 2013; Subramanian et al., 2018).

Como tercer atributo, Cohen y Levinthal (1990) definen la capacidad de absorción como la habilidad de una organización para aprender de fuentes externas de conocimiento. Este concepto inicial se ha ampliado gracias al aporte de varios autores. Por ejemplo, el trabajo de Lane y Lubatkin (1998) considera la capacidad de absorción como una cualidad relativa; por tanto, las empresas que comparten un mismo nivel de capacidad de absorción pueden obtener mayores beneficios de las actividades de colaboración externa, según la facilidad de la empresa para aprender de otra, en función de la similitud de sus conocimientos y prácticas organizativas (Martínez Ardila et al., 2020).

En investigaciones más recientes se sigue profundizando en el concepto de *capacidad de absorción*. Por ejemplo, los análisis de Lane et al. (2006), sumados al trabajo de Todorova y Durisin (2007), comprenden un enfoque más dinámico de esa expresión, que consta de tres fases. Durante la primera, denominada de *aprendizaje exploratorio*, es necesario identificar y entender los nuevos conocimientos que puedan tener valor. En la segunda, de *aprendizaje transformativo*, se integra el conocimiento adquirido con la base de conocimientos y los procesos internos de la empresa. En la última, de *aprendizaje de explotación*, se generan y se adoptan nuevos conocimientos al combinar lo aprendido con lo que ya se sabe.

En definitiva, la capacidad de absorción dependerá de las actitudes y la disposición de las empresas implicadas en la transferencia de conocimiento para ser receptivas ante los resultados derivados de la colaboración (Sudhindra et al., 2020). Además, para que las actividades de colaboración resulten en agregación de valor real, es importante que haya una capacidad de absorción complementaria entre los socios, y que sus bases de conocimiento tengan cierta superposición, de manera que puedan comunicarse eficazmente (Song et al., 2022; García et al., 2018; Jee y Sohn, 2020).

En la cuarta propiedad, es esencial precisar la similitud tecnológica en relación con la capacidad de absorción, la cual se plantea como las coincidencias en recursos, conocimientos de tecnologías, lógicas dominantes y procesos cruciales para la recombinación de conocimientos en las alianzas (Filiou y Massini, 2018).

Por último, los desbordamientos del conocimiento (*spillovers*) se definen como la cantidad no apropiable de conocimiento tecnológico que se produce por el esfuerzo de innovación de una empresa (Kaiser, 2002).

De acuerdo con la información recopilada por Yoruk (2019), los *spillovers* tienen lugar mediante la exhibición, contemplación, copia y puesta en práctica de procesos, tecnologías innovadoras, diseños de productos, técnicas de gestión y, principalmente, a través de la movilidad de personal capacitado, lo que da lugar a la transferencia de conocimiento tácito. Los *spillovers* representan un factor sustancial en los resultados de las alianzas. La difusión del conocimiento y de las tecnologías contribuye al desarrollo de innovaciones de gran valor; sin embargo, el conocimiento tácito y explícito de la empresa que no se desea compartir puede salir a relucir durante la colaboración en I+D y ser revelada a un socio potencialmente oportunista. Este riesgo de desbordamiento reduce el estímulo que tienen las organizaciones de invertir sus esfuerzos en la formación de alianzas (Jee y Sohn, 2020).

Pese a lo anterior, los estudiosos han prestado poco interés en la evaluación de este riesgo antes de elegir un colaborador. En la figura 3 se resumen los aspectos más importantes de las alianzas interorganizacionales.

Innovación

Proximidades

La teoría de la proximidad ha abordado en cierta medida la tendencia a formar alianzas entre organizaciones que comparten cierta similitud. Durante los años 1990, varios estudios empíricos se enfocaron en cómo la proximidad geográfica posibilita la interacción cara a cara, la construcción de confianza, y las colaboraciones entre diferentes actores en el proceso de innovación (Audretsch y Feldman, 1996; Jaffe *et al.*, 1993).

A lo largo de los años, este marco conceptual se ha ampliado y ahora se argumenta que las colaboraciones no solo se basan en la proximidad geográfica. Boschma (2005) propone que la construcción de vínculos entre las organizaciones está condicionada por diferentes proximidades, complementarias entre sí, ya que la ausencia de una puede ser compensada por otra. Igualmente, las clasifica en organizacionales, sociales, institucionales, tecnológicas y cognitivas

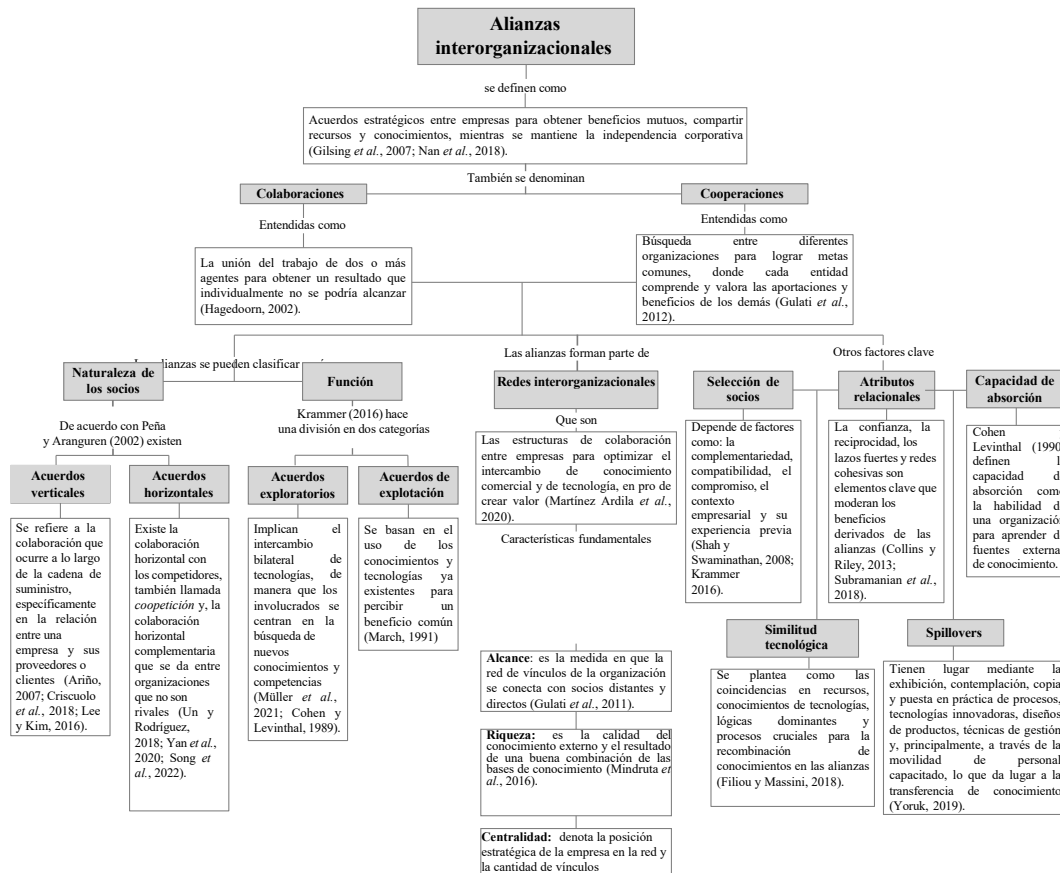


Figura 3. Mapa conceptual de las alianzas interorganizacionales

(Françoso y Vonortas, 2022).

Este estudio privilegia las dimensiones de proximidad tecnológica y cognitiva, además de su relación con las alianzas interorganizacionales y el desempeño de la innovación. La proximidad tecnológica, entendida como la cercanía o familiaridad del conocimiento entre dos entidades, es un reflejo del grado de solapamiento de las organizaciones en el contexto de las alianzas. A mayor solapamiento, mayor proximidad (Enkel et al., 2018; Gilsing et al., 2008; Laurssen et al., 2010).

Por otro lado, Nooteboom (2000) describe la proximidad cognitiva como la similitud en la base común de conocimientos y experiencia entre los agentes involucrados. Así pues, la proximidad tecnológica puede considerarse una “traslación” del concepto de proximidad cognitiva del nivel organizativo al tecnológico (Enkel et al., 2018). Mientras que la cognitiva se refiere a

“cómo” interactúan los actores, la tecnológica enfatiza en “qué” intercambian y al valor potencial de estos intercambios (Knoben y Oerlemans, 2006).

El análisis de la proximidad tecnológica ayuda a la comprensión de la configuración de la colaboración; por otro lado, las otras dimensiones de proximidad se analizan como factores mediadores (Boschma, 2005; Mattes, 2012).

Relación entre las proximidades

Se ha demostrado la existencia de una relación en forma de U invertida entre la proximidad tecnológica y el desempeño innovador en las alianzas (Kim y Song, 2007; C. Lin et al., 2012; Nooteboom et al., 2006).

También, se ha comprobado que las proximidades tecnológicas impactan directamente la colaboración y el desempeño innovador; además, el nivel óptimo de proximidad tecnológica varía críticamente dado el contexto organizacional y de la red de colaboración (Cassi y Plunket, 2014).

Debido a esto, las alianzas parecen lograr mejores resultados en términos de innovación cuando se enfocan en mantener un nivel de proximidad tecnológica adecuado entre los colaboradores, sin llegar a valores extremos (Fornahl et al., 2011; Zhang y Luo, 2020).

La teoría de la *innovación recombinate* explica por qué las altas proximidades tecnológicas tienen un efecto perjudicial sobre la colaboración. Cuando se trata de innovación, se necesita cierta discrepancia entre las bases de conocimiento para que puedan complementarse y abrir nuevas posibilidades de creación. Si las bases de conocimiento tienen altas proximidades tecnológicas, puede registrarse una falta de recursos recombinantes, lo cual dificulta la generación de ideas (Liu y Ma, 2019).

Pero, si la proximidad tecnológica es mínima, es difícil que las empresas puedan absorber y utilizar los conocimientos de otras disciplinas para generar ideas novedosas. Por tanto, es ideal que la proximidad tecnológica entre los socios de la alianza sea moderada, de manera que se aprovechen eficazmente los conocimientos interdisciplinarios para la generación de innovaciones (Zhang y Tan, 2022).

Alianzas interorganizacionales e innovación

Durante las últimas décadas, las economías desarrolladas han experimentado una transformación rápida y progresiva de los métodos de operación basados en el conocimiento. En la

mayoría de las áreas tecnológicas, se observa un nivel considerable y en constante aumento de especialización y segmentación del conocimiento (Müller *et al.*, 2021).

Al respecto, la innovación es reconocida como un medio impulsor fundamental para el crecimiento de las empresas (Harrigan *et al.*, 2016) y como una de las estrategias fundamentales para competir en el mercado global del siglo XXI. Según Organisation for Economic Co-operation and Development, y European Statistical Office (OECD/Eurostat, 2018), una innovación es un producto o proceso (o combinación de los dos) nuevo o mejorado, y que ha sido puesto a disposición de los usuarios potenciales o puesto en uso por los agentes responsables de las innovaciones. Según Schumpeter (2021), la innovación cumple un papel clave en la ventaja competitiva de las empresas y es un proceso de búsqueda en el que el conocimiento es el activo estratégico clave; no obstante, el conocimiento *per se* no es significativo, sino la capacidad de acceder a este, recombinar los elementos existentes y crear ideas de forma novedosa, lo que conduce a invenciones e innovaciones (Subramanian *et al.*, 2018; Müller *et al.*, 2021).

Para innovar, las organizaciones pueden invertir en I+D interna; sin embargo, se tiene la limitante de las capacidades finitas y los recursos limitados para hacerlo por sí solas y mantenerse al día con los cambios tecnológicos acelerados que exige el mercado. Por esta razón, la tendencia de llevar a cabo las actividades innovadoras a puerta cerrada se está transformando en una innovación más abierta, que traspasa los límites organizativos, e integra recursos, capacidades internas y externas (Huo, 2021; Zhu *et al.*, 2021).

Desde este punto de vista relacional, las empresas adoptan cada vez más el aprendizaje interorganizativo, las alianzas, las cooperaciones, las colaboraciones o asociaciones, como mecanismos importantes para mejorar la capacidad, la posibilidad, la calidad y la eficiencia de la innovación de las organizaciones (Ahuja, 2000; Zhu *et al.*, 2021).

Como consecuencia, en el avance hacia economías basadas en el conocimiento las organizaciones pueden aprovechar las diversas bases de conocimiento de actores heterogéneos (Dallasega *et al.*, 2018); así mismo, las empresas asociadas pueden absorber competencias que no serían capaces de desarrollar individualmente. Las alianzas interorganizacionales son un medio de I+D para facilitar la transferencia, integración, combinación y creación de nuevos saberes para la creación de valor (Huo, 2021); es una forma de distribución de riesgos, apoyo logístico, aumento de la capacidad de respuesta al mercado y adquisición de conocimientos complementarios (Astuti *et al.*, 2022). En general, estas configuraciones complementan los recursos e internalizan los conocimientos técnicos, habilidades, mentalidades y aptitudes subyacentes de los socios (Zhu *et al.*, 2021).

Una organización con una alta tendencia a colaborar tiene más oportunidades de generar innovación y explorar las posibilidades de nuevas combinaciones de conocimientos (Yayavaram y Ahuja, 2008; Zhang y Luo, 2020). De hecho, más intercambios con otras organizaciones pueden mejorar la capacidad de la organización para explorar y explotar los elementos de conocimiento existentes, reducir los costos y la incertidumbre del proceso de la innovación. Como resultado de las colaboraciones en I+D, las empresas pueden utilizar estratégicamente los beneficios y promover aún más los niveles de innovación en la organización.

Innovación recombinante, exploratoria y de explotación

Desde la visión schumpeteriana, la innovación es el resultado de la recombinación, la cual “se refiere a la forma en que las viejas ideas pueden reconfigurarse de nuevas maneras para dar lugar a nuevas ideas” (Weitzman, 1998); en otras palabras, es una nueva combinación de componentes existentes o una nueva relación entre componentes previamente combinados; es un proceso de reorganización de ideas existentes (Fleming, 2001; Liu y Ma, 2019), esto implica que los inventores deban acceder a información diversificada y heterogénea.

Los procesos de búsqueda recombinante inducidos e impulsados por empresas individuales pueden acabar en bloqueos. Una forma de evitarlos es la colaboración que resulta de acceder a nuevos cuerpos de conocimientos que hagan posible recombinar ideas “frescas” (Müller et al., 2021). Cuanta mayor amplitud recombinante, mayor suele ser el impacto y el desempeño de las actividades de innovación (Cohen y Levinthal, 1990; Ferguson y Carnabuci, 2017; Liu y Ma, 2019), cuyos resultados pueden dar lugar tanto a innovaciones incrementales como radicales (Plunket y Starosta de Waldemar, 2022). Según Gallouj y Weinstein (citados por Nan et al., 2018), la *innovación de recombinación* consiste en combinar creativamente tecnologías existentes en una invención, que conducen a la alternancia de sus bases de conocimiento e interdependencia de diferentes dominios de conocimiento, a la par que son el punto de partida para una mayor búsqueda y resultados en el espacio tecnológico (Dibiaggio et al., 2014; Nan et al., 2018).

En el ese sentido, Zhang y Luo (2020) mencionan que al hecho de combinar elementos de una manera novedosa se le *denomina innovación exploratoria*, o *de exploración*, y la reconfiguración de elementos existentes, que generen nuevos usos o aplicaciones como el cambio de arquitectura de un producto o tecnología (Guan y Yan, 2016), se reconoce como *innovación de explotación*. Según el trabajo de March (1991), la exploración incluye la búsqueda, la variabilidad, el riesgo, la flexibilidad, el descubrimiento y, por ende, la innovación; por el contrario, la explotación se encuentra más asociada al perfeccionamiento, la elección, la eficacia, la aplicación, el mejoramiento y la ejecución. En este sentido, se argumenta que la innovación exploratoria y la de explotación se soportan recíprocamente; por consiguiente, un alto grado de esfuerzo en

explotación puede mejorar la eficacia de una organización en la exploración de nuevos conocimientos (Zhang y Luo, 2020), lo cual reduciría los costos de producción o de transacción, y la incertidumbre del proceso de la innovación.

Sin embargo, no todas las empresas obtienen los beneficios deseados para la innovación; por esto, es necesario centrarse en analizar los factores que afectan el desempeño de la innovación, ya que reflejan la asociación entre el rendimiento o desempeño de la innovación y las colaboraciones. Según Aldieri *et al.* (2020), el desempeño innovador puede verse influenciado por la coherencia y el alcance de la base de conocimientos, la inversión en investigación, el tamaño de la empresa y los flujos de conocimientos externos.

Como se muestra en la tabla 2, numerosos estudios han investigado cómo la gestión de las alianzas estratégicas y las actividades de colaboración pueden afectar el desempeño innovador de las organizaciones. Se han identificado los indicadores más utilizados y las variables independientes más analizadas.

Tabla 2. Indicadores del desempeño innovador

Variable dependiente: desempeño innovador			
Autor	Indicador	Razones	Variables independientes
Ferrigno <i>et al.</i> (2021)	Número de patentes presentadas antes y después de la formación de la alianza.	El número de patentes presentadas proporciona una medida constante de la generación de nuevos conocimientos. La amplia disponibilidad de datos de patentes en muchas industrias tecnológicas.	Relación tecnológica de los socios. Superposición competitiva de los socios. Experiencia de los socios. Tamaño relativo del socio.
Jeroen de Jong	Porcentaje de ingresos obtenidos de los nuevos productos introducidos en los últimos tres años.	Para las pequeñas empresas de alta tecnología, la introducción de nuevos productos constituye el núcleo de su estrategia competitiva, por lo que esta medida es la más pertinente.	Colaboración remota. Intensidad en I+D.

J.-Y. Lin (2020)	Dos medidas: (1) Número de patentes concedidas. Para medir el impacto del desempeño de la innovación. (2) Índice uno menos Herfindahl (HHI) de nuevas patentes que aplicaron diferentes clases de patentes en un año determinado (HHI para indicar la concentración de la cartera de patentes de campos tecnológicos).	Las patentes están disponibles de manera coherente y longitudinal, y los examinadores las validan en función de la novedad de la invención. El número de patentes concedidas se usa ampliamente para evaluar el desempeño de la innovación.	Experiencia de la alianza. Complejidad de la inversión. Intensidad de la inversión.
Ismail <i>et al.</i> (2022)	Desempeño de la innovación radical e incremental. Porcentaje de las ventas totales de la empresa a partir de la innovación.	Método utilizado por otros estudios. El conjunto de datos se basa en la innovación, la novedad en el mercado o una mejora de un producto existente que se introdujo en el periodo t-2 a t.	Amplitud de la colaboración. Distancia/proximidad cognitiva.
Zhu <i>et al.</i> (2021)	Suma de los recuentos ponderados de las solicitudes de patentes en los tres años posteriores al año de colaboración.	Dado que el impacto de las colaboraciones de I+D en el rendimiento de la innovación puede persistir durante un periodo prolongado, se usan los recuentos ponderados.	Colaboraciones de corta distancia. Colaboraciones de larga distancia (Cratio)
Anzola-Román <i>et al.</i> (2019)	El conjunto de ítems utilizados corresponde a dos aspectos diferentes del desempeño innovador: (1) la eficiencia y (2) la generación de innovación tecnológica. Se mide a través de cuestionarios.	Encuesta internacional de innovación abierta diseñada por estudios de investigación de universidades	Proximidad tecnológica. Intensidad de la colaboración en las primeras fases. Intensidad de la colaboración en fases tardías.
Li <i>et al.</i> (2021)	Número total de solicitudes de patentes.	La cantidad de solicitudes de patentes está directamente asociada con las actividades de innovación de la empresa, refleja el grado de innovación de la empresa y promueve directamente la mejora del valor de los activos de la empresa.	Internacionalización de I+D. Moderadoras: Alianzas tecnológicas nacionales. Capacidad de absorción. Competencia del mercado.

Conclusiones

Es posible superar los límites de las organizaciones mediante la incorporación de conocimientos y tecnología externa, por lo cual, las alianzas son un mecanismo crítico para la transferencia y creación de nuevo conocimiento. Sin embargo, para llevar a cabo la colaboración para la innovación, es necesario que los socios colaboradores establezcan canales de transmisión y procedimientos de interacción adecuados para transferir conocimientos nuevos y combinatorios, de manera que se aproveche la diversidad interna de las organizaciones. En este sentido, la eficacia en la gestión de las relaciones interorganizacionales, y la coordinación de las estrategias de creación y difusión tecnológica comprenden requisitos para alcanzar el mayor desempeño innovador.

Por otro lado, los resultados empíricos revisados en la literatura han demostrado que la proximidad tecnológica y el desempeño de la innovación en las alianzas están relacionados en forma de U invertida, por lo que es fundamental para las empresas mantener una medida de proximidad adecuada para obtener los mayores beneficios de la innovación. La proximidad tecnológica se emplea como una medida indirecta de la proximidad cognitiva, con el objetivo de entender cómo se da el solapamiento de las bases de conocimiento tecnológico entre los actores involucrados.

Además del componente teórico, este artículo ofrece a los gerentes y tomadores de decisiones de las organizaciones varias estrategias prácticas para maximizar los beneficios de las alianzas interorganizacionales y fomentar la innovación dentro de sus organizaciones. En primer lugar, es clave seleccionar socios adecuados que complementen las capacidades y objetivos de la empresa. Esto implica priorizar la compatibilidad, el compromiso mutuo y evaluar los posibles riesgos de desbordamiento de conocimiento, o *spillovers*, para proteger los activos estratégicos. Igualmente, la gestión de relaciones interorganizacionales debe basarse en la confianza, la comunicación fluida y la construcción de lazos sólidos. Esto posicionará estratégicamente a la organización dentro de redes interorganizacionales para aumentar el acceso a recursos clave y nuevas oportunidades de colaboración.

Diversificar las alianzas también es esencial. Esto involucra la combinación de acuerdos exploratorios, enfocados en adquirir nuevos conocimientos, con acuerdos de explotación, orientados a aprovechar tecnologías y capacidades existentes. Otro elemento clave es mantener una proximidad tecnológica y cognitiva moderada entre los socios, ya que esto facilita la transferencia de conocimientos sin limitar la diversidad creativa.

Por último, para asegurar el éxito de estas alianzas, hay que establecer métricas claras que permitan monitorear y evaluar el desempeño, como el número de patentes generadas o el porcentaje de ingresos provenientes de nuevos productos. Un análisis continuo de los resultados facilita ajustes estratégicos cuando sea necesario.

Aunque el presente artículo presenta una revisión de literatura general sobre las alianzas interorganizacionales y su relación con la innovación, muestra algunas limitaciones que deben considerarse. Por una parte, algunos conceptos clave declarados, como la gestión de riesgos asociados al desbordamiento de conocimiento (*spillovers*) y la centralidad en redes interorganizacionales, podrían beneficiarse de estudios empíricos más recientes y aplicados a contextos específicos. Futuros estudios podrían centrarse en asuntos más operativos de industrias específicas, sectores distintivos o economías emergentes. Esto exige analizar factores contextuales como entornos regulatorios, dinámicas culturales y restricciones económicas. Además, aunque se destacan indicadores cuantitativos como el número de patentes o los ingresos por nuevos productos, se presta poca atención a beneficios cualitativos menos tangibles, como el aprendizaje organizacional o la mejora de la reputación.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad Industrial de Santander, por el apoyo en infraestructura tecnológica para desarrollar esta investigación. A la Vicerrectoría de Investigación y Extensión, por el apoyo para la presentación de los resultados de la investigación. A los miembros del grupo de investigación Innotec, por su guía y consejos en el proceso de investigación. A la profesora Leonor Avilés Arenas, por su valioso apoyo en la corrección y edición de estilo para el documento final.

Referencias

- Ahuja, G. (2000). Collaboration networks, structural holes, and innovation: a longitudinal study. *Administrative Science Quarterly*, 45(3), 425–455. <https://doi.org/10.2307/2667105>
- Aldieri, L., Bruno, B., Senatore, L., y Vinci, C. P. (2020). The future of pharmaceuticals industry within the triad: the role of knowledge spillovers in innovation process. *Futures*, 122, 102600. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2020.102600>
- Anzola-Román, P., Bayona-Sáez, C., García-Marco, T., y Lazzarotti, V. (2019). Technological proximity and the intensity of collaboration along the innovation funnel: direct and joint effects on innovative performance. *Journal of Knowledge Management*, 23(5), 931-952. <https://doi.org/10.1108/JKM-10-2018-0640>

- Ariño, Á. (2007). Alianzas estratégicas: opciones para el crecimiento de la empresa. *Estrategia Financiera*, (236), 40-51. http://www.earthgonomic.org/biblioteca/Diplomado_Modulo3/Tema2_Alianzas-estrategicas-opciones-para-el-crecimiento-de-la-empresa.pdf
- Arksey, H., y O'Malley, L. (2005). Scoping studies: towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, 8(1), 19-32. <https://doi.org/10.1080/1364557032000119616>
- Astuti, E. S., Arifin, Z., Wilopo, W., e Iqbal, M. (2022). Effects of trading partner relationships and knowledge complementarity on innovation performance. *Journal of Asia Business Studies*, 16(1), 53-79. <https://doi.org/10.1108/JABS-01-2019-0012>
- Audretsch, D. B., y Feldman, M. P. (1996). R&D spillovers and the geography of innovation and production. *The American Economic Review*, 86(3), 630-640. <http://www.jstor.org/stable/2118216>
- Boschma, R. (2005). Proximity and innovation: a critical assessment. *Regional Studies*, 39(1), 61-74. <https://doi.org/10.1080/0034340052000320887>
- Cassi, L., y Plunket, A. (2014). Proximity, network formation and inventive performance: in search of the proximity paradox. *The Annals of Regional Science*, 53, 395-422. <https://doi.org/10.1007/s00168-014-0612-6>
- Chen, Y. (2020). Integration decisions and technology innovation in Chinese technology-sourcing overseas M&As: an empirical analysis based on PLS path modelling. *Asian Journal of Technology Innovation*, 28(3), 343-362. <https://doi.org/10.1080/19761597.2020.1761260>
- Cohen, W. M., y Levinthal, D. A. (1989). Innovation and learning: two faces of R&D. *The Economic Journal*, 99(397), 569-596. <https://doi.org/10.2307/2233763>
- Cohen, W. M., y Levinthal, D. A. (1990). Absorptive capacity: a new perspective on learning and innovation. *Administrative Science Quarterly*, 35(1), 128-152. <https://psycnet.apa.org/record/1990-21265-001>
- Collins, J., y Riley, J. (2013). Alliance portfolio diversity and firm performance: examining moderators. *Journal of Business and Management*, 19(2), 35-50. <http://jbm.johogo.com/pdf/volume/1902/JBM-1902-03-full.pdf>
- Criscuolo, P., Laursen, K., Reichstein, T., y Salter, A. (2018). Winning combinations: search strategies and innovativeness in the UK. *Industry and Innovation*, 25(2), 115-143. <https://doi.org/10.1080/13662716.2017.1286462>

- Dallasega, P., Rauch, E., y Linder, C. (2018). Industry 4.0 as an enabler of proximity for construction supply chains: a systematic literature review. *Computers in Industry*, 99, 205-225. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.03.039>
- Dhir, S., Rajan, R., Ongsakul, V., Owusu, R. A., y Ahmed, Z. U. (2021). Critical success factors determining performance of cross-border acquisition: evidence from the African telecom market. *Thunderbird International Business Review*, 63(1), 43-61. <https://doi.org/10.1002/tie.22156>
- Dibiaggio, L., Nasiriyar, M., y Nesta, L. (2014). Substitutability and complementarity of technological knowledge and the inventive performance of semiconductor companies. *Research Policy*, 43(9), 1582-1593. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2014.04.001>
- Enkel, E., Groemminger, A., y Heil, S. (2018). Managing technological distance in internal and external collaborations: absorptive capacity routines and social integration for innovation. *The Journal of Technology Transfer*, 43(5), 1257-1290. <https://doi.org/10.1007/s10961-017-9557-0>
- Ferguson, J.-P., y Carnabuci, G. (2017). Risky recombinations: institutional gatekeeping in the innovation process. *Organization Science*, 28(1), 133-151. <https://www.jstor.org/stable/26179310>
- Ferrigno, G., Dagnino, G. B., y Di Paola, N. (2021). R&D alliance partner attributes and innovation performance: a fuzzy set qualitative comparative analysis. *Journal of Business & Industrial Marketing*, 36(13), 54-65. <https://doi.org/10.1108/JBIM-07-2020-0314>
- Filiou, D., y Massini, S. (2018). Industry cognitive distance in alliances and firm innovation performance. *R&D Management*, 48(4), 422-437. <https://doi.org/10.1111/radm.12283>
- Fleming, L. (2001). Recombinant uncertainty in technological search. *Management Science*, 47(1), 117-132. <http://www.jstor.com/stable/2661563>
- Fornahl, D., Broekel, T., y Boschma, R. (2011). What drives patent performance of German biotech firms? The impact of R&D subsidies, knowledge networks and their location. *Papers in Regional Science*, 90(2), 395-418. <https://doi.org/10.1111/j.1435-5957.2011.00361.x>
- Françoso, M. S., y Vonortas, N. S. (2022). Gatekeepers in regional innovation networks: evidence from an emerging economy. *The Journal of Technology Transfer*, 48, 821-841. <https://doi.org/10.1007/s10961-022-09922-4>
- García, R., Araújo, V., Mascarini, S., Gomes dos Santos, E., y Costa, A. (2018). Is cognitive proximity a driver of geographical distance of university-industry collaboration? *Area Development and Policy*, 3(3), 349-367. <https://doi.org/10.1080/23792949.2018.1484669>

- Gilsing, V. A., Lemmens, C. E. A. V., y Duysters, G. (2007). Strategic alliance networks and innovation: a deterministic and voluntaristic view combined. *Technology Analysis & Strategic Management*, 19(2), 227-249. <https://doi.org/10.1080/09537320601168151>
- Gilsing, V., Nooteboom, B., Vanhaverbeke, W., Duysters, G., y Van den Oord, A. (2008). Network embeddedness and the exploration of novel technologies: technological distance, betweenness centrality and density. *Research Policy*, 37(10), 1717-1731. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2008.08.010>
- Grant, M. J., y Booth, A. (2009). A typology of reviews: an analysis of 14 review types and associated methodologies. *Health Information and Libraries Journal*, 26(2), 91-108. <https://doi.org/10.1111/j.1471-1842.2009.00848.x>
- Guan, J. C., y Yan, Y. (2016). Technological proximity and recombinative innovation in the alternative energy field. *Research Policy*, 45(7), 1460-1473. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2016.05.002>
- Gulati, R., Lavie, D., y Madhavan, R. (2011). How do networks matter? The performance effects of interorganizational networks. *Research in Organizational Behavior*, 31, 207-224. <https://doi.org/10.1016/j.riob.2011.09.005>
- Gulati, R., Wohlgezogen, F., y Zhelyazkov, P. (2012). The two facets of collaboration: cooperation and coordination in strategic alliances. *The Academy of Management Annals*, 6(1), 531-583. <https://doi.org/10.1080/19416520.2012.691646>
- Hagedoorn, J. (2002). Inter-firm R&D partnerships: an overview of major trends and patterns since 1960. *Research Policy*, 31(4), 477-492. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00120-2](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00120-2)
- Harrigan, K. R., Di Guardo, M. C., Marku, E., y Vélez, B. N. (2016). Using a distance measure to operationalise patent originality. *Technology Analysis & Strategic Management*, 29(9), 988-1001. <https://doi.org/10.1080/09537325.2016.1260106>
- Ho, M. H.-W., Ghauri, P. N., y Larimo, J. A. (2018). Institutional distance and knowledge acquisition in international buyer-supplier relationships: the moderating role of trust. *Asia Pacific Journal of Management*, 35(2), 427-447. <https://doi.org/10.1007/s10490-017-9523-2>
- Hughes, J., y Weiss, J. (2007). Simple rules for making alliances work. *Harvard Business Review*, 85(11), 122-6, 128, 130-1.
- Huo, D. (2021). Local search or beyond? The influence of interfirm technological distance on co-innovation success. *Industrial and Corporate Change*, 30(4), 966-982. <https://doi.org/10.1093/icc/dtab013>

- Ismail, M., Bello-Pintado, A., y García-Marco, T. (2024). How many to be different? The role of number and the partner type on innovation performance. *Innovation*, 26(1), 145-168. <https://doi.org/10.1080/14479338.2022.2084545>
- Jaffe, A. B., Trajtenberg, M., y Henderson, R. (1993). Geographic localization of knowledge spillovers as evidenced by patent citations. *The Quarterly Journal of Economics*, 108(3), 577-598. <https://doi.org/10.2307/2118401>
- Jee, S. J., y Sohn, S. Y. (2020). Patent-based framework for assisting entrepreneurial firms' R&D partner selection: leveraging their limited resources and managing the tension between learning and protection. *Journal of Engineering and Technology Management*, 57, 101575. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2020.101575>
- Kaiser, U. (2002). Measuring knowledge spillovers in manufacturing and services: an empirical assessment of alternative approaches. *Research Policy*, 31(1), 125-144. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(00\)00159-1](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(00)00159-1)
- Khanna, T. (1998). The scope of alliances. *Organization Science*, 9(3), 340-355. <http://www.jstor.org/stable/2640227>
- Kim, C., y Song, J. (2007). Creating new technology through alliances: an empirical investigation of joint patents. *Technovation*, 27(8), 461-470. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2007.02.007>
- Knoben, J., y Oerlemans, L. (2006). Proximity and inter-organizational collaboration: a literature review. *International Journal of Management Reviews*, 8(2), 71-89. <https://doi.org/10.1111/j.1468-2370.2006.00121.x>
- Krammer, S. M. (2016). The role of diversification profiles and dyadic characteristics in the formation of technological alliances: differences between exploitation and exploration in a low-tech industry. *Research Policy*, 45(2), 517-532. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.10.014>
- Lane, P. J., y Lubatkin, M. (1998). Relative absorptive capacity and interorganizational learning. *Strategic Management Journal*, 19(5), 461-477. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0266\(199805\)19:5<461::AID-SMJ953>3.3.CO;2-C](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0266(199805)19:5<461::AID-SMJ953>3.3.CO;2-C)
- Lane, P. J., Koka, B. R., y Pathak, S. (2006). The reification of absorptive capacity: a critical review and rejuvenation of the construct. *Academy of Management Review*, 31(4), 833-863. <https://doi.org/10.5465/amr.2006.22527456>

- Laursen, K., Leone, M. I., y Torrissi, S. (2010). Technological exploration through licensing: new insights from the licensee's point of view. *Industrial and Corporate Change*, 19(3), 871-897. <https://doi.org/10.1093/icc/dtq034>
- Lee, J., y Kim, M. (2014). Market-driven technological innovation through acquisitions: the moderating effect of firm size. *Journal of Management*, 42(7), 1934-1963. <https://doi.org/10.1177/0149206314535439>
- Li, J., Liu, G., y Ma, Z. (2021). RD internationalization, domestic technology alliance, and innovation in emerging market. *PloS ONE*, 16(6), e0252669. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0252669>
- Lin, J.-Y. (2020). What affects new venture firm's innovation more in corporate venture capital? *European Management Journal*, 38(4), 646-660. <https://doi.org/10.1016/j.emj.2020.01.004>
- Lin, C., Wu, Y.-J., Chang, C., Wang, W., y Lee, C.-Y. (2012). The alliance innovation performance of R&D alliances—the absorptive capacity perspective. *Technovation*, 32(5), 282-292.
- Liu, J., y Ma, T. (2019). Innovative performance with interactions between technological proximity and geographic proximity: evidence from China electronics patents. *Technology Analysis & Strategic Management*, 31(6), 667-679. <https://doi.org/10.1080/09537325.2018.1542672>
- March, J G. (1991). Exploration and exploitation in organizational learning. *Organization Science*, 2(1), 71-87. <http://www.jstor.org/stable/2634940>
- Martínez Ardila, H. E., Castro, F. L., y Chaparro, M. (2020). Distancia tecnológica entre bases de conocimiento de las organizaciones socias y valor de la innovación conjunta en alianzas interorganizativas. Estudio basado en patentes tecnológicas. *Profesional de la Información*, 28(6), 211-231. <https://doi.org/10.3145/epi.2019.nov.15>
- Martínez Ardila, H. E., Mora Moreno, J. E., y Camacho Pico, J. A. (2018). Networks of collaborative alliances: the second order interfirm technological distance and innovation performance. *The Journal of Technology Transfer*, 45(4), 1255-1282. <https://doi.org/10.1007/s10961-018-9704-2>
- Mattes, J. (2012). Dimensions of proximity and knowledge bases: innovation between spatial and non-spatial factors. *Regional Studies*, 46(8), 1085-1099. <https://doi.org/10.1080/00343404.2011.552493>
- Mindruta, D., Moeen, M., y Agarwal, R. (2016). A two-sided matching approach for partner selection and assessing complementarities in partners' attributes in inter-firm alliances. *Strategic Management Journal*, 37(1), 206-231. <https://doi.org/10.1002/smj.2448>

- Müller, M., Kudic, M., y Vermeulen, B. (2021). The influence of the structure of technological knowledge on inter-firm R&D collaboration and knowledge discovery: an agent-based simulation approach. *Journal of Business Research*, 129, 570-79. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.01.067>
- Nan, D., Liu, F., y Ma, R. (2018). Effect of proximity on recombination innovation in R&D collaboration: an empirical analysis. *Technology Analysis & Strategic Management*, 30(8), 921-934. <https://doi.org/10.1080/09537325.2018.1424327>
- Nooteboom, B. (2000). Institutions and forms of co-ordination in innovation systems. *Organization Studies*, 21(5), 915-939. <https://doi.org/10.1177/0170840600215004>
- Nooteboom, B., Vanhaverbeke, W., Duysters, G., Gilsing, V. A., y Van den Oord, A. (2006). *Optimal cognitive distance and absorptive capacity*. CentER Discussion Paper Series n.º 2006-33. SSRN. <https://ssrn.com/abstract=90374>
- Organisation for Economic Co-operation and Development, y European Statistical Office. (2018). *Oslo manual 2018: guidelines for collecting, reporting and using data on innovation*. (4a. ed.). The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities. OECD Publishing.
- Peña, I., y Aranguren, M. J. (2002). Transferencia de conocimiento mediante acuerdos de colaboración. *Economía Industrial*, (346), 67-80. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=716704>
- Plunket, A., y Starosta de Waldemar, F. (2022). Regional recombinant novelty, related and unrelated technologies: a patent-level approach. *Regional Studies*, 57(7), 1267-1288. <https://doi.org/10.1080/00343404.2022.2114595>
- Rothaermel, F. T., y Boeker, W. (2008). Old technology meets new technology: complementarities, similarities, and alliance formation. *Strategic Management Journal*, 29(1), 47-77. <https://doi.org/10.1002/smj.634>
- Sarkar, M. B., Aulakh, P. S., y Madhok, A. (2009). Process capabilities and value generation in alliance portfolios. *Organization Science*, 20(3), 583-600. <http://www.jstor.org/stable/25614676>
- Schumpeter, J. A. (2021). *The theory of economic development*. Routledge.
- Shah, R. H., y Swaminathan, V. (2008). Factors influencing partner selection in strategic alliances: the moderating role of alliance context. *Strategic Management Journal*, 29(5), 471-494. <https://doi.org/10.1002/smj.656>

- Song, Y., Berger, R., Rachamim, M., Johnston, A., y Colladon, A. F. (2022). Modeling the industry perspective of university-industry collaborative innovation alliances: player behavior and stability issues. *International Journal of Engineering Business Management*, 14, 1-18. <https://doi.org/10.1177/18479790221097235>
- Subramanian, A. M., Bo, W., y Kah-Hin, C. (2018). The role of knowledge base homogeneity in learning from strategic alliances. *Research Policy*, 47(1), 158-168. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2017.10.005>
- Sudhindra, S., Ganesh, L. S., y Kaur, A. (2020). Strategic parameters of knowledge sharing in supply chains. *Knowledge Management Research & Practice*, 18(3), 310-322. <https://doi.org/10.1080/14778238.2019.1654417>
- Todorova, G., y Durisin, B. (2007). Absorptive capacity: valuing a reconceptualization. *The Academy of Management Review*, 32(3), 774-786. <http://www.jstor.org/stable/20159334>
- Un, C. A., y Rodríguez, A. (2018). Local and global knowledge complementarity: R&D collaborations and innovation of foreign and domestic firms. *Journal of International Management*, 24(2), 137-152. <https://doi.org/10.1016/j.intman.2017.09.001>
- Weitzman, M. L. (1998). Recombinant growth. *The Quarterly Journal of Economics*, 113(2), 331-360. <https://doi.org/10.1162/003355398555595>
- World Intellectual Property Organization. (2022). *Global innovation index 2022: What is the future of innovation-driven growth?* <https://doi.org/10.34667/tind.46596>
- Yan, Y., Dong, J. Q., y Faems, D. (2020). Not every coopetitor is the same: the impact of technological, market and geographical overlap with coopetitors on firms' breakthrough inventions. *Long Range Planning*, 53(1), 101873. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2019.02.006>
- Yayavaram, S., y Ahuja, G. (2008). Decomposability in knowledge structures and its impact on the usefulness of inventions and knowledge-base malleability. *Administrative Science Quarterly*, 53(2), 333-362. <https://doi.org/10.2189/asqu.53.2.333>
- Yoruk, D. E. (2019). Dynamics of firm-level upgrading and the role of learning in networks in emerging markets. *Technological Forecasting and Social Change*, 145, 341-369. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2018.06.042>
- Zhang, Z., y Luo, T. (2020). Network capital, exploitative and exploratory innovations—from the perspective of network dynamics. *Technological Forecasting and Social Change*, 152, 119910. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.119910>
- Zhang, J., y Tan, R. (2022). Radical concept generation inspired by cross-domain knowledge. *Applied Sciences*, 12(10), 4929. <https://doi.org/10.3390/app12104929>

- Zhu, S., Hagedoorn, J., Zhang, S., y Liu, F. (2021). Effects of technological distance on innovation performance under heterogeneous technological orientations. *Technovation*, 106, 102301. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2021.102301>
- Zineldin, M., Fujimoto, H., Li, Y., Kassean, H., Vasicheva, V., y Yu, W. F. (2015). Why do both marriages and strategic alliances have over 50 % failure rate? A study of relationship quality of strategic alliances in China, Japan and Mauritius. *International Journal of Strategic Business Alliances*, 4(1), 1. <https://doi.org/10.1504/IJSBA.2015.069305>
- Zoogah, D. B., Noe, R. A., y Shenkar, O. (2015). Shared mental model, team communication and collective self-efficacy: an investigation of strategic alliance team effectiveness. *International Journal of Strategic Business Alliances*, 4(4), 244. <https://doi.org/10.1504/IJSBA.2015.075383>



Monitoreo de cultivos y suelos en agricultura de precisión con UAV e inteligencia artificial: una revisión

Crop and Soil Monitoring in Precision Agriculture with UAVs and Artificial Intelligence: A Review

Elías Buitrago Bolívar ¹, John Alexander Rico Franco ² y Sócrates Rojas Amador ³

Fecha de Recepción: 14 de junio de 2024

Fecha de Aceptación: 15 de diciembre de 2024

Cómo citar: Buitrago Bolívar, E., Rico Franco, J. A., y Rojas Amador, S. (2024). Monitoreo de cultivos y suelos en agricultura de precisión con UAV e inteligencia artificial: una revisión. *Tecnura*, 28(82), 75-103. <https://doi.org/10.14483/22487638.22360>


Resumen


Contexto: la creciente demanda global de alimentos, junto con los retos ambientales y sociales asociados a la intensificación agrícola, ha impulsado el desarrollo de soluciones tecnológicas que mejoren la eficiencia y sostenibilidad de la producción. En este escenario, la agricultura de precisión, apoyada en vehículos aéreos no tripulados (*unmanned aerial vehicle* [UAV]) y en inteligencia artificial (IA), se posiciona como una herramienta clave para el monitoreo detallado de cultivos y suelos.


Objetivo: este artículo presenta una revisión estructurada de la literatura científica sobre técnicas de detección remota basadas en UAV, con énfasis en aplicaciones orientadas a la estimación de niveles de fertilización, biomasa aérea, predicción de rendimiento y detección de plagas y malezas en sistemas agrícolas.

Metodología: se efectuó una búsqueda sistemática en bases de datos académicas (Scopus y Web of Science), mediante combinaciones de términos clave relacionados con agricultura de precisión, UAV, teledetección, IA y monitoreo agronómico. Se recurrió a criterios de selección rigurosos que resultaron en la inclusión de 62 artículos para análisis. La información se sintetizó mediante un enfoque comparativo de técnicas, sensores, algoritmos y métricas de desempeño.

Resultados: la revisión evidenció una tendencia creciente hacia el uso de UAV equipados con sensores RGB, multiespectrales, hiperespectrales y LiDAR, junto con técnicas de aprendizaje automático y profundo, para estimar parámetros clave del cultivo como el índice de área foliar (*leaf area index* [LAI]), contenido de nitrógeno y rendimiento. Se identificaron enfoques prometedores basados en fusión multimodal de datos y modelos híbridos (CNN + GRU, ensambles), capaces de superar limitaciones de métodos clásicos como la saturación espectral. Sin embargo,

¹ Profesor Facultad de Sistemas, Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Grupo de Investigación K-Demy 
Correo electrónico: ebuitragob@itc.edu.co

² Profesor Facultad de Sistemas, Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Grupo de Investigación K-Demy 
Correo electrónico: jfrancor@itc.edu.co

³ Profesor Facultad de Sistemas, Escuela Tecnológica Instituto Técnico Central, Grupo de Investigación K-Demy 
Correo electrónico: rsocrates@itc.edu.co

se detectó escasa disponibilidad de bases de datos abiertas y poca estandarización en los protocolos de adquisición, lo que dificulta la replicabilidad y generalización de los modelos.

Conclusiones: el uso integrado de UAV e IA representa una herramienta transformadora para la gestión agrícola inteligente. No obstante, su implementación efectiva requiere superar barreras técnicas, económicas y estructurales; además, debe promover el acceso abierto a datos y el desarrollo de soluciones contextualizadas. Esta revisión destaca la importancia de avanzar hacia sistemas más explicables, ligeros y adaptables, así como de fomentar una transformación digital agrícola inclusiva y responsable.

Palabras clave: agricultura de precisión, UAV, detección remota, inteligencia artificial, aprendizaje automático, fertilización, biomasa, predicción de rendimiento, apropiación tecnológica.

Abstract

Background: The growing global demand for food, along with the environmental and social challenges associated with agricultural intensification, has driven the development of technological solutions aimed at improving the efficiency and sustainability of food production. In this context, precision agriculture, supported by unmanned aerial vehicles (UAVs) and artificial intelligence (AI), emerges as a key tool for the detailed monitoring of crops and soils.

Objective: This article presents a structured review of the scientific literature on UAV-based remote sensing techniques, with an emphasis on applications aimed at estimating fertilization levels, aboveground biomass, yield prediction, and the detection of pests and weeds in agricultural systems.

Methodology: A systematic search was conducted in academic databases (Scopus and Web of Science), using combinations of key terms related to precision agriculture, UAV, remote sensing, AI, and agronomic monitoring. Rigorous inclusion criteria were applied, resulting in the selection of 62 articles for analysis. The information was synthesized through a comparative approach of techniques, sensors, algorithms, and performance metrics.

Results: The review highlights a growing trend in the use of UAVs equipped with RGB, multispectral, hyperspectral, and LiDAR sensors, combined with machine learning and deep learning techniques, to estimate key crop parameters such as leaf area index (LAI), nitrogen content, and yield. Promising approaches were identified based on multimodal data fusion and hybrid models (CNN + GRU, ensemble methods), capable of overcoming limitations of classical methods such as spectral saturation. However, a lack of open-access datasets and limited standardization in data acquisition protocols were observed, which hinders the replicability and generalization of models.

Conclusions: The integrated use of UAVs and AI represents a transformative tool for smart agricultural management. Nevertheless, effective implementation requires overcoming technical, economic, and structural barriers, as well as promoting open data access and the development of context-aware solutions. This review underscores the importance of advancing toward more explainable, lightweight, and adaptable systems, and fostering an inclusive and responsible digital transformation of agriculture.

Keywords: Precision agriculture, UAV, remote sensing, artificial intelligence, machine learning, fertilization, biomass, yield prediction, technological adoption.

Introducción

A partir del estudio pionero de (1), a lo largo de la década de 1990 se llevaron a cabo una serie de investigaciones centradas en el desarrollo de métodos de muestreo del suelo, para medir eficazmente la calidad de la fertilización. Estos estudios incorporaron herramientas tecnológicas

cas avanzadas a las prácticas agrícolas rutinarias; además, demostraron cómo las variaciones en los niveles de fertilizantes del suelo podían atribuirse a la variabilidad introducida por los métodos de muestreo del análisis del suelo. Este conjunto de conocimientos ha dado lugar a propuestas innovadoras para optimizar las estrategias de fertilización y garantizar una gestión sostenible de los recursos agrícolas. De ahí han surgido conceptos clave en la agricultura de precisión, como el *muestreo estratégico de nutrientes*, *las evaluaciones de la toxicidad del suelo agrícola* y *la fertilización de precisión con dosificación variable para cultivos productivos* (2).

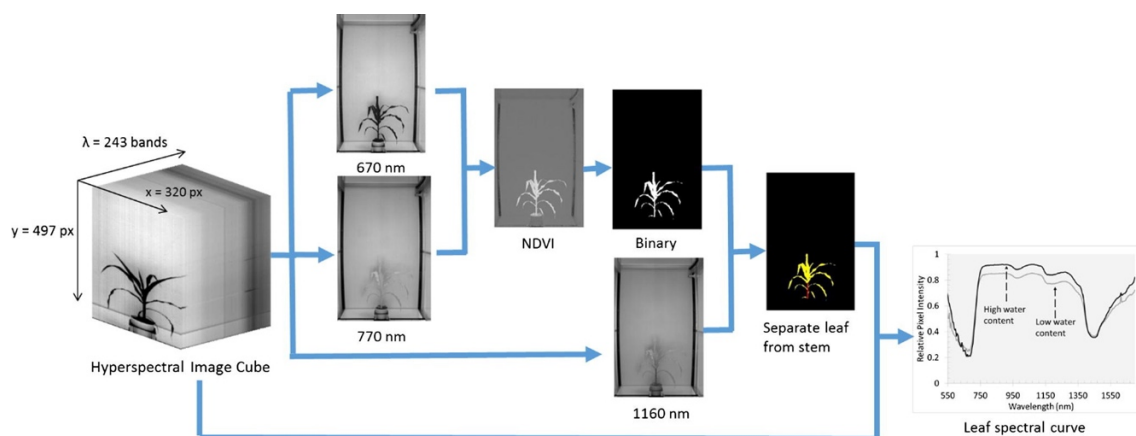


Figura 1. Análisis de imágenes hiperespectrales para predecir el contenido de agua de la hoja de la planta. Tomado de (4).

La evolución en estos métodos de estudio agrícola ha facilitado la incorporación de variables más específicas y detalladas, y ha enriquecido significativamente el análisis de suelos. Por ejemplo, pueden medirse los efectos de la inclinación del terreno en los índices de fertilización o los impactos negativos de la sobredosificación de fertilizantes en otros seres vivos del ecosistema. Este progreso ha resultado en innovaciones significativas, como la integración de mapas de contornos tridimensionales, modelos geoestadísticos y técnicas cartográficas, sistemas de información geográfica (SIG), los sistemas de posicionamiento global (SPG) y las técnicas de monitoreo remoto (3).

Los drones comerciales (*unmanned aerial vehicles* [UAV]) pueden equiparse con diversos sensores y cámaras para captar imágenes y facilitar los procesos de telemetría (5) (véase figura 1). Esta capacidad ha impulsado el desarrollo de aplicaciones de supervisión y control remotos para la gestión de cultivos, por medio de la integración activa de los UAV como herramientas versátiles en la producción agrícola de nueva generación (6). Las investigaciones en esta área demuestran cómo las imágenes panorámicas captadas por UAV sirven para calcular índices de vegetación, los cuales pueden correlacionarse con varios aspectos de la salud y vitalidad de

las plantas: crecimiento, altura, densidad y medidas geométricas de referencia específicas. Este enfoque acentúa la utilidad de las imágenes basadas en UAV para proporcionar información detallada y procesable sobre el estado y el desarrollo de los cultivos (7). Entonces, la literatura especializada resalta la decidida integración de UAV para detección remota por medio de distintas cámaras, con sensores remotos, sistemas de información en tiempo real e inteligencia artificial (IA), según requerimientos concretos y definidos. De hecho, la utilización de UAV como apoyo a procesos agrícolas representa un campo de investigación y desarrollo en expansión, con miras a lograr su integración a los flujos de trabajo y a operaciones agroindustriales de precisión (8,9).

En la literatura hay una gran diversidad de índices de vegetación (IV) y sus aplicaciones en casos de uso bien definidos. Una primera aproximación a índices primarios de vegetación para aplicaciones de detección remota, basadas en UAV la plantean (5). Los autores proponen una clasificación de los IV en dos grupos: térmicos y espectrales, y ponen de manifiesto un caso de uso que era el foco en ese momento, la utilización de distintos IV para la detección de estrés hídrico. Posteriormente, otros estudios han registrado la evolución y aplicaciones de los IV basados en imágenes obtenidas por UAV, como se observa en los trabajos de (10–12) y (13).

La reciente disponibilidad de distintos sensores y cámaras especializados para UAV ha impulsado el desarrollo de nuevos usos para la teledetección de cultivos, lo cual amplía las capacidades de la agricultura de precisión a los siguientes campos: estrés hídrico, estado nutricional de los cultivos (particularmente niveles de nitrógeno), y monitoreo de plagas y enfermedades (14,15).

El objetivo de este artículo es presentar una revisión estructurada de la literatura científica sobre el uso UAV e IA, en aplicaciones de agricultura de precisión, con énfasis en la estimación de niveles de fertilización, biomasa aérea, detección de plagas y predicción de rendimiento. Esta revisión se fundamenta en el análisis de 62 estudios primarios recientes que integran imágenes captadas por UAV con técnicas de visión por computador y modelos de aprendizaje automático. El artículo se organiza como sigue: la introducción contextualiza los avances históricos y tecnológicos en agricultura de precisión con UAV; la metodología detalla el proceso de búsqueda, selección y análisis de la literatura revisada; luego se sintetizan los resultados más relevantes organizados por área de aplicación; las últimas dos partes plantean una discusión crítica y las conclusiones generales; además, se resaltan los avances, limitaciones y oportunidades futuras identificadas en este campo.

Metodología

La presente revisión de literatura se llevó a cabo siguiendo una metodología estructurada, diseñada para identificar, sintetizar y analizar de manera sistemática los estudios primarios publicados recientemente sobre el uso de UAV y técnicas de IA en agricultura de precisión. Se enfatizó en las aplicaciones sobre monitoreo de cultivos y estimación de parámetros clave, fertilización, estimación de biomasa, detección de plagas y predicción de rendimiento. Este enfoque buscó asegurar la transparencia y reproducibilidad de la selección de la literatura, para así iniciar el análisis crítico de los hallazgos empíricos.

Fuentes de información

La búsqueda de literatura relevante se realizó en las bases de datos Scopus y Web of Science (WoS). Estas fueron elegidas estratégicamente debido a su indexación de literatura *peer-reviewed* de alto impacto, lo cual contribuyó a garantizar la calidad y pertinencia de los estudios identificados.

Estrategia de búsqueda

Para identificar los artículos relevantes, se emplearon las siguientes cadenas de búsqueda en cada base de datos:

- *Scopus*. TITLE-ABS-KEY((UAV OR “unmanned aerial vehicle” OR UAS) AND (“artificial intelligence” OR “machine learning” OR “deep learning”) AND (“precision agriculture” OR “precision farming”) AND (crop* OR plant* OR vegetation OR field* OR agricul* OR soil* OR land OR fertiliz* OR nitrogen OR phosphorus OR potassium OR biomass OR yield OR pest* OR disease* OR “plant density” OR “vegetation index*” OR “spectral analysis”))
- *Web of Science*. ALL=((“UAV” OR “unmanned aerial vehicle” OR UAS) AND (“artificial intelligence” OR “machine learning” OR “deep learning”) AND (“precision agriculture” OR “precision farming”) AND ((“crop*” OR “plant*” OR “vegetation.” OR “field*” OR agricul*) OR (“soil*” OR land) OR fertiliz* OR nitrogen OR phosphorus OR potassium OR biomass OR yield OR pest* OR disease* OR “plant density” OR “vegetation index*” OR “spectral analysis”))

La búsqueda abarcó publicaciones entre los años 2020 y 2024. Esta limitación temporal permitió focalizar la revisión en los avances más recientes y relevantes en el campo. La ejecución de esta estrategia de búsqueda en las plataformas seleccionadas resultó en una identificación inicial de un total de 1165 artículos.

Criterios de selección

Los artículos identificados en la fase de búsqueda fueron sometidos a una rigurosa selección, a partir de criterios de inclusión y exclusión predefinidos para determinar el conjunto final de estudios que conformarían el corpus de la revisión. Estos criterios se detallan en la tabla 1.

Tabla 1. Criterios de selección para la revisión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Publicaciones correspondientes a artículos de investigación originales (estudios primarios) en revistas científicas con revisión por pares o actas de conferencias relevantes.	Documentos que no corresponden a literatura científica <i>peer-reviewed</i> (por ejemplo: editoriales, noticias, blogs, resúmenes extendidos sin publicación completa asociada).
Estudios que describen la aplicación o el uso de UAV o drones en contextos agrícolas.	Artículos de revisión o metaanálisis.
Trabajos que involucren la utilización de técnicas de inteligencia artificial (IA), aprendizaje automático (<i>machine learning</i> [ML]) o aprendizaje profundo (<i>deep learning</i> [DL]) para el análisis de imágenes o datos obtenidos por UAV.	Estudios que, si bien utilizan UAV o IA/ML/DL, no aplican <i>ambas tecnologías de forma combinada</i> en el análisis de datos para agricultura.
Artículos centrados en aplicaciones de agricultura de precisión, específicamente relacionadas con el monitoreo de cultivos, estimación de parámetros (incluyendo fertilización, biomasa, rendimiento, plagas, enfermedades).	Publicaciones enfocadas en aplicaciones de UAV o IA/ML/DL fuera del ámbito de la agricultura de precisión (por ejemplo: mapeo topográfico general, inspección de infraestructura no agrícola).
Publicados dentro del rango de fechas establecido (2020-2024).	Artículos duplicados que aparecieron en múltiples bases de datos o búsquedas.
Artículos publicados en idioma inglés.	Estudios que, tras la revisión del texto completo, resultaron no cumplir con los criterios de inclusión definidos, a pesar de haber sido inicialmente identificados por título o resumen.

Proceso de selección

La selección de artículos se llevó a cabo en las siguientes fases:

1. *Gestión de duplicados.* Tras consolidar los resultados de las bases de datos en Zotero, se identificaron y eliminaron 768 artículos duplicados.
2. *Cribado por título y resumen.* Los 397 artículos restantes fueron evaluados inicialmente por título y resumen, según los criterios de selección. Esta fase resultó en la exclusión de 268 artículos, principalmente debido a falta de relevancia temática o tipo de documento

inadecuado (se excluyeron artículos de conferencias, libros y capítulos de libros, entre otros).

3. *Revisión de texto completo.* Los 129 artículos que superaron el tamizaje inicial fueron leídos en detalle para confirmar el cumplimiento de todos los criterios de inclusión/exclusión. En esta fase, se excluyeron 67 adicionales.

Este proceso resultó en la identificación de un corpus final de 62 artículos para la revisión, cuyo flujo completo se ilustra en la figura 2.

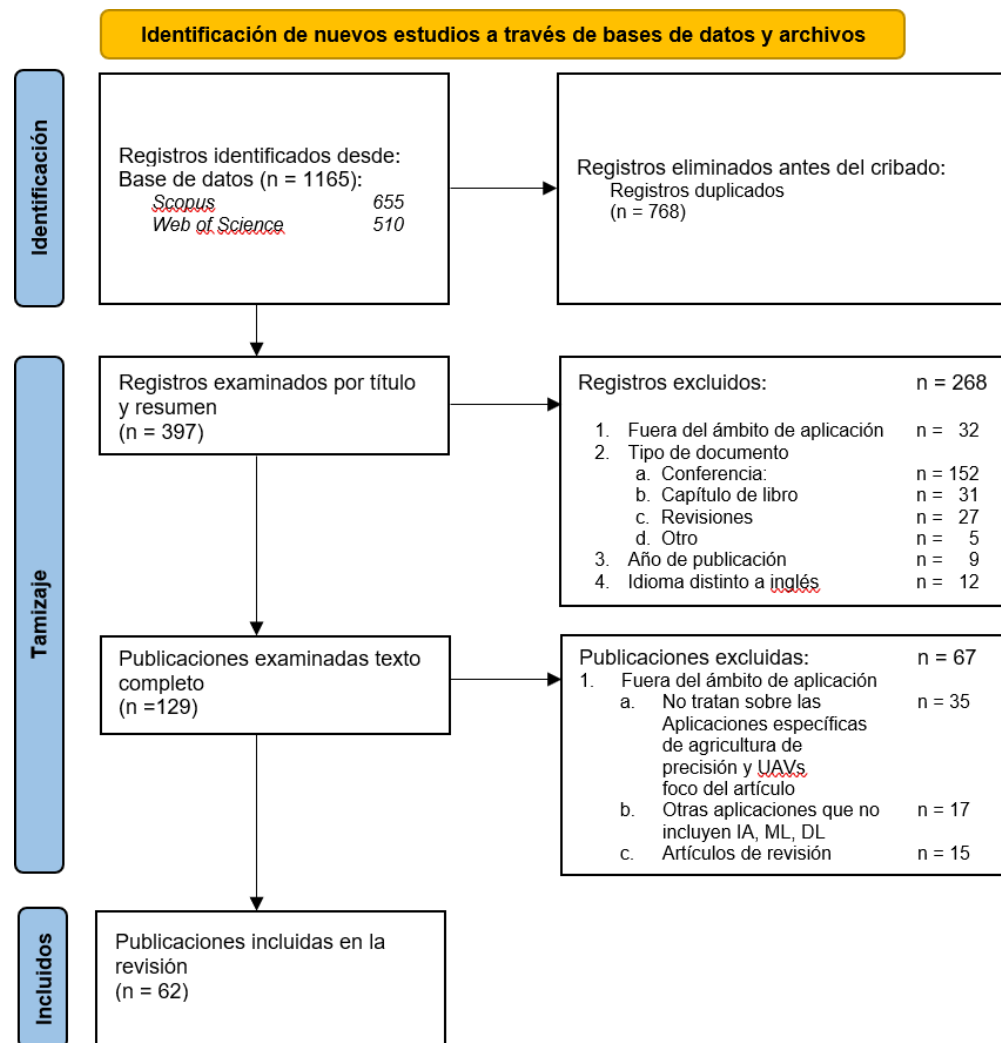


Figura 2. Diagrama de flujo del proceso de selección de artículos

Extracción de datos

A partir del corpus final de 62 artículos seleccionados, se procedió a la extracción sistemática de información clave y relevante para los objetivos de la revisión. Se utilizó una hoja de cálculo estructurada para asegurar la consistencia en la recolección de datos a través de todos los estudios.

Esta extracción de datos estructurada proporcionó la base empírica necesaria para la posterior síntesis y análisis de los hallazgos.

Síntesis y análisis de datos

Los datos extraídos de los estudios incluidos (estudios primarios) fueron objeto de un análisis comprensivo y estructurado. El enfoque principal fue la síntesis de los hallazgos empíricos para reconocer las tendencias predominantes, las metodologías más empleadas y los resultados clave reportados en las diversas aplicaciones de UAV e IA en agricultura de precisión. El análisis se organizó temáticamente; luego se agruparon los estudios según su aplicación principal, lo cual hizo posible comparar y contrastar las tecnologías (sensores, UAV) y las técnicas usadas de inteligencia artificial (IA), aprendizaje automático (*machine learning* [ML]) o aprendizaje profundo (*deep learning* [DL]); después se evaluaron sus fortalezas, debilidades y el desempeño en diferentes contextos y cultivos. Se efectuó un análisis crítico para identificar patrones recurrentes, evaluar la solidez de las metodologías reportadas, y así determinar las limitaciones y desafíos comunes inherentes a la implementación de estas tecnologías en la práctica agrícola, tal como fueron reportados por los autores de los estudios originales. Asimismo, se reconocieron las brechas de conocimiento y las direcciones futuras de investigación sugeridas en la literatura primaria.

Resultados

En esta sección se sintetizan los hallazgos en los estudios primarios incluidos en la revisión, organizados por áreas de aplicación principal. El análisis de estos trabajos proporciona una visión general de las tecnologías (UAV, sensores, técnicas de IA/ML/DL) y metodologías empleadas, el desempeño alcanzado y los contextos en los que se han aplicado en el ámbito de la agricultura de precisión.

Estimación de niveles de nutrientes en cultivos

Autores como (16), al aplicar estas tecnologías en cultivos de trigo, revelaron una fuerte correlación entre descriptores como el índice de área foliar (*leaf area index* [LAI]) y la biomasa

fresca de la masa (*fresh biomass mass* [FBM]). Los autores describen correlaciones significativas entre otros descriptores como la altura de la planta (*plant height* [PHT]) y la biomasa seca de la masa (*dry biomass* [DBM]), que son esenciales para entender las características biofísicas del dosel del trigo. A partir de sus hallazgos, sugieren la utilización de imágenes tomadas por UAV para calcular el índice de nutrición nitrogenada (*nitrogen nutrition index* [NNI]) de los triguales como métrica efectiva para estimar los niveles de nitrógeno del suelo. Esto determinaría si el trigo está pobremente fertilizado o si sufre de sobrefertilización, y ayudaría a evitar los efectos negativos asociados con ambos extremos de gestión del nitrógeno.

Asimismo, se destaca la aplicación de algoritmos de DL para el análisis de imágenes capturadas por UAV, porque ha demostrado su potencial aplicabilidad, al ofrecer información esencial que facilita la toma de decisiones en tiempo real con un margen de error mínimo; de esta manera se superan las metodologías tradicionales más fluctuantes e imprecisas (17).

Las cámaras de última generación se convierten en un actor importante, pues les brindan la posibilidad a los UAV de obtener datos relacionados con el vigor y la tasa de crecimiento de los cultivos. Entonces, la estimación precisa de los niveles de nutrientes en los cultivos es fundamental para optimizar la fertilización y mejorar la productividad agrícola de manera sostenible. La teledetección basada en UAV e IA ha emergido como una herramienta clave para el monitoreo no destructivo y a escala de campo de parámetros nutricionales, principalmente el nitrógeno (N), aunque también se abordan el fósforo (P) y el potasio (K) en ciertos cultivos (18–27).

Los índices de vegetación (*vegetation index* [VI]) derivados de imágenes multiespectrales y, en estudios más avanzados, hiperspectrales, son las características más utilizadas para estimar el estado nutricional. Se ha validado la correlación de VI como el índice de vegetación de diferencia normalizada (*normalized difference vegetation index* [NDVI]), la diferencia normalizada del borde rojo (*normalized difference red edge* [NDRE]) o índices relacionados con la clorofila (por ejemplo: *soil and plant analyzer development* [SPAD]), con el contenido de N en las hojas o en la biomasa total en diversos cultivos como arroz, trigo, maíz, vid y pastizales. Estos IV (y las bandas espectrales) se utilizan como entrada para modelar sus potenciales relaciones (posiblemente no lineales) con los parámetros nutricionales medidos en campo. Entre los más reportados en los estudios revisados se encuentran *random forest* (RF), *support vector regression* (SVM) y redes neuronales (*artificial neural network* [ANN]/ *extreme learning machine* [ELM]) (18–23). Estudios han reportado altas precisiones (valores de R^2 superiores a 0,70) en la predicción de contenido de N, P o K, así como otros indicadores como SPAD o absorción de nitrógeno (19,21,22). El algoritmo RF es frecuentemente destacado por su robustez y buen desempeño (18,22,23). La tabla 2 sintetiza los estudios más destacados.

Tabla 2. Estudios sobre estimación de niveles de nutrientes en cultivos utilizando UAV e IA

Cultivo	Indicador	Sensor UAV	Métodos IA/ML	Referencia
Arroz	SPAD, contenido de nitrógeno (N)	HS (400-1000 nm)	ANN, ELM, LASSO, SVR, MLR	(18)
Trigo	LNC	HS (400-1000 nm)	PPR, ANN, GPR-mRMR (Selección)	(28)
Trigo	LNC, PNC, LNA, PNA	CIR (NIR-G-B) <i>multi-view</i>	SVR, ELM, RF	(20)
Vid	LNC, LKC, LPC	MS (6 bandas)	PLS, RF, SVM, ELM	(21)
Maíz, soya, alfalfa	VWC, EC (Suelo)	MS (5 bandas) + GPR/EM	RF	(27)
Sorgo	Contenido de nitrógeno (N %)	RGB	MLR, MLP, CNN, IA Híbrida/Ensamble (MLP+CNN)	(29)
Cítricos	LNC	Multiespectral (MS) + Textura (LBP)	Regresión cooperativa semisupervisada (Ridge, SVR, RF), BPNN, PLSR	(20)
Arroz	LNC	Multisensores (RGB + MS), fusión (método GS)	LR, GPR, GPR+mRMR (selección de características.)	(30)
Trigo	LNC, SPAD	Hiperespectral (HS, 400-1000 nm)	ANN, ELM, LASSO, SVR, MLR	(18)

HS: hiperespectral; MS: multispectral, RGB: red, green, blue; CIR: color infrared; SPAD: soil and plant analyzer development; LNC: leaf nitrogen content; PNC: plant nitrogen content; LNA: leaf nitrogen accumulation; PNA: plant nitrogen accumulation; LKC: leaf potassium content; LPC: leaf phosphorus content; VWC: volumetric water content; EC: electrical conductivity; N %: porcentaje de nitrógeno; LBP: local binary pattern; ANN: artificial neural network; ELM: extreme learning machine; LASSO: least absolute shrinkage and selection operator; SVR: support vector regression; MLR: multiple linear regression; PPR: projection pursuit regression; GPR: gaussian process regression; mRMR: minimum redundancy maximum relevance; RF: random forest; MLP: multilayer perceptron; CNN: convolutional neural network.

Si bien los VI espectrales son informativos, presentan limitaciones, particularmente la saturación en etapas avanzadas de crecimiento o con alta densidad de cultivo, lo cual reduce su sensibilidad a variaciones en el contenido de nutrientes en esos escenarios (18, 20). Para superar esto, la incorporación de características estructurales del cultivo, como la altura o la cobertura del dosel (derivadas de imágenes *red, green, blue* [RGB] o datos 3D como LiDAR), ha

Tabla 3. Cámaras y sensores utilizados por UAV en la estimación de niveles de fertilización y crecimiento

Tipo de cámara	Cultivo	Fertilizante estudiado	Índice calculado	Referencia
Multiespectral	Trigo	Nitrógeno	Índice de área foliar (LAI) y materia seca foliar (LDM)	(32)
RGB	Sorgo	Nitrógeno	VI (basados en color/verde)	(29)
Hiperespectral	Trigo	Nitrógeno (LNC)	VI (espectrales/hiperespectrales)	(28)
Multiespectral	Cítricos	N, P, K (LNC, LKC, LPC)	LNC + Textura	(20)
Multiespectral	Vid	N, P, K (LNC, LKC, LPC)	VI (espectrales)	(21)

demostrado mejorar la precisión de la estimación, especialmente para la biomasa y parámetros relacionados con N (Nitrógeno) como N % o Nup (N *uptake* [absorción de nitrógeno]) (23–26). Los enfoques de fusión de datos multimodales, que combinan información espectral con características estructurales, texturales o de otro tipo (térmicas, topográficas), procesados a menudo con técnicas de DL, se perfilan como métodos más robustos y precisos, capaces de capturar relaciones complejas y mitigar los efectos del fondo del suelo o la saturación (22,24–26). La fusión de datos provenientes de diferentes bandas espectrales (por ejemplo: visible, *red-edge*, NIR near InfraRed spectroscopy) o incluso de dominios espectrales distintos (por ejemplo: visible/*near infrared spectroscopy* [NIR] con *short-wavelength infrared* [SWIR]) también es explorada para mejorar la sensibilidad y superar las limitaciones de las bandas tradicionales para detectar ciertos nutrientes (31).

El análisis de la literatura en estimación de nutrientes mediante UAV e IA demuestra un avance significativo, con precisiones considerables en diversos cultivos y contextos. La tabla 3 presenta una síntesis de los estudios más destacados desde el punto de vista del tipo de cámara utilizado. Sin embargo, persisten desafíos que limitan la implementación práctica y la generalización de los modelos: (i) la saturación de los VI implica explorar características estructurales o el uso de bandas espectrales alternativas; (ii) la complejidad en la adquisición y procesamiento de datos multimodales (por ejemplo: alineación geométrica, calibración radiométrica) y la necesidad de datos de campo extensos y precisos para el entrenamiento y validación de modelos; (iii) la transferibilidad de los modelos a diferentes variedades de cultivo, etapas de crecimiento, condiciones ambientales y tipos de suelo. Aunque se han logrado avances, la estandarización de metodologías, la mejora en la robustez de los modelos ante la variabilidad contextual y la reducción de la necesidad de datos de campo intensivos son áreas clave para futuras investiga-

ciones que faciliten la adopción a gran escala de estas tecnologías para la gestión de nutrientes en agricultura de precisión.

Estimación de biomasa

La estimación precisa de la biomasa aérea (*above-ground biomass* [AGB]) y la predicción del rendimiento (Yield) son aplicaciones cruciales en la agricultura de precisión, donde la teledetección basada en UAV e IA ha mostrado un potencial significativo (22–26,31,33,34). Los estudios primarios revisados en esta categoría exploran diversas combinaciones de plataformas UAV, tipos de sensores y algoritmos de IA.

En este panorama, el LAI ha emergido como una variable clave en la estimación no destructiva de biomasa aérea, al capturar aspectos estructurales del dosel que están asociados a la acumulación de materia vegetal. Estudios recientes en maíz, papa y cítricos han demostrado que el LAI puede estimarse con alta precisión a partir de imágenes UAV, mediante el uso de modelos como RF, SVR o técnicas de regresión multivariada, alcanzando valores de R^2 superiores a 0,80 (35–37). Estas investigaciones destacan el potencial de combinar información espectral, textural y morfológica con algoritmos de aprendizaje automático para representar la dinámica foliar a lo largo del ciclo del cultivo; así se obtiene una estimación más robusta de la biomasa.

Por otro lado, en sistemas agrícolas diversos como quinua, pasturas y campos salinizados, se ha explorado el uso del LAI como vínculo entre características espectrales complejas y variables productivas o de calidad, como la materia seca o el contenido de nitrógeno (38–40). En estos contextos, la aplicación de sensores multispectrales e hiperespectrales (incluyendo bandas VNIR y SWIR (subregión del espectro de longitud de onda electromagnética), junto con técnicas de selección de variables y fusión de datos, ha demostrado ser eficaz para capturar la heterogeneidad del dosel vegetal (41). Estos hallazgos refuerzan el papel del LAI como variable puente en los modelos de estimación de biomasa, a partir del cual se generan predicciones más detalladas, adaptables a distintas condiciones de manejo y escalables en parcela o cultivo.

Los VI derivados de imágenes multispectrales son quizás las variables más utilizadas, como entradas para los modelos de predicción de biomasa y rendimiento (22,32–34). Por ejemplo, (32) demostraron que la combinación de NDVI con RF fue efectiva para predecir el rendimiento en trigo ($R^2 = 0,78$), mientras que (33) lograron una alta precisión ($R^2 = 0,9$) en la predicción de rendimiento en algodón, con el uso de características de dosel e índices de vegetación con un modelo de red neuronal artificial. Sin embargo, varios estudios señalan una limitación clave de los VI: tienden a saturarse en etapas de crecimiento avanzadas o con alta densidad de cultivo, lo que reduce su precisión para estimar alta biomasa (26,31,34).

Para mitigar la limitación de la saturación de los VI, la incorporación de características estructurales del cultivo (como altura o cobertura del dosel) ha demostrado ser crucial. Estudios como el de (34) en centeno y de (23) en pastizales confirmaron que la inclusión de altura y cobertura mejoró significativamente la precisión de la estimación de biomasa, en comparación con el uso exclusivo de VI. Estas características estructurales, a menudo derivadas de modelos 3D generados por fotogrametría de imágenes RGB o, en estudios más avanzados, de datos LiDAR (25, 26), son menos susceptibles a la saturación y proporcionan información complementaria valiosa sobre la arquitectura del dosel.

La fusión multimodal (*multimodal function* [MMF]) que combina datos espectrales, estructurales y, en algunos casos, térmicos, ha demostrado optimizar la precisión y robustez de la estimación de biomasa y la predicción de rendimiento, sobre todo en contextos agrícolas complejos o con terrenos irregulares. Por ejemplo, (24) propusieron un modelo MMF con aprendizaje multitarea (MTL) que fusiona VI con características de imagen RGB para predecir simultáneamente LAI (*leaf area index*), AGB (*above-ground biomass*), PH (*plant height*) y LCC (*leaf chlorophyll content*) en trigo con acolchado, superando las limitaciones del fondo del suelo. Asimismo, (25) mostraron que la fusión de datos multiespectrales, térmicos, estructurales y topográficos mejoró la predicción de AGB en trigo en terrenos ondulados.

El uso de DL, particularmente redes neuronales convolucionales (*convolutional neural network* [CNN]) y modelos de fusión híbrida que integran imágenes 2D con nubes de puntos 3D, ha demostrado un potencial superior para extraer características complejas y capturar relaciones no lineales, con altas precisiones en la predicción de AGB como resultado (22, 26). Aunque el estudio de (42) en acuicultura de *kelp* también explora el uso de UAV, detección espectral e IA para biomasa, resalta desafíos de costos e infraestructura, aplicables también a la agricultura terrestre a gran escala. La exploración de nuevas longitudes de onda, como las del dominio VNIR/SWIR, también señala potencial para superar la saturación y mejorar la estimación de biomasa y nitrógeno (31).

La síntesis de los estudios primarios revisados en esta categoría revela una sólida capacidad de las tecnologías UAV e IA para la estimación de biomasa aérea y la predicción de rendimiento en diversos cultivos. Se observa una clara tendencia hacia el empleo de sensores multiespectrales y RGB, a menudo complementados con datos estructurales obtenidos mediante fotogrametría a partir de imágenes RGB. Los algoritmos de aprendizaje automático tradicionales como RF y SVM registran un buen desempeño, aunque las técnicas de *deep learning* (CNN, fusión multimodal) muestran un potencial superior, sobre todo al integrar múltiples fuentes de datos y trabajar con grandes volúmenes de imágenes. Sin embargo, el análisis crítico de estos hallazgos también pone de manifiesto desafíos persistentes. La saturación de los índices de ve-

getación en etapas de crecimiento avanzadas o con alta densidad de cultivo sigue siendo una limitación significativa para la estimación precisa (26,31,34). La complejidad del procesamiento de datos multimodales y de fuentes como LiDAR o nubes de puntos, aunque mejora la precisión, representa una barrera para la implementación a gran escala (25,26). Adicionalmente, la variabilidad en el desempeño de los modelos entre diferentes cultivos, etapas de crecimiento, condiciones ambientales y contextos geográficos (22,25,34).

Predicción de rendimiento

La predicción precisa del rendimiento de los cultivos es una tarea crucial para la agricultura de precisión; además, les facilita a los agricultores optimizar la gestión de insumos, planificar la cosecha y la logística, y tomar decisiones informadas para maximizar la rentabilidad. Los métodos tradicionales para este propósito, a menudo basados en muestreos destructivos o evaluaciones visuales, son laboriosos, costosos y no siempre evidencian la variabilidad espacial dentro de un campo. La integración de vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con diversos sensores y técnicas avanzadas de visión por computador e inteligencia artificial (IA) ofrece una alternativa potente para obtener predicciones de rendimiento no destructivas y a alta resolución.

Los estudios recientes han explorado diversas aproximaciones para predecir el rendimiento utilizando datos de UAV e IA en una variedad de cultivos, desde cereales y leguminosas hasta frutales y hortalizas. Estos trabajos varían en los tipos de sensores empleados, las características de imagen y otros datos integrados, los algoritmos de IA/ML aplicados y la escala de la predicción (en planta, parcela o campo). Un objetivo común es aprovechar la capacidad de los UAV para capturar información detallada sobre el estado del cultivo que se correlacione con el rendimiento final.

Estudios recientes señalan el potencial de UAV e IA para la predicción de rendimiento. Se observan diversas estrategias técnicas. Por ejemplo, (43) combinaron VI y fracción vegetada de UAV con ANN para estimar rendimiento en viñedo; así, lograron $RMSE = 0,5 \text{ kg/vid}$ y $RE = 12,1\%$ con ANN al fusionar VI y Fc. Para trigo, (44) fusionaron datos multisensor (RGB, MS, TIR) con un ensamble ML (*stacking ensemble using ridge regression* [StRR]), obteniendo $R^2 = 0,692$ y $RMSE = 0,916 \text{ t/ha}$, con lo cual superaron modelos individuales. En la tabla 4 se presenta una síntesis de estudios sobre predicción de rendimiento de cosechas.

Integrar UAV con modelos de simulación también es viable: (45) asimilaron LAI de UAV en WO-FOST mediante 4DVAR para col; de esta manera, se redujo el RMSE de rendimiento (1314-2532 kg/ha sin asimilación vs. 1314-2498 kg/ha con asimilación). (46) emplearon regresión

Tabla 4. Estudios sobre predicción de rendimiento mediante UAV e IA

Viñedo/rendimiento	Multiespectral	VI, fracción vegetada (Fc)	ANN	1,0 (validación)	0,5 kg/vi d/12,1 %	(43)
Trigo/rendimiento	Multisensor (RGB, MS, TIR)	VI (espectrales), textura (TIR), modelos climáticos	ML (Cubist, SVM, DNN, RR, RF), ensamble (<i>stacking</i>)	0,692	0,916 t/ha	(44)
Soja/rendimiento	Multitemporal RGB	Imágenes RGB (multitemporales, 3D), rasgos profundos	DL (3D CNN - VGG, Res-Net, DenseNet)	0,70 (mejor)	NRMSE 10,08 % (mejor)	(?)
Col (<i>cabbage</i>)/rendimiento	RGB, multispectral	LAI (estimado por modelo de segmentación)	Modelos de simulación (WOFOST) + Asimilación de datos (4DVAR)		RMSE 1314-2532 kg/ha/rRMSE 15,8–30,9 %	(45)
Trigo/rendimiento, rasgos (CMT, TKW, Gnm2)	Hiperespectral	Datos espectrales (curvas de reflectancia funcional)	Regresión funcional	–	MAE 13,42 %/RMSE 869,20 kg/ha	(46)
Algodón/rendimiento	Multiaño UAV (MS, RGB) + Suelo (ECa) + Clima	Datos fusionados (suelo, clima, NDVI de UAV) procesados por CNN	DL (CNN + GRU)	0,72–0,84	MAE 247–384 kg/ha/Error 8,9–13,7 %	(47)

CM: *cellular membrane thermostability*; CMT: *cellular membrane thermostability*; DL: *deep learning*; ECa: *electrical conductivity apparent*; GRU: *gated recurrent unit*; LAI: *leaf area index*; MAE: *mean absolute error*; ML: *machine learning*; MS: *multispectral*; NRMSE: *normalized root mean square error*; RE: *relative error*; RGB: *red green blue*; RMSE: *root mean square error*; UAV: *unmanned aerial vehicle*; VI: *vegetation index*.

Nota: la métrica R^2 de 1,0 indicada en (43) corresponde a los resultados en la validación, no en el conjunto de prueba final.

funcional (Sigcomp) en datos hiperespectrales de UAV para predecir rendimiento de trigo, lo cual arrojó MAPE 13,42 % y RMSE = 869,20 kg/ha, efectivo con datos reducidos. (47) fusionaron datos multiaño de UAV (MS, RGB), suelo (ECa) y clima con DL (CNN + GRU) para predecir rendimiento de algodón; esto evidenció errores medio (MAE) del 8,9 % al 13,7 % en un año fuera del entrenamiento. La robustez y precisión varían según el cultivo, sensor, características y modelo, pero la fusión de datos y el uso de algoritmos ML/DL avanzados (ANN, ensamble, 3D CNN) son tendencias clave para optimizar la predicción de rendimiento.

Detección y manejo de plagas, enfermedades y malezas

La integración de UAV con cámaras multiespectrales e hiperespectrales en la agricultura inteligente ha revolucionado la detección temprana de plagas; lo cual permite una respuesta rápida y precisa en el manejo de cultivos. Gracias a la combinación de tecnología de visión por computador y soluciones de IA, es posible identificar patógenos como hongos, insectos, bacterias, virus y especies invasoras; así, se proporciona un enfoque proactivo y eficiente en la gestión de la salud del cultivo (48).

A partir de estas generalidades, en el estudio de (49), se destaca la aplicación de UAV para la aspersión precisa de insecticidas y acaricidas, centrada en optimizar el control de plagas. Los autores examinan cómo factores como el tamaño de gota, las condiciones meteorológicas y los métodos de aplicación influyen en la deriva de aspersión, esenciales para calibrar la eficacia de estas intervenciones. Además, se subraya la capacidad de los UAV equipados con cámaras multiespectrales e hiperespectrales para detectar estrés en las plantas, tanto abiótico (sequía, deficiencias de nutrientes) como biótico (patógenos, nematodos, malezas) (50, 53). El trabajo de (54) se centra en la detección de una enfermedad específica en cacahuete: el tizón del sur, a través de imágenes multiespectrales de UAV. Proponen un método que combina VI con índices texturales (*textural indices* [TI]) construidos a partir de rasgos texturales originales. Mediante algoritmos como KNN, PSO-SVM y AdaBoost, encontraron que la combinación de VI y TI, particularmente con el modelo KNN, logra una alta precisión (91,89 %) y puntaje F1 (91,39 %) en el conjunto de prueba. Esto subraya la importancia de integrar tanto la información espectral como la textural para una detección más precisa de enfermedades.

La detección de otra enfermedad del trigo, la sarna, es abordada por (55), a través de imágenes RGB de UAV. Este estudio propone una arquitectura de red neuronal profunda personalizada (ASFFNet, basada en YOLOv5) que incluye mejoras de contraste y fusión adaptativa espacial de rasgos. Según los resultados, este método logra una alta precisión media (AP) del 80,8 %, lo cual supera a otros detectores de objetos DL. La innovación radica en la capacidad de ASFFNet para detectar manchas pequeñas de enfermedad al adaptar la fusión de característi-

cas a diferentes escalas, lo cual es crucial dado el pequeño tamaño de las lesiones de sarna en las imágenes.

La aplicabilidad a una gama más amplia de problemas fitosanitarios es explorada en (56), a través de modelos de ML (SVM, RF, AdaBoost, Naive Bayes) aplicados a la gestión fitosanitaria. No obstante, la información específica sobre el uso de UAV, como fuente de datos primarios para la predicción directa de enfermedades en su estudio, no se detalla en los fragmentos revisados. En la tabla 5 se sintetizan estudios relevantes sobre detección y manejo de plagas mediante UAV e IA.

Estudios más específicos sobre la detección de enfermedades foliares en arroz, como el de (57), demuestran la efectividad de adaptar arquitecturas DL existentes, como Tiny YOLOv4, para la detección de manchas de enfermedad foliar (*bacterial leaf blight*, *rice blast*, *brown spot*). Mediante la adición de módulos específicos y el entrenamiento con un *dataset* personalizado, lograron una alta precisión media (AP 86 %), destacando la importancia de la arquitectura de red optimizada para objetos pequeños en imágenes UAV y la calidad del conjunto de datos.

La detección de enfermedades en arándanos silvestres (*Monilinia blight*, *Botrytis blight*) y la identificación de fenotipos susceptibles es abordada por (60). Con imágenes multiespectrales de UAV y, potencialmente, datos LiDAR, junto con VI y rasgos fenológicos, aplicaron métodos ML y clasificación supervisada (LDA, SVM). Sus hallazgos indican que los VI, en particular en la región NIR, y los rasgos fenológicos son discriminatorios para identificar enfermedades y fenotipos, con lo cual se obtuvo una precisión de clasificación global del 85 %.

Además de la detección directa, la evaluación de la susceptibilidad a enfermedades y la zonificación del viñedo basadas en indicadores de salud son objeto de estudio en (58). En este estudio se recurre a imágenes RGB+NIR (multiespectrales) de UAV y datos de campo de nutrientes (N, P, K foliar y peciolo). Los autores trabajan el algoritmo YOLO para la detección precisa de vides (90 % de precisión), lo cual sirve como base para la zonificación utilizando *K-means*. Al integrar NDVI, contenido de nutrientes y coordenadas de ubicación en el proceso de *clustering*, logran definir zonas de manejo homogéneas que reflejan diferencias en el estado de salud; a su vez, proporcionan una herramienta valiosa para la gestión sitio-específica del viñedo.

Finalmente, (61) proponen un sistema integrado más amplio para el monitoreo general de campos agrícolas que incluye la detección de enfermedades. Combinan datos de UAV (MS, HS, GPS) con sensores *internet of things* (IoT) ambientales en tierra, fusionando esta información para alimentar un modelo de aprendizaje automático híbrido (*hybrid machine learning model*

Tabla 5. Estudios relevantes sobre detección y manejo de plagas/Enfermedades mediante UAV e IA

Objetivo (cultivo/problema)	Sensor(es) UAV	Características utilizadas	Métodos IA/ML	Referencia
Cacahuete/Tizón del sur (enfermedad)	Multiespectral (MS, 5 bandas)	VI (6 seleccionados), texturales (3 TI contruidos a partir de TF)	KNN, PSO-SVM, AdaBoost	(54)
Trigo/Sarna del trigo (enfermedad)	RGB	Color, rasgos profundos (ASFFNet, fusión adaptativa espacial)	DL (ASFFNet - basado en YOLOv5)	(55)
Vid/Zonificación basada en salud (relacionado con susceptibilidad/estado)	RGB+NIR (MS, 5 bandas), muestras (N, P, K foliar/peciolo)	NDVI, N, P, K (hoja/peciolo), localización (coordenadas)	YOLO (detección de vides), <i>K-means</i> (pesos variables)	(58)
Remolacha azucarera/ <i>Cercospora leaf spot</i> (CLS) (enfermedad)	Multiespectral (MS, 5 bandas)	VI, sombra, resolución, DSMf, parámetros de área (AF, AH, AD, etc.)	ML (PLS-DA, SVML, SVMR, RF, KNN), <i>pipeline</i> combinando ML	(59)
Arroz/Enfermedades foliares (<i>bacterial leaf blight</i> , <i>rice blast</i> , <i>brown spot</i>)	UAV (implícito RGB/MS)	Rasgos profundos (extraídos por Tiny YOLOv4 modificado + SPP, CBAM, SCFEM, Ghost)	DL (Tiny YOLOv4 modificado)	(57)
Arándano silvestre/Enfermedades (Monilinia blight, Botrytis blight), fenología, fenotipos	MSI, LiDAR (potencial)	VI, Rasgos de crecimiento/fenológicos (LAI, altura)	ML (SMLR, RF, SVM), clasificación supervisada (LDA)	(60)

DSM: *digital surface model*; TF: rasgos texturales; TI: *textural indices*; VI: *vegetation index*; ML: *machine learning*; DL: *deep learning*; UAV: *unmanned aerial vehicle*.

[HMLM]) que combina RF y SVM. Este sistema logra una precisión del 98,74 % en la clasificación general. El trabajo de (59) también contribuye a la detección de enfermedades específicas, como el *Cercospora leaf spot* en remolacha azucarera, a nivel de pixel, por medio de imágenes multispectrales de UAV y rasgos extraídos de MS y DSM. Su *pipeline*, que combina diferentes modelos ML, logra alta precisión (86,3 % *overall*) y destaca la utilidad de los rasgos basados en DSM y los parámetros de área para diferenciar variedades y evaluar la severidad e incidencia de la enfermedad; esto constituye una alternativa automatizada a la evaluación visual por expertos. La tendencia en detección y manejo de plagas y enfermedades mediante la integración de UAV e IA, se orienta hacia enfoques que combinan múltiples fuentes de datos (imágenes UAV de diversas bandas espectrales y rasgos, datos de sensores IoT, información de ubica-

ción/DSM). Las arquitecturas de aprendizaje profundo, en especial las adaptadas para objetos pequeños o con mecanismos de atención y fusión avanzados (ASFFNet, YOLO modificado, TSLM), así como los enfoques de ensamble (HMLM, combinaciones de ML), muestran un rendimiento superior para tareas de detección y clasificación, con altas métricas de precisión y *F1-score*. Si bien la necesidad de grandes *datasets* etiquetados sigue siendo un desafío, algunos trabajos revisados exploran soluciones como el aumento de datos, los enfoques semisupervisados y el aprovechamiento del *transfer learning*. Aunque se han logrado avances notables en cultivos específicos y problemas concretos, la validación de la transferibilidad de los modelos a nuevos entornos y la optimización continua de la complejidad computacional para la implementación en tiempo real en UAV de recursos limitados siguen siendo áreas críticas para la investigación futura. La colaboración interdisciplinaria y la validación en campo a gran escala serán esenciales para traducir estos hallazgos en herramientas agrícolas prácticas y confiables.

Conteo y fenotipado básico de plantas

El conteo preciso del número de plantas individuales o de partes específicas, como plántulas, espigas o borlas, es una tarea fundamental en la agricultura de precisión y la mejora genética. Esta información es esencial para evaluar la calidad de la siembra, estimar la densidad de la población, predecir el rendimiento y tomar decisiones de manejo adaptadas a las condiciones del cultivo. La flexibilidad y la capacidad de los UAV para capturar imágenes de alta resolución a baja altitud los convierten en herramientas idóneas para obtener datos detallados en planta.

En el caso del maíz, el conteo de plántulas y borlas ha sido objeto de múltiples investigaciones. Por ejemplo, (62) compararon la detección de esquinas (Harris), la regresión lineal y el aprendizaje profundo (*Faster R-CNN*) para contar plántulas de maíz a partir de imágenes RGB de UAV. Demostraron que, aunque los tres métodos logran alta precisión (99 %), los modelos de regresión lineal y DL son más robustos a los cambios en la resolución espacial de la imagen, una consideración importante para la aplicabilidad en diferentes alturas de vuelo. La detección de esquinas, si bien precisa, se ve más afectada por la resolución.

La detección y conteo de borlas (*tassels*) de maíz también se ha beneficiado de las técnicas DL. (63) desarrollaron PConv-YOLOv8, un modelo ligero y robusto, para detectar borlas por medio de imágenes RGB tanto de UAV como cerca del suelo. Su modelo alcanzó alta precisión en la detección de borlas ($AP > 0,9$) y un monitoreo preciso de la etapa de borla ($R^2 = 0,99$, $RMSE = 0,21$ día), además de robustez ante variaciones en resolución, variedad y etapa de crecimiento. Un enfoque diferente es el de (64), quienes propusieron IntegrateNet, una red de aprendizaje profundo multitarea que supervisa simultáneamente el aprendizaje de mapas de

densidad y mapas de conteo local para el maíz. Este modelo logró un error bajo ($MAE = 1,62$, $RMSE = 2,28$) y un alto coeficiente de determinación ($R^2 = 0,9578$) en el conjunto de prueba, superando a enfoques previos basados en mapas de densidad. Aunque también se han propuesto enfoques basados en métodos de ML clásicos como regresión SVM (65).

La aplicación de estas técnicas a otras partes de cultivos importantes se ve en el estudio de (66), quienes compararon modelos DL como Faster R-CNN, YOLOv8 y RT-DETR para la detección de espigas de trigo en imágenes RGB de UAV. Aunque YOLOv8 mostró la mayor precisión, RT-DETR tuvo un mejor equilibrio entre precisión y *recall*; asimismo, se destacan los desafíos en la detección precisa de objetos pequeños y superpuestos como las espigas. Incluso en cultivos de árboles, donde el conteo manual puede ser aún más arduo, los UAV y la IA ofrecen soluciones. Se ha utilizado una combinación de CNN y refinamiento basado en procesamiento de imagen (OBIA) para identificar y contar árboles de olivo individuales a partir de imágenes RGB de UAV. Esta aplicación alcanzó una precisión general (99 %) en la detección y conteo de árboles (67).

En conjunto, estos estudios demuestran el gran potencial de los UAV y las técnicas de visión por computador e IA para automatizar y mejorar la precisión del conteo de plantas y partes de plantas en diversos cultivos. Los avances se centran en el desarrollo de arquitecturas de aprendizaje profundo robustas, la integración de múltiples fuentes de datos y el refinamiento de los algoritmos para manejar desafíos específicos como la superposición, la variabilidad morfológica y las diferentes resoluciones espaciales.

En cuanto a las técnicas de identificación y tipificación de plantas, se destacan los avances en algoritmos de DL especializados, y en particular, las CNN. Por ejemplo, (68) describen los avances recientes en este campo, en particular de la computación e informática modernas, y expone una hoja de ruta detallada para la utilización estas técnicas en la identificación automática de plantas de pino, con una precisión más que interesante, al punto de que este trabajo fue ampliado dos años después, para reforzar el gran potencial de la utilización de CNN en monitoreo remoto con imágenes captadas por drones para actividades propias de la agricultura inteligente, tal y como se especifica en (69).

Discusión

Los resultados recopilados en esta revisión confirman que los UAV se han consolidado como herramientas fundamentales en la agricultura de precisión, y que se destacan por su capacidad de recopilar imágenes de alta resolución y por su integración versátil con sensores multiespectrales, hiperespectrales, térmicos y LiDAR. Esta capacidad ha facilitado el monitoreo de

variables agronómicas críticas como el estado nutricional, el crecimiento vegetativo, la biomasa aérea (AGB) y los niveles de fertilización en diversos cultivos. Sin embargo, uno de los aportes clave de esta revisión es evidenciar la transición que han tenido las metodologías tradicionales (basadas en índices espectrales simples) hacia enfoques híbridos que incorporan modelos 3D, fusión de datos y técnicas avanzadas de aprendizaje automático y profundo (ML/DL).

En el contexto de la estimación de biomasa y predicción del rendimiento de cosechas, las técnicas basadas exclusivamente en índices de vegetación como NDVI o índice de vegetación de diferencia normalizada verde (*green normalized difference vegetation index* [GNDVI]), han mostrado limitaciones significativas frente a cultivos en etapas avanzadas o con alta densidad foliar, debido a fenómenos de saturación espectral. En contraste, la combinación de características estructurales (altura de planta, cobertura del dosel), morfológicas (textura, volumen estimado), y datos espectrales multibanda, ha demostrado ser más robusta. Modelos como *random forest* (RF) y *support vector regression* (SVR) han mostrado desempeños sólidos ($R^2 > 0,80$ en varios estudios); aunque son los enfoques basados en redes neuronales convolucionales (CNN), LSTM o arquitecturas híbridas con mecanismos de atención los que actualmente dominan el panorama metodológico, debido a su capacidad para aprender representaciones jerárquicas complejas.

De hecho, mientras algunos estudios recientes han logrado predicciones de rendimiento con RM-SE inferiores a 1 t/ha en trigo mediante el uso de *stacking ensembles* que combinan múltiples modelos (por ejemplo: Cubist, DNN, RF), otros han alcanzado niveles similares de precisión por medio de CNN alimentadas con datos RGB multitemporales y morfología 3D, como en el caso de la soja. Asimismo, modelos multivariados aplicados a datos hiperespectrales han evidenciado ser efectivos para estimar simultáneamente variables como LAI, contenido de nitrógeno y biomasa, lo que favorece una integración agronómica más completa. No obstante, la implementación práctica de estos sistemas enfrenta aún importantes barreras, como son: la necesidad de grandes volúmenes de datos de entrenamiento en campo, la baja transferibilidad de los modelos a diferentes ambientes y cultivos, y la alta demanda computacional asociada a arquitecturas DL complejas.

Adicionalmente, la revisión muestra cómo la fusión multimodal de sensores (combinando UAV con estaciones IoT en tierra o con imágenes satelitales) permite mejorar la generalización de los modelos, sobre todo en escenarios de variabilidad topográfica o climática. Sin embargo, dicha integración introduce retos técnicos como la sincronización temporal, la calibración geométrica cruzada y el tratamiento del desbalance entre datos espectrales y estructurales. En este sentido, los modelos de aprendizaje multitarea y las redes neuronales con mecanismos de atención adaptativa se posicionan como líneas prometedoras para abordar esta complejidad y reducir el costo de adquisición de datos en campo.

Conclusiones

Los avances recientes en el uso de vehículos aéreos no tripulados (*unmanned aerial vehicle* [UAV]) combinados con inteligencia artificial (IA) son una alternativa para transformar prácticas agrícolas tradicionales mediante monitoreo no destructivo, optimización del uso de insumos y una mayor precisión en la toma de decisiones. A través de esta revisión se identificó que, más allá de los índices tradicionales como índice de vegetación de diferencia normalizada (*normalized difference vegetation index* [NDVI]), los enfoques que combinan múltiples tipos de características (espectrales, estructurales y texturales), junto con modelos avanzados de aprendizaje automático, se aporta a la precisión en la estimación de variables críticas como biomasa, contenido de nutrientes y rendimiento de las cosechas. La integración de sensores hiperespectrales, térmicos y LiDAR ha llevado a superar algunas limitaciones clásicas como la saturación espectral en cultivos densos o en etapas avanzadas de desarrollo. Sin embargo, el verdadero impacto de estas tecnologías no se medirá únicamente en función de sus métricas de precisión, sino en su capacidad para ser apropiadas, replicadas y sostenidas en contextos reales y diversos.

En este sentido, la transición hacia una agricultura verdaderamente precisa e inteligente requiere ir más allá del despliegue de tecnologías avanzadas; supone construir sistemas abiertos, inclusivos y orientados al bien común. Será fundamental democratizar el acceso a datos de entrenamiento y validación, fomentar estándares abiertos para la interoperabilidad de plataformas UAV, y diseñar soluciones tecnológicas pensadas desde y para los agricultores, especialmente aquellos que enfrentan limitaciones económicas o geográficas. Solo así se logrará una adopción tecnológica equitativa, capaz de combinar el potencial del aprendizaje automático con los saberes locales y las dinámicas agroecológicas del territorio.

Referencias

- [1] D. W. James, y K. L. Wells, *Soil sample collection and handling: technique based on source and degree of field variability*, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1990, pp. 25-44.
- [2] M. B. Stuart, A. J. S. McGonigle, y J. R. Willmott, "Hyperspectral imaging in environmental monitoring: a review of recent developments and technological advances in compact field deployable systems", *Sensors*, vol. 19, n.º 1414, p. 3071, en. 2019.
- [3] S. Khanal, K. C. Kushal, J. P. Fulton, *et al.*, "Remote sensing in agricultura— Accomplishments, limitations, and opportunities", *Remote Sensing*, vol. 12, n.º 22, p. 3783, nov. 2020.

- [4] Y. Ge, G. Bai, V. Stoerger, *et al.*, "Temporal dynamics of maize plant growth, water use, and leaf water content using automated high throughput RGB and hyperspectral imaging", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 127, pp. 625–632, sep. 2016. Disponible en <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168169916305464>
- [5] E. Salamí, C. Barrado, y E. Pastor, "UAV flight experiments applied to the remote sensing of vegetated areas", *Remote Sensing*, vol. 6, n.º 11, pp. 11051–11081, nov. 2014. Disponible en <https://www.mdpi.com/2072-4292/6/11/11051>
- [6] H. Yao, R. Qin, y X. Chen, "Unmanned aerial vehicle for remote sensing applications—A review", *Remote Sensing*, vol. 11, n.º 1212, p. 1443, en. 2019.
- [7] G. Pajares, "Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs)", *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, vol. 81, n.º 4, pp. 281–329, abr. 2015.
- [8] I. Colomina, y P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 92, pp. 79–97, jun. 2014.
- [9] P. Daponte, L. De Vito, L. Glielmo, *et al.*, "A review on the use of drones for precision agriculture", *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 275, n.º 1, p. 012022, my. 2019. Disponible en <https://dx.doi.org/10.1088/1755-1315/275/1/012022>
- [10] J. Xue, y B. Su, "Significant remote sensing vegetation indices: a review of developments and applications", *Journal of Sensors*, vol. 2017, n.º 1, p. 1353691, en. 2017. Disponible en <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2017/1353691>
- [11] X. Zhang, F. Zhang, Y. Qi, *et al.*, "New research methods for vegetation information extraction based on visible light remote sensing images from an unmanned aerial vehicle (UAV)", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 78, pp. 215–226, jun. 2019. Disponible en <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0303243418306305>
- [12] R. Vidican, A. Mălinaş, O. Ranta, *et al.*, "Using remote sensing vegetation indices for the discrimination and monitoring of agricultural crops: a critical review", *Agronomy*, vol. 13, n.º 12, p. 3040, dic. 2023. Disponible en <https://www.mdpi.com/2073-4395/13/12/3040>
- [13] D. Radočaj, A. Šiljeg, R. Marinović, *et al.*, "State of major vegetation indices in precision agriculture studies indexed in Web of Science: a review", *Agriculture*, vol. 13, n.º 3, p. 707, mzo. 2023. Disponible en <https://www.mdpi.com/2077-0472/13/3/707>

- [14] J. G. A. Barbedo, "A review on the use of unmanned aerial vehicles and imaging sensors for monitoring and assessing plant stresses", *Drones*, vol. 3, n.º 2, p. 40, jun. 2019. Disponible en <https://www.mdpi.com/2504-446X/3/2/404>
- [15] S. Gokool, M. Mahomed, R. Kunz, *et al.*, "Crop monitoring in smallholder farms using unmanned aerial vehicles to facilitate precision agriculture practices: a scoping review and bibliometric analysis", *Sustainability*, vol. 15, n.º 4, p. 3557, en. 2023. Disponible en <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/4/3557>
- [16] M. Schirrmann, A. Giebel, F. Gleiniger, *et al.*, "Monitoring agronomic parameters of winter wheat crops with low-cost UAV imagery", *Remote Sensing*, vol. 8, n.º 99, p. 706, sep. 2016. <https://doi.org/10.3390/rs8090706>
- [17] J. Wu, D. Zheng, Z. Wu, *et al.*, "Prediction of buckwheat maturity in UAV-RGB images based on recursive feature elimination cross-validation: a case study in Jinzhong, northern China", *Plants*, vol. 11, n.º 2323, p. 3257, en. 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3390/plants11233257>
- [18] S. B. Khose, y D. R. Mailapalli, "UAV-based multispectral image analytics and machine learning for predicting crop nitrogen in rice", *Geocarto International*, vol. 39, n.º 1, en. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1080/10106049.2024.2373867>
- [19] R. N. Sahoo, R. G. Rejith, S. Gakhar, *et al.*, "Drone remote sensing of wheat N using hyperspectral sensor and machine learning", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 2, pp. 704–728, abr. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10089-7>
- [20] N. Lu, Y. Wu, H. Zheng, *et al.*, "An assessment of multi-view spectral information from UAV-based color-infrared images for improved estimation of nitrogen nutrition status in winter wheat", *Precision Agriculture*, vol. 23, n.º 5, pp. 1653–1674, oct. 2022.
- [21] X. Peng, D. Chen, Z. Zhou, *et al.*, "Prediction of the nitrogen, phosphorus and potassium contents in grape leaves at different growth stages based on UAV multispectral remote sensing", *Remote Sensing*, vol. 14, n.º 11, jun. 2022.
- [22] H. Zha, Y. Miao, T. Wang, *et al.*, "Improving unmanned aerial vehicle remote sensing-based rice nitrogen nutrition index prediction with machine learning", *Remote Sensing*, vol. 12, n.º 2, en. 2020.
- [23] U. Lussem, A. Bolten, I. Kleppert, *et al.*, "Herbage mass, N concentration, and N uptake of temperate grasslands can adequately be estimated from UAV-based image data using machine learning", *Remote Sensing*, vol. 14, n.º 13, jul. 2022.

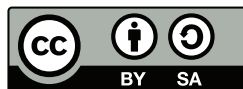
- [24] Z. Cheng, X. Gu, Y. Du, *et al.*, "Multi-modal fusion and multi-task deep learning for monitoring the growth of film-mulched winter wheat", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 4, pp. 1933–1957, ag. 2024.
- [25] S.-H. Zhang, L. He, J.-Z. Duan, *et al.*, "Aboveground wheat biomass estimation from a low-altitude UAV platform based on multimodal remote sensing data fusion with the introduction of terrain factors", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 1, pp. 119–145, feb. 2024.
- [26] S. Zhu, W. Zhang, T. Yang, *et al.*, "Combining 2D image and point cloud deep learning to predict wheat above ground biomass", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 6, pp. 3139–3166, dic. 2024.
- [27] Y. Guan, K. Grote, J. Schott, *et al.*, "Prediction of soil water content and electrical conductivity using random forest methods with UAV multispectral and ground-coupled geophysical data", *Remote Sensing*, vol. 14, n.º 4, feb. 2022.
- [28] R. N. Sahoo, S. Gakhar, R. Rejith, *et al.*, "Unmanned aerial vehicle (UAV)-based imaging spectroscopy for predicting wheat leaf nitrogen", *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, vol. 89, n.º 2, pp. 107–116, feb. 2023.
- [29] H. Hammouch, S. Patil, S. Choudhary, *et al.*, "Hybrid-AI and model ensembling to exploit UAV-based RGB imagery: an evaluation of sorghum crop's nitrogen content", *Agriculture-Basel*, vol. 14, n.º 10, oct. 2024.
- [30] S. Xu, X. Xu, Q. Zhu, *et al.*, "Monitoring leaf nitrogen content in rice based on information fusion of multi-sensor imagery from UAV", *Precision Agriculture*, vol. 24, n.º 6, pp. 2327–2349, dic. 2023.
- [31] A. Jenal, H. Hueging, H. E. Ahrends, *et al.*, "Investigating the potential of a newly developed UAV-mounted VNIR/SWIR imaging system for monitoring crop traits-a case study for winter wheat", *Remote Sensing*, vol. 13, n.º 9, my. 2021.
- [32] Z. Fu, J. Jiang, Y. Gao, *et al.*, "Wheat growth monitoring and yield estimation based on multi-rotor unmanned aerial vehicle", *Remote Sensing*, vol. 12, n.º 3, p. 508, en. 2020. Disponible en <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/3/508>
- [33] A. Ashapure, J. Jung, A. Chang, *et al.*, "Developing a machine learning based cotton yield estimation frame-work using multi-temporal UAS data", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 169, pp. 180–194, nov. 2020.
- [34] K. C. Kushal, M. Romanko, A. Perrault, *et al.*, "On-farm cereal rye biomass estimation using machine learning on images from an unmanned aerial system", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 5, pp. 2198–2225, oct. 2024.

- [35] M. Bian, Z. Chen, Y. Fan, *et al.*, "Integrating spectral, textural, and morphological data for potato LAI estimation from UAV images", *Agronomy-Basel*, vol. 13, n.º 12, dic. 2023.
- [36] Q. Cheng, F. Ding, H. Xu, *et al.*, "Quantifying corn LAI using machine learning and UAV multispectral imaging", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 4, pp. 1777–1799, ag. 2024.
- [37] X. Lu, W. Li, J. Xiao, *et al.*, "Inversion of leaf area index in citrus trees based on multi-modal data fusion from UAV platform", *Remote Sensing*, vol. 15, n.º 14, jul. 2023.
- [38] J. Jiang, K. Johansen, C. S. Stanschewski, *et al.*, "Phenotyping a diversity panel of quinoa using UAV-retrieved leaf area index, SPAD-based chlorophyll and a random forest approach", *Precision Agriculture*, vol. 23, n.º 3, pp. 961–983, jun. 2022.
- [39] R. A. Oliveira, R. Naesi, P. Korhonen, *et al.*, "High-precision estimation of grass quality and quantity using UAS-based VNIR and SWIR hyperspectral cameras and machine learning", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 1, pp. 186–220, febr. 2024.
- [40] R. Mukhamediev, Y. Amirgaliyev, Y. Kuchin, *et al.*, "Operational mapping of salinization areas in agricultural fields using machine learning models based on low-altitude multispectral images", *Drones*, vol. 7, n.º 6, jun. 2023.
- [41] Y. Gan, Q. Wang, T. Matsuzawa, *et al.*, "Multivariate regressions coupling colorimetric and textural features derived from UAV-based RGB images can trace spatiotemporal variations of LAI well in a deciduous forest", *International Journal of Remote Sensing*, vol. 44, n.º 15, pp. 4559–4577, ag. 2023.
- [42] T. W. Bell, N. J. Nidzieko, D. A. Siegel, *et al.*, "The utility of satellites and autonomous remote sensing platforms for monitoring offshore aquaculture farms: a case study for canopy forming kelps", *Frontiers in Marine Science*, vol. 7, dic. 2020. Disponible en <https://www.frontiersin.org/journals/marine-science/articles/10.3389/fmars.2020.520223/full>
- [43] R. Ballesteros, D. S. Intrigliolo, J. F. Ortega, *et al.*, "Vineyard yield estimation by combining remote sensing, computer vision and artificial neural network techniques", *Precision Agriculture*, vol. 21, n.º 6, pp. 1242–1262, dic. 2020.
- [44] S. Fei, M. A. Hassan, Y. Xiao, *et al.*, "UAV-based multi-sensor data fusion and machine learning algorithm for yield prediction in wheat", *Precision Agriculture*, vol. 24, n.º 1, pp. 187–212, febr. 2023.
- [45] Y. Yokoyama, A. de Wit, T. Matsui, *et al.*, "Accuracy and robustness of a plant-level cabbage yield prediction system generated by assimilating UAV-based remote sensing data into a crop simulation model", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 6, pp. 2685–2702, dic. 2024.

- [46] L. Costa, J. McBreen, Y. Ampatzidis, *et al.*, "Using UAV-based hyperspectral imaging and functional regression to assist in predicting grain yield and related traits in wheat under heat-related stress environments for the purpose of stable yielding genotypes", *Precision Agriculture*, vol. 23, n.º 2, pp. 622–642, abr. 2022.
- [47] A. Feng, J. Zhou, E. Vories, *et al.*, "Prediction of cotton yield based on soil texture, weather conditions and UAV imagery using deep learning", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 1, pp. 303–326, febr. 2024.
- [48] E. C. Tetila, B. B. Machado, G. Astolfi, *et al.*, "Detection and classification of soybean pests using deep learning with UAV images", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 179, art. 105836, dic. 2020. Disponible en <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S016816991831055X>
- [49] F. H. Iost Filho, W. B. Heldens, Z. Kong, *et al.*, "Drones: innovative technology for use in precision pest management", *Journal of Economic Entomology*, vol. 113, n.º 1, pp. 1–25, febr. 2020.
- [50] M. Darbyshire, S. Coutts, P. Bosilj, *et al.*, "Review of weed recognition: a global agriculture perspective", *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 227, n.º 1, dic. 2024.
- [51] J. Kaivosoja, J. Hautsalo, J. Heikkinen, *et al.*, "Reference measurements in developing UAV systems for detecting pests, weeds, and diseases", *Remote Sensing*, vol. 13, n.º 7, abr. 2021.
- [52] R. Rosle, N. N. Che'Ya, Y. Ang, *et al.*, "Weed detection in rice fields using remote sensing technique: a review", *Applied Sciences-Basel*, vol. 11, n.º 22, nov. 2021. Disponible en <https://doi.org/10.3390/app112210701>
- [53] M. H. M. Roslim, A. S. Juraimi, *et al.*, "Using remote sensing and an unmanned aerial system for weed management in agricultural crops: a review", *Agronomy-Basel*, vol. 11, n.º 9, sept. 2021.
- [54] W. Guo, Z. Gong, C. Gao, *et al.*, "An accurate monitoring method of peanut southern blight using unmanned aerial vehicle remote sensing", *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 4, pp. 1857–1876, ag. 2024.
- [55] W. Bao, W. Liu, X. Yang, *et al.*, "Adaptively spatial feature fusion network: an improved UAV detection method for wheat scab", *Precision Agriculture*, vol. 24, n.º 3, pp. 1154–1180, jun. 2023.
- [56] B. Das, y C. S. Raghuvanshi, "Advanced UAV-based leaf disease detection: deep radial basis function networks with multidimensional mixed attention", *Multimedia Tools and Applications*, dic. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s11042-024-20462-x>






- [57] A. K. Sangaiah, F.-N. Yu, Y.-B. Lin, *et al.*, “UAV T-YOLO-rice: an enhanced tiny YOLO networks for rice leaves diseases detection in paddy agronomy”, *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 11, n.º 6, pp. 5201–5216, nov. 2024. Disponible en <https://ieeexplore.ieee.org/document/10387738>
- [58] M. Gavrilovic, D. Jovanovic, P. Bozovic, *et al.*, “Vineyard zoning and vine detection using machine learning in unmanned aerial vehicle imagery”, *Remote Sensing*, vol. 16, n.º 3, febr. 2024.
- [59] A. Barreto, F. R. I. Yamati, M. Varrelmann, *et al.*, “Disease incidence and severity of cercospora leaf spot in sugar beet assessed by multispectral unmanned aerial images and machine learning”, *Plant Disease*, vol. 107, n.º 1, pp. 188–200, en. 2023.
- [60] D. Percival, K. Anku, y J. Langdon, “Phenotype, phenology, and disease pressure assessments in wild blueberry fields through the use of remote sensing technologies”, *Acta Horticulturae*, n.º 1381, pp. 123–130, nov. 2023. Disponible en https://www.actahort.org/books/1381/1381_17.htm
- [61] G. B. C. Narayanappa, S. H. Abbas, L. Annamalai, *et al.*, “Revolutionizing UAV: experimental evaluation of IoT-enabled unmanned aerial vehicle-based agricultural field monitoring using remote sensing strategy”, *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, vol. 7, n.º 4, pp. 411–425, dic. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s41976-024-00134-y>
- [62] S. Liu, D. Yin, H. Feng, *et al.*, “Estimating maize seedling number with UAV RGB images and advanced image processing methods”, *Precision Agriculture*, vol. 23, n.º 5, pp. 1604–1632, oct. 2022.
- [63] X. Yu, D. Yin, H. Xu, *et al.*, “Maize tassel number and tasseling stage monitoring based on near-ground and UAV RGB images by improved YoloV8”, *Precision Agriculture*, vol. 25, n.º 4, pp. 1800–1838, ag. 2024.
- [64] W. Liu, J. Zhou, B. Wang, *et al.*, “IntegrateNet: a deep learning network for maize stand counting from UAV imagery by integrating density and local count maps”, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, pp. 1–5, jun. 2022. Disponible en <https://ieeexplore.ieee.org/document/9807329>
- [65] A. Bawa, S. Samanta, S. K. Himanshu, *et al.*, “A support vector machine and image processing based approach for counting open cotton bolls and estimating lint yield from UAV imagery”, *Smart Agricultural Technology*, vol. 3, febr. 2023.
- [66] M. Smajlhodžić-Deljo, M. Hundur Hiyari, L. Gurbeta Pokvić, *et al.*, “Using data-driven computer vision techniques to improve wheat yield prediction”, *AgriEngineering*, vol. 6, n.º 4, pp. 4704–4719, dic. 2024. Disponible en <https://www.mdpi.com/2624-7402/6/4/26920>

- [67] O. Ameslek, H. Zahir, S. Mitro, *et al.*, "Identification and mapping of individual trees from unmanned aerial vehicle imagery using an object-based convolutional neural network", *Remote Sensing in Earth Systems Sciences*, vol. 7, n.º 3, pp. 172–182, sept. 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1007/s41976-024-00117-z>
- [68] T. Kattenborn, J. Eichel, y F. E. Fassnacht, "Convolutional neural networks enable efficient, accurate and fine-grained segmentation of plant species and communities from high-resolution uav imagery", *Scientific Reports*, vol. 9, n.º 11, art. 17656, nov, 2019.
- [69] T. Kattenborn, J. Leitloff, F. Schiefer, *et al.*, "Review on convolutional neural networks (CNN) in vegetation remote sensing", *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. 173, pp. 24–49, mzo. 2021.



Metaanálisis de la auditoría de mantenimiento como herramienta de gestión en la producción industrial

Meta-analysis of maintenance auditing as a management tool in industrial production

José Isaías Salas Hernández ¹, Fernando Arturo Soler López ², Jhonatan Ospina Molina ³, Andrés Felipe Medina Gamba ⁴ y Tony Castillo Calzadilla ⁵

Fecha de Recepción: 14 de septiembre de 2024

Fecha de Aceptación: 28 de diciembre de 2024

Cómo citar: Salas Hernández J.I., Soler López F.A., Molina J.O., Medina Gamba A.F., Castillo Calzadilla T. Metaanálisis de la auditoría de mantenimiento como herramienta de gestión en la producción industrial. *Tecnura*, 28(82), 104-133. <https://doi.org/10.14483/22487638.22716>

Resumen

Objetivo: identificar el estado del conocimiento sobre la *auditoría de mantenimiento*, a partir de su papel como herramienta de gestión en la producción industrial. Para tal fin, se analizó el desarrollo de los conceptos asociados a dicho tópico, en bibliografía selecta producida entre los años 2000 a 2024.

Metodología: se trata de un trabajo descriptivo, de tipo documental, no experimental y cualitativo. La técnica implementada fue la de revisión documental en las bases de datos Scopus y Web of Science, para la búsqueda de información mediante el uso de palabras clave y conectores booleanos, y así elaborar listas de referencias de las publicaciones pertinentes.

Resultados: se determinó que los conceptos sobre auditoría de mantenimiento inicialmente estuvieron vinculados con la contabilidad, mientras que nociones más recientes la asocian con las ingenierías Mecánica, Industrial y de Mantenimiento.

Conclusiones: la auditoría de mantenimiento es una estrategia fundamental para la gestión empresarial, cuyas concepciones han variado a lo largo del tiempo y se perfilan como decisivas para una gestión de mantenimiento eficiente y sostenible, a lo cual se suman la auditoría de gestión de mantenimiento, la industria 4.0 y la inteligencia

¹Ingeniero mecánico, ingeniero industrial (UDO); especialista en Gerencia de las Organizaciones (URBE); especialista en Gestión de la Salud y Seguridad en el Trabajo (Unitec); magíster Scientiarum en Gerencia de Mantenimiento (UDO-Unefa); doctor en Ciencias de la Educación (ULAC).

²Ingeniero electrónico (Universidad Distrital Francisco José de Caldas); maestría en Telemática (Universidad Distrital Francisco José de Caldas); maestría en Business Administration; doctor en Higher Education.

³Ingeniero mecánico; especialista en Gerencia de Mantenimiento (UECCI); magíster en Ingeniería (UECCI).

⁴Tecnólogo en Mecánica Automotriz (UECCI); especialista en Gerencia de la Seguridad y Salud en el Trabajo (UECCI); magíster en Ingeniería (UECCI).

⁵Tecnólogo en Electrónica (UDO); licenciado en Educación, mención Técnica Industrial (UDO); M. Sc. en Gerencia de Mantenimiento (UDO-UNEFA); doctor en Ingeniería para la Sociedad de la Información y Desarrollo Sostenible (Universidad de Deusto).

artificial.

Palabras clave: auditoría de mantenimiento, gestión de mantenimiento, industria 4.0.

Abstract

Objective: To identify the state of knowledge of the concepts related to maintenance auditing. To this end, the concept of maintenance auditing as a tool for industrial production management and the development of concepts associated with this topic were analyzed in selected bibliography produced between 2000 and 2024.

Methodology: This is a descriptive, documentary, non-experimental and qualitative study. The technique applied was that of documentary review in the Scopus and Web of Science databases to search for information using key words and Boolean connectors to draw up reference lists of the relevant publications.

Results: It was determined that concepts about maintenance auditing were initially linked to accounting, while more recent notions associate maintenance auditing with Mechanical, Industrial, and Maintenance Engineering.

Conclusions: maintenance audit is a fundamental strategy for business management, whose conceptions have varied over time and which are emerging as decisive aspects for efficient and sustainable maintenance management, to which are added elements such as Maintenance Management Audit, Industry 4.0. and Artificial Intelligence.

Keywords: Maintenance auditing, Maintenance management, Industry 4.0.

Introducción

La dinámica y los requerimientos que enfrentan los procesos productivos industriales, en los contextos local, regional y global, exigen satisfacer las necesidades de los clientes internos y externos. Para lograrlo, es necesario adoptar nuevas visiones en la gestión del mantenimiento, lo cual ha dado lugar a una perspectiva diferente de esta disciplina. Ahora se reconoce que el mantenimiento no debe verse simplemente como un gasto para la industria, sino como una herramienta clave para cumplir con las metas y objetivos de producción, satisfacer la demanda del mercado, generar mayores retornos de inversión y garantizar una mayor disponibilidad de los activos ([Castillo, 2011](#)). Además, es imperativo para cualquier organización industrial planificar acciones orientadas a asegurar que el ciclo de vida de los activos no se vea reducido, ya que los deterioros prematuros podrían convertirse en un factor que impacte negativamente en los costos operativos.

En este sentido, el desarrollo de una gestión de mantenimiento integral es requisito para la sostenibilidad de las organizaciones. Esto llevará a que los costos operativos de la planta sean aceptables, lo cual incrementará su capacidad de competir en el mercado. En consecuencia, el papel del mantenimiento debe evolucionar para apoyar la creciente competencia global; sin embargo, no puede limitarse a reaccionar únicamente ante emergencias ([Mobley et al., 2008](#)). De ese modo, se estima que los responsables de gestionar e implementar los programas de mantenimiento requieren de herramientas capaces de examinar, analizar y diagnosticar formalmente

los elementos tangibles e intangibles asociados con la producción. Por ello, el mantenimiento de las instalaciones, maquinarias y equipos no es sólo una tarea, sino una ciencia que permite eficazmente estudiar y gestionar la resolución de problemas en el área, así como también sugerir soluciones y corregir las inconformidades (Raouf, 2009). En ese contexto, surge la auditoría de mantenimiento (AM) como un proceso complejo, sistemático y organizado por medio del cual detectar desviaciones u omisiones en el mantenimiento, con métodos formales y a partir de indicadores específicos de desempeño del mantenimiento (Montilla, 2019). De forma complementaria, *Lifetime Reliability Solutions* (2013) plantea que la auditoría de mantenimiento compara el régimen de mantenimiento vigente con los requerimientos técnicos y operativos que define la organización, este enfoque permite detectar esas diferencias entre lo planificado y lo ejecutado.

La auditoría, en las primeras civilizaciones, en su forma más primitiva, surgió cuando un núcleo social dominó a otro por medio de la política, la religión, la economía, las ciencias, o por la fuerza, y este era obligado a pagar un tributo al que lo dominaba. En esos casos, el gobernante requería que los tributos impuestos fueran pagados correctamente y en el tiempo requerido, para lo cual se designaban revisores que efectuaran la labor de fiscalización. Luego, en la Edad Moderna, se implementaron procesos orientados hacia lo administrativo, enfocados en la eficiencia como un factor de crecimiento para las empresas; así surgieron mecanismos de supervisión y de establecimiento de estrategias que aseguraban los resultados de producción esperados (Sandoval, 2012). Según Florián (2021), la auditoría está relacionada con los primeros asentamientos humanos, de donde trascendieron cuatro etapas históricas que marcaron su nacimiento y desarrollo: prehistoria, Edad Media, Revolución Industrial y la era digital.

Dattin (2014) resalta que, en 1830, en la Compagnie de Saint-Gobain, el ejercicio de la auditoría estaba instaurado y los accionistas designaban a los auditores con la función de monitorear las transacciones corporativas y el cumplimiento de los estatutos. Esta práctica tuvo el propósito de diferenciar a quienes ejercían funciones de gestión, de los que fiscalizaban y auditaban los estados financieros en las *sociedades anónimas*. Posteriormente a principios del siglo XX, la auditoría aumentó su demanda por toda Inglaterra, hasta expandirse a Estados Unidos. Allí, esa orientación de detección y prevención del fraude, se transformó en precisión de la posición financiera de la empresa y el establecimiento de objetivos económicos de socios y clientes.

De acuerdo con Perilla (2017), la auditoría moderna nació en Inglaterra, durante la Revolución Industrial, con el fin de evaluar los procesos y mejorarlos, ante la aparición de máquinas novedosas y la expansión de los mercados; en consecuencia, era necesario controlar un mayor flujo de bienes, a la vez que se adicionó la necesidad de mantener el aparataje industrial en condiciones adecuadas. Como producto de un proceso evolutivo constante, se originaron las

principales vertientes del pensamiento en la auditoría: la anglosajona y la estadounidense. Esta última corriente se divide en dos etapas: la primera, aún se orientaba al cumplimiento de los principios contables, por lo que se desarrollaban inspecciones y revisiones a las organizaciones. A finales del siglo XIX y principios del XX, se empezó a implementar un enfoque que buscaba garantizar la eficacia y eficiencia de las actividades comerciales. La segunda, que se inició después de la creación de la Security Exchange Commission (SEC), se enfocaba más en la prevención y control de los posibles fraudes, y así prevenir problemas en el sistema financiero de Estados Unidos, como ocurrió en 1934 ([Perilla, 2017](#)). Para [Yalçın \(2023\)](#), la contabilidad ha estado presente desde la antigüedad, y en ella, las auditorías han conformado los dispositivos contables empleados con la finalidad de controlar determinadas actividades organizacionales. Inicialmente, la auditoría se practicó de una manera rudimentaria, con orientación a la vigilancia del uso de los recursos públicos de los gobernantes de la época, mientras que los escribanos detectaban posibles malversaciones de las riquezas y patrimonios de los gobernantes.

Como se infiere, la evolución histórica de la auditoría tuvo un momento crucial a partir de la Revolución Industrial, con surgimiento en la Inglaterra del siglo XVIII, desde cuando tomó diversas perspectivas situadas en lo contable, financiero y empresarial, para abarcar el ámbito del mantenimiento industrial.

Auditoría: elementos conceptuales

La auditoría y sus demás elementos parten de nociones básicas que la ubican como un proceso sistemático necesario para obtener y evaluar evidencias objetivas sobre informes de actividades económicas y otros eventos relacionados, con la finalidad de determinar la exactitud de estos, de conformidad con los principios establecidos ([American Accounting Association, 1973](#), citada por [Pacheco, 2021](#)).

Según, [Montilla y Herrera \(2006\)](#), existen diversas interpretaciones acerca del concepto de *auditoría*. En su acepción más simple, puede concebirse como el procedimiento de verificación de los estados financieros de una entidad organizacional, ya sea pública o privada; también, como el proceso de revisión de la contabilidad que origina los estados financieros, y de esa manera comprobar si los mismos expresan una representación rigurosa acerca de la realidad económica de la empresa.

En cambio, [Arens *et al.* \(2007\)](#) la conciben como el trabajo sistemático de acumulación y evaluación de ciertas evidencias basadas en la actuación de una organización, que a su vez parten de información específica con el potencial para determinar y divulgar, a las partes interesadas, la consistencia entre la información recopilada y los criterios organizacionales. [Mantilla \(2016\)](#)

asegura que la auditoría es un procedimiento metódico cuya finalidad es aproximar la materia, sujeto a, y objeto de, criterios establecidos, y, de esta manera, establecer los controles necesarios para asegurarse de que cumpla con determinadas normas; en ese sentido, está vinculada a la función de control dentro de la gestión y de los procesos administrativos de la organización, independientemente de su naturaleza.

Para Biler (2017), consiste en un proceso sistemático por el cual se desarrolla una minuciosa revisión por un experto profesional cualificado para tal fin, acerca de determinados procedimientos, actividades o procesos organizacionales empresariales, con el objeto de garantizar el correcto desarrollo de estos. Ello implica que la auditoría debe ser efectuada por personas exclusivamente dedicadas a esos propósitos, por cuanto se requiere un criterio imparcial, justo, sistemático y profesional para adelantar las labores auditables.

Por último, Manrique (2019) afirma que la auditoría es una labor sistemática que facilita obtener y evaluar las evidencias concernientes a los registros contables, financieros, administrativos, entre otros, de forma objetiva; agrega que es aplicable en diferentes organizaciones con el fin de examinar que estas se gestionen a partir de criterios certeros y conformables, según el tipo de auditoría: tributaria, financiera, administrativa o de gestión, operativa, gubernamental, ambiental, académica, forense, de mantenimiento.

Definiciones de “mantenimiento”

Según Pérez Rondón (2021), el *mantenimiento* se concibe como una serie de acciones que deben efectuar las personas a cargo de este departamento o área, con la finalidad de que los equipos, máquinas, componentes e instalaciones involucrados en un proceso industrial estén en las condiciones requeridas de funcionamiento para lo que fueron diseñados, construidos, instalados y puestos en operación.

García (2018) lo define como un conjunto de técnicas cuyo propósito está orientado a la conservación de equipos, maquinaria, dispositivos, útiles e instalaciones industriales que se encuentren en servicio, para que estén disponibles de modo óptimo el mayor tiempo posible y con un rendimiento máximo. Esto abarca una combinación de factores como el conocimiento, la experiencia y el trabajo en equipo, para optimizar los aspectos administrativos y operativos que permitan alcanzar los indicadores de gestión trazados por la organización.

De acuerdo con Muñoz (2015), el *mantenimiento industrial* se puede precisar como el control que se ejerce de manera constante sobre la maquinaria e instalaciones, que abarca las labores de reparación y revisión requeridas con el objeto de garantizar el funcionamiento habitual y un

estado de conservación óptimo. Dicho control involucra, entonces, unas acciones sistemáticas y procesos continuos que generan información permanente acerca de los hallazgos del auditor, en cuanto al mantenimiento; esto facilita la detección de las no conformidades, su prevención y corrección, a la vez que brinda la información requerida por la gerencia de mantenimiento para la toma de decisiones.

Adicionalmente, [Montilla \(2019\)](#) señala que el mantenimiento está referido a la asociación de actividades planificadas y coordinadas, cuya finalidad consiste en propiciar la conservación de instalaciones, equipos, útiles y herramientas de diversa naturaleza, en óptimas condiciones desde el punto de vista operativo, de modo que se encuentren de manera homologable con su estado teórico nominal, mediante la generación de una inversión mínima en lo concerniente a elementos económicos, de tiempo e insumos; ello genera condiciones más seguras para el personal en labores, y para el medio ambiente, a la vez que propende al logro de los objetivos de la organización.

[Sullivan et al. \(2004\)](#) sostienen que el mantenimiento es el conjunto de operaciones para mantener los diversos bienes materiales de una organización en buenas condiciones de conservación. Esto implica que el mantenimiento contiene aquellas acciones realizadas para evitar que un dispositivo o componente falle o para reparar la degradación normal del equipo experimentada con el funcionamiento del dispositivo, a fin de conservarlo en buen estado de funcionamiento y que pueda extenderse el ciclo útil de vida, lo cual redundaría en el cumplimiento de las metas organizacionales.

Evolución y tipologías del mantenimiento

Al igual que la auditoría, el mantenimiento tendría una historia tan antigua como el ser humano; desde entonces se infieren patrones que muestran la necesidad perenne de mantener las herramientas, por más rudimentarias que estas fueran. En ese sentido, [Rossi \(2013\)](#) explica que el ser humano siempre ha sentido la necesidad de mantener los equipos ideados para la producción o prestación de un servicio, en las mejores condiciones, ante las fallas experimentadas en las herramientas como resultado del uso constante.

De acuerdo con [Pérez \(2021\)](#) y [Mora \(2009\)](#), durante la Revolución Industrial el mantenimiento fue de tipo correctivo, porque se empleaba cuando surgía una emergencia, dado que los accidentes y pérdidas requerían de la intervención de las aseguradoras, las cuales, al exigir mayores y mejores cuidados, dieron lugar a los talleres mecánicos. A partir de 1925, las industrias estadounidenses concertaron organizar el mantenimiento con una base científica; de allí surge el *mantenimiento preventivo*.

No obstante, a lo largo del proceso industrial experimentado desde finales del siglo XIX, la función del mantenimiento ha pasado por diferentes etapas o generaciones. En los inicios de la Revolución Industrial, los propios operarios estaban a cargo de las reparaciones de los equipos; pero cuando las máquinas se hicieron más complejas y la dedicación a tareas de reparación aumentaba, empezaron a crearse los primeros departamentos de mantenimiento, con una actividad diferenciada de los operarios de producción (Pérez, 2021). Estas fases han sido clasificadas en distintas generaciones de mantenimiento, tal como se resume en la figura 1.



Figura 1. Generaciones de mantenimiento

Nota: adaptado de Pérez (2021).

Mora (2009) asegura que, a partir de la Segunda Guerra Mundial, los departamentos de mantenimiento buscaron solucionar los fallos que se producían en los equipos, con énfasis en su prevención. Esto implicaba crear los departamentos de mantenimiento con personal cuya función fuera estudiar qué tareas de mantenimiento debían efectuarse para evitar los fallos. Posteriormente aparecieron los mantenimientos preventivo, predictivo, proactivo, basado en fiabilidad (RCM, por su sigla en inglés); además de la gestión de mantenimiento asistida por ordenador.

El origen del mantenimiento preventivo se rastrea en Estados Unidos, a principios del siglo XX, cuando Ford, la compañía productora de automóviles, implementó el *mantenimiento preventivo planificado*. Posteriormente, al finalizar la Segunda Guerra Mundial, las teorías estadounidenses llegaron a Japón, donde serían implementadas durante los años 1950. Este desarrollo progresivo ha sido documentado según los hitos históricos que marcan la evolución del mantenimiento (figura 2).

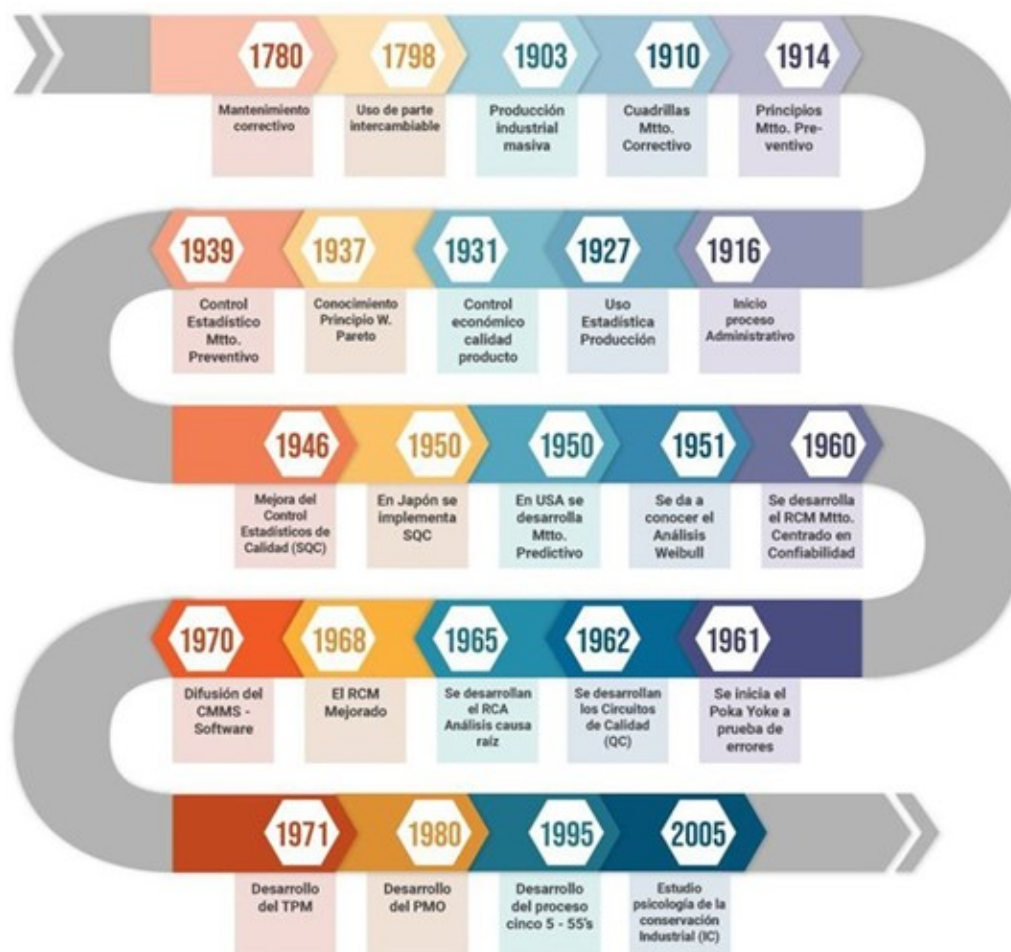


Figura 2. Evolución del mantenimiento

Nota: adaptado de Pérez (2021).

En la década del ochenta, se desarrolló el mantenimiento productivo total (TPM, por su sigla en inglés), dentro del cual algunas de las tareas realizadas por el personal de mantenimiento pasaron a ser ejecutadas por operarios de producción, con el objeto de conseguir cero averías. Como filosofía, el TPM se basa en la formación, motivación e implicación del equipo humano en cada una etapa del mantenimiento (Mora, 2009; Pérez, 2021).

A partir de los primeros años de 1990, el mantenimiento se contemplaba como una parte de la *calidad total*. Surgió también el mantenimiento basado en el riesgo (MBR, por su sigla en inglés) como un proceso de la empresa al que contribuyen también otros departamentos.

Las corrientes que orientan el mantenimiento contemporáneo se ubican en torno a:

- La certificación de calidad ISO 9000-14000.
- La evaluación comparativa.
- Análisis de riesgos.
- La reingeniería para mejorar la fiabilidad.
- Y la auditoría de mantenimiento, para reducir las disconformidades.

Igualmente, en este lapso surge la filosofía de las 5S, que incluye un conjunto de prácticas para hacer más eficiente el mantenimiento, desde una perspectiva que abarca a todo el personal, desde los operarios hasta la alta gerencia.

Posteriormente, después del año 2000, se han configurado propuestas como el estudio de la psicología de la conservación industrial ([Pérez, 2021](#)).

De igual forma, [Pérez \(2021\)](#) aclara que el avance tecnológico es un parámetro que ha ayudado a generar nuevos métodos, distintos procedimientos de producción, y el perfeccionamiento de los equipos.

Esto marca una tendencia a sustituir a los actuales por otros que presenten mayor rendimiento, además de un funcionamiento más estable y seguro. Esto supone una reducción en los costos de mantenimiento, junto con el incremento en la mantenibilidad, cuyos avances tecnológicos alcanzan también a los sistemas de auditorías de mantenimiento.

Metodología

Para este estudio, la metodología se fundamentó en un enfoque descriptivo, de tipo documental, no experimental y cualitativo. La técnica implementada fue la revisión documental en las bases de datos Scopus y Web of Science (WoS), ambas accesibles bajo suscripción privada.

El enfoque cualitativo se caracteriza por ser abierto, flexible, construido a partir de la realización del estudio, con un empleo reducido de la estadística y en el que el análisis consiste en describir información y desarrollar los temas resultantes de dicho proceso ([Hernández *et al.*, 2014, p. 13](#)). Esto podría conducir a la manifestación de determinadas limitaciones que, según el criterio de [Vega \(2023\)](#), se trata de condiciones que pueden reconocerse como barreras probables que impedirían el logro de los objetivos de una investigación, dado que restringirían la validez, aplicabilidad y generalización de los resultados en una investigación.

Entre las principales limitaciones involucradas en el enfoque cualitativo, [Vega \(2023\)](#) menciona el tamaño o dimensiones de la muestra, sesgo de selección, sesgo de respuesta, instrumentos de medición, contexto temporal, limitaciones en la generalización, además de la validez y confiabilidad, entre otras. De modo que los hallazgos que tengan lugar en el estudio deben ser observados de manera integral, en consideración de las limitaciones que pudieran presentarse y que son características del enfoque cualitativo.

El criterio básico para la elección de las bases de datos antes mencionadas se fundamentó en que estas figuran entre las principales a escala global y son las que albergan mayor cantidad de publicaciones científicas entre sus pares.

En el caso de Scopus, se trata de una base de datos ampliamente reconocida en la comunidad científica por encontrarse entre las más autorizadas, clasificadas y de mayor tamaño de las utilizadas para la investigación. Las funcionalidades de la base de datos Scopus incluyen seguimiento de citas, herramientas analíticas, diversas alternativas de búsqueda y filtrado para encontrar materiales. Alberga más de 7000 editoriales, más de 29 200 publicaciones periódicas registradas y el número de materiales de acceso abierto supera los 23,4 millones ([Scientific Papers, 2024](#)).

La base de datos WoS abarca una amplia variedad de disciplinas y constituye uno de los recursos más acreditados y prestigiosos para la investigación académica. Esa base de datos tiene cuidadosos procesos para la selección de revistas y la indexación de publicaciones, revisadas por pares de alta calidad, para cubrir 254 categorías temáticas, más de 34 000 revistas revisadas por pares, más de 130 000 libros y más de 56 millones de inventos ([Scientific Papers, 2024](#)).

Debido a que la búsqueda de información para efectos del estudio se centra en áreas temáticas y palabras clave específicas, la elección de las bases de datos antes señaladas obedece a que estas ofrecen las herramientas de búsqueda y filtrado de información requeridas. Si bien existen otras bases de datos importantes, portales académicos, motores de búsqueda y repositorios con literatura gris, para esta investigación es relevante delimitar las fuentes de información, de modo que los resultados ostenten criterios específicos en cuanto a la calidad de la información recuperada mediante los algoritmos de búsqueda, además de que entre ambas bases de datos abarcan una gran cantidad de contenido proveniente de las publicaciones científicas que albergan.

En ese sentido, Scopus cuenta con un Comité Asesor de Contenidos (Content Selection and Advisory Board [CSAB]), formado por un conjunto de investigadores y bibliotecarios de ámbito internacional e independiente que cubren las principales disciplinas científicas ([Scopus](#),

2024). Para que entren en evaluación, todas las revistas deben cumplir unas normas básicas de publicación, entre ellas: calidad de contenido, prestigio, regularidad, objetividad y selectividad.

Por su parte, WoS utiliza 24 criterios de calidad diseñados para seleccionar por rigor editorial y mejores prácticas a nivel de revista, así como criterios de impacto que utilizan la actividad de citación como el principal indicador de impacto (Clarivate, 2024).

La búsqueda de información se efectuó mediante palabras clave y conectores booleanos, para lo cual se establecieron filtros específicos respecto a los artículos relacionados con los temas *auditoría de mantenimiento*, tanto en español como en inglés (*maintenance auditing*). Posteriormente, se efectuó el refinamiento de los resultados a partir de la fecha de publicación y de la pertinencia del material, con respecto a las palabras clave relacionadas con la temática de investigación.

En síntesis, la búsqueda de la literatura objeto de análisis tuvo la siguiente secuencia metodológica:

- Búsqueda bibliográfica.
- Extracción de los datos.
- Análisis y síntesis de los datos.
- Informe de las conclusiones.

Antes de iniciar la búsqueda de información, se establecieron filtros específicos respecto a los artículos relacionados con el aprendizaje a lo largo de la vida, con el fin de incluir o excluir las publicaciones que se encontrarían en las bases de datos WoS, cuyos aspectos descriptivos se muestran en la tabla 1.

De igual forma, con el propósito de identificar los artículos relacionados con *auditoría de mantenimiento*, se emplearon criterios específicos para una búsqueda sistemática en las bases de datos WoS, junto con la aplicación Scopus, vinculada a *VOSviewer* para facilitar el reconocimiento de las palabras clave más relevantes para el estudio. Los términos o sintaxis de búsqueda a emplear fueron los siguientes (tabla 2):

- “.Auditoria de mantenimiento”: comprendió títulos, resúmenes y palabras clave dentro de los artículos científicos.
- *Maintenance auditing*: comprendió los títulos, resúmenes y palabras clave dentro de los artículos científicos.

Tabla 1. Criterios generales de inclusión y exclusión de publicaciones

Criterio	Inclusión	Exclusión
Área temática	Auditoría de mantenimiento.	Áreas distintas de las mencionadas en los criterios de inclusión.
Tipo de documentos	Artículos científicos	No son artículos de revisión, de referencias de libros ni notas editoriales.
Palabra clave	Auditoría de mantenimiento (<i>maintenance auditing</i>)	No contiene palabras clave relativas al aprendizaje a lo largo de la vida y criterios relacionados.
Tipo de fuente	Fuentes académicas reconocidas, como libros de texto y revistas indexadas y arbitradas a texto completo.	Fuentes académicas no reconocidas, no indexadas o arbitradas sin contenido a texto completo.

Tabla 2. Palabras clave utilizadas en el metaanálisis

Palabras clave	Sintaxis de búsqueda
1. Auditoría de mantenimiento	1. "auditoría de mantenimiento"
2. <i>Maintenance auditing</i>	2. " <i>maintenance auditing</i> "

Una vez aplicados los respectivos criterios de inclusión y exclusión establecidos previamente, y de emplear las sintaxis de búsqueda correspondientes, se seleccionaron los artículos científicos pertinentes para proceder a la extracción de información relacionada con:

- Los conceptos o definiciones de auditoría de mantenimiento, de acuerdo con la concepción de los autores respectivos.
- Los modelos de auditoría de mantenimiento propuestos por los investigadores que se analizarían, conservando un orden cronológico (2000-2024) para observar variantes relevantes en el desarrollo de estos conceptos y estándares aplicables.

Proceso de búsqueda y selección

La búsqueda se realizó en WoS y Scopus, bases que funcionan bajo suscripción y albergan publicaciones tanto de acceso limitado como abierto. Dado que la búsqueda en ambas podría generar resultados coincidentes, se consideró únicamente uno de los registros duplicados.

Diagrama de flujo del metaanálisis

El proceso sistemático empleado se describe a continuación (figura 3):

- *Identificación del objetivo*: si el objetivo inicial no es factible, se reorienta. Una vez confirmada su viabilidad, se procede a búsquedas exhaustivas en WoS y Scopus.
- *Evaluación de filtros*: si los filtros no arrojan resultados esperados, se reajustan hasta lograr precisión y relevancia.
- *Aplicación de criterios de inclusión/exclusión*: selección cuidadosa de estudios que cumplan con estándares metodológicos.
- *Extracción y síntesis de datos*: consolidación de información para facilitar un análisis coherente.
- *Análisis comparativo*: identificación de patrones o discrepancias en los datos.
- *Conclusiones*: formulación de conclusiones basadas en evidencia para guiar la toma de decisiones en auditorías de mantenimiento industrial. Este enfoque metodológico garantiza la rigurosidad y relevancia de los hallazgos, a la vez que contribuye al conocimiento en la disciplina.

Asimismo, las interrelaciones con la temática en estudio pueden ser observadas en la figura 4, correspondiente a un mapa en el que se visualiza la red de palabras clave obtenidas en la base de datos [Scopus \(2024\)](#), en conexión con el concepto de auditoría de mantenimiento, en este caso en su equivalente en idioma inglés *maintenance auditing*. Las redes establecidas en torno al término en cuestión llevan a interrelacionarlo con conceptos como gerencia (*management*), toma de decisiones (*decisión-making*), gerencia de la información (*information management*) y costos (*costs*), entre otros. La figura 4 muestra que el mayor número de interconexiones está alrededor del término *mantenimiento*, y le siguen *auditoría*, *auditoría pública* e *información gerencial*.

Resultados

Luego de emplear las palabras clave y las respectivas sintaxis de búsqueda, junto con la aplicación de los criterios de inclusión y exclusión metodológicos, el análisis de resultados se

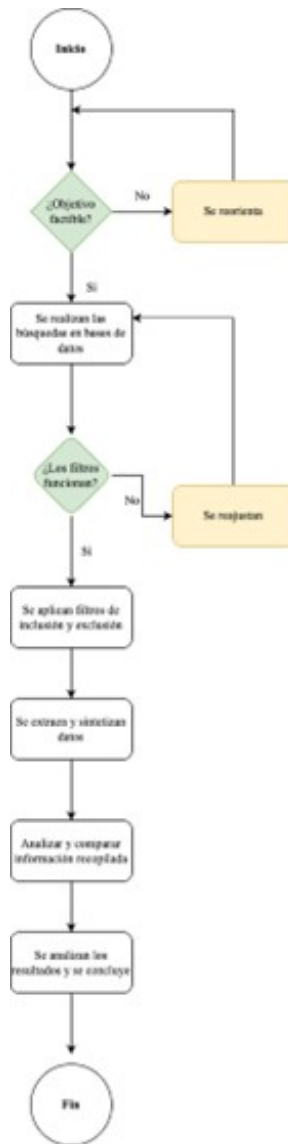


Figura 3. Diagrama de flujo para la captura de la información del metaanálisis

centró en plasmar de manera cronológica la información recabada de los artículos académicos, que se relacionó con los conceptos que los autores exponían sobre la *auditoría de mantenimiento* y los modelos empleados de manera regular.

En los resultados, se observó que la producción científica documental en esta materia no ha sido continua ni muy prolífica durante el lapso objeto de análisis. En la tabla 3 se sintetizan los resultados obtenidos de manera cualitativa y cuantitativa, cuyos hallazgos se analizan a *posteriori*.

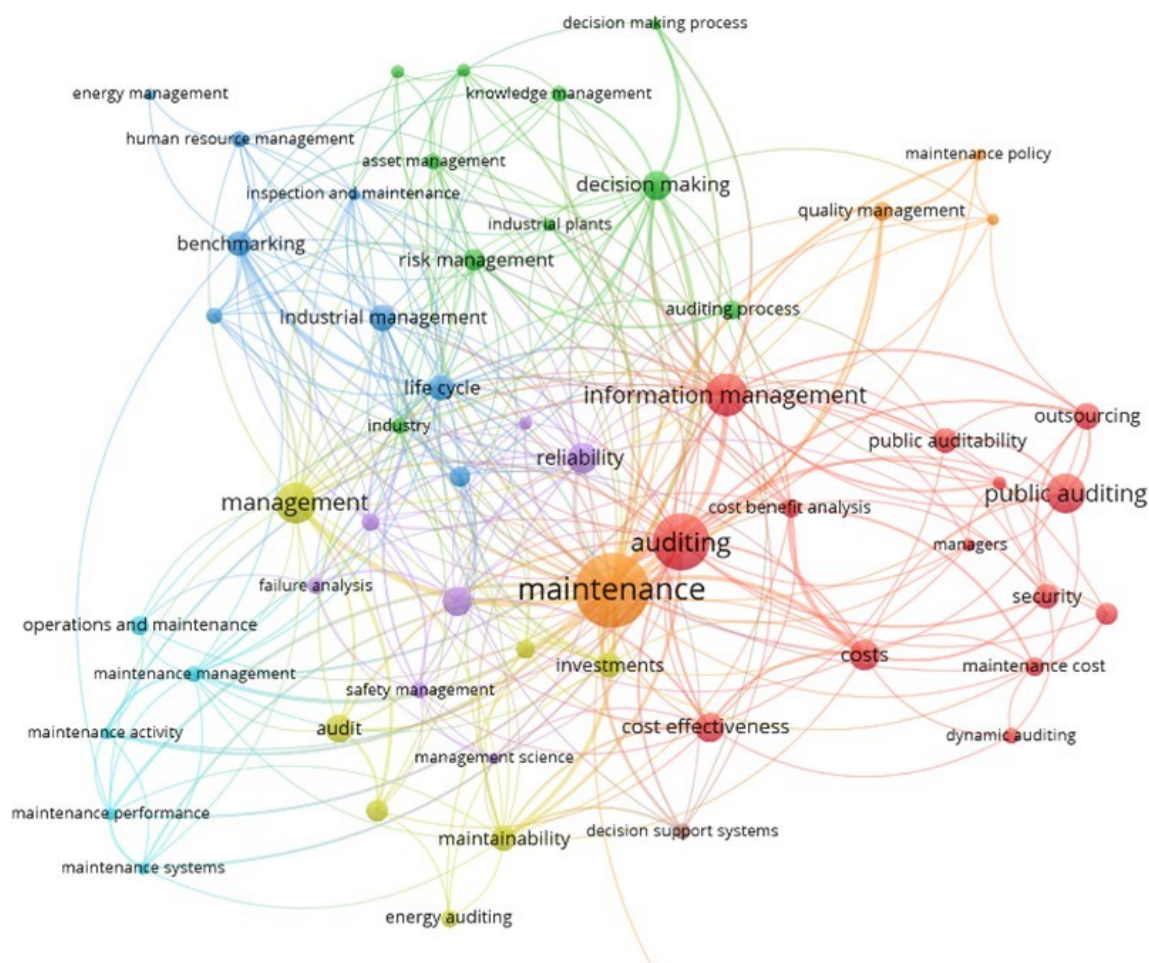


Figura 4. Red de palabras clave

Nota: tomado de [Scopus \(2024\)](#).

El concepto de “auditoría de mantenimiento” en la literatura científica

De las revisiones de las publicaciones académicas, se extrajeron aquellas referencias relativas al concepto *auditoría de mantenimiento*. Para [Acosta Palmer \(2011\)](#), la auditoría de gestión de mantenimiento consiste en un examen objetivo y sistemático que busca evaluar una organización, midiendo aspectos como la eficiencia y eficacia en la planificación, control y uso de los recursos. Por su parte, [Sondalini \(2015\)](#), la define como una técnica específica basada en la recolección y análisis de información acerca de los procesos de mantenimiento, con el fin de posibilitar la detección de disconformidades y ejecutar las mejoras respectivas.

Tabla 3. Número de registros encontrados en diferentes bases de datos para dos palabras clave

Palabra clave	Web of Science (WoS)	Web of Science (WoS)	Scopus	Scopus	Registros
	Registros generales	Registros filtrados	Registros generales	Registros filtrados	
1. Auditoría de mantenimiento	157	04	113	05	09
2. <i>Maintenance auditing</i>	111	06	186	11	17

Asimismo, de acuerdo con [Rojas \(2015\)](#), la *auditoría de mantenimiento* implica una estrategia destinada a optimizar los resultados de mantenimiento, pues ofrece información pertinente que puede usarse como insumo para la toma de decisiones. Igualmente, [Galar y Kumar \(2016\)](#) indican que es un instrumento o herramienta que las organizaciones implementan de manera autogestionaria, con el objeto de adelantar el seguimiento, revisión y evaluación, y así tomar decisiones idóneas en la gestión. Al mismo tiempo, facilita el desarrollo de mecanismos tendientes a perfeccionar las acciones destinadas al control del mantenimiento, acorde con las normas internas y las leyes vigentes.

Para [Galar y Kumar \(2016\)](#), la *auditoría de mantenimiento* es una herramienta técnica para verificar el alcance de determinados indicadores vinculados a las medidas de referencia ideales, dentro de la gestión del mantenimiento. Por su parte, [Chang *et al.* \(2020\)](#) aseguran que se trata de una herramienta que abarca un conjunto de técnicas para determinar si las actividades en las áreas funcionales de la organización industrial o empresarial evidencian el cumplimiento de las normas correspondientes a la gestión del mantenimiento.

Por último, Parra [Márquez *et al.* \(2021\)](#) indican que la auditoría de mantenimiento incluye una serie de mecanismos configurados con el fin de evaluar los procesos esenciales incluidos en la gestión del mantenimiento, todo lo cual tiene una relación directa con la definición de los objetivos clave que se busca evaluar (tabla 4).

Como se puede inferir de las definiciones anteriores, la auditoría de mantenimiento ha sido concebida desde variadas dimensiones que la sitúan como proceso, técnica, herramienta e instrumento, cuyos fines son variados. En sus primeros momentos, tenía como objetivo ejercer un control más minucioso sobre las actividades de mantenimiento, usualmente desplegadas para verificar el estado de herramientas, maquinarias o equipos. En la actualidad, la tendencia

se orienta hacia la *auditoría de gestión de mantenimiento*, la cual, según señala [Stamboliska et al. \(2015\)](#), comprende el análisis de las políticas internas de la organización, al igual que los procedimientos y resultados de la gestión de mantenimiento, lo que lleva a identificar las áreas de mejora.

Tabla 4. Perspectiva del mantenimiento

Autor(es)	Definición	Aporte
García (2009)	Actividad efectuada para comprobar cómo se gestiona el mantenimiento desde la perspectiva de la máxima disponibilidad al mínimo costo.	Incluye el principio de máxima disponibilidad.
Sondalini (2015)	Técnica formal basada en el proceso de la recolección y análisis de información sobre los procesos actuales de mantenimiento y los sistemas de información usados para esos fines, en aras de detectar oportunidades de mejora.	Enfoca la AM como un proceso formal para encontrar soluciones a los problemas procedimentales del mantenimiento.
Rojas (2015)	Importante herramienta para la revisión que facilita la mejora de los resultados de mantenimiento al colaborar en la toma de decisiones, gestión y control del mantenimiento.	Enfatiza la función de gestión de la AM e indica algunos de sus beneficios para la empresa.
Galar y Kumar (2016)	Herramienta técnica para desarrollar la verificación del alcance de determinados indicadores vinculados con las medidas de referencia ideales, dentro de los procesos de la gestión de mantenimiento.	Remarca la importancia de escoger los indicadores de mantenimiento a evaluar, según el tipo de producción y el uso de métodos mixtos para efectuar la AM.

Chang <i>et al.</i> (2020)	Herramienta que abarca un conjunto de técnicas para determinar si las actividades en las áreas funcionales demuestran el cumplimiento de las exigencias, en lo que respecta a la gestión del mantenimiento.	Relaciona la auditoría de mantenimiento con un conjunto más amplio, como el de la gestión de mantenimiento.
Parra Márquez y Crespo (2020)	Mecanismo de evaluación de los procesos principales de la gestión del mantenimiento, el cual tiene una alta relación con la definición de los objetivos a evaluar.	Interrelaciona el proceso de auditoría con el de gestión de mantenimiento y el control en el logro de los objetivos organizacionales.
Espinoza <i>et al.</i> (2023)	Evaluación mixta del estado actual de la gestión del mantenimiento	Modelo de auditoría más flexible, mediante el proceso analítico en red, para ponderar criterios, identificación de áreas críticas y el enfoque de esfuerzos en las brechas detectadas

Según la perspectiva de Ben-Daya *et al.* (2009), la *auditoría de gestión de mantenimiento* es una práctica cada vez más recurrente, porque brinda la posibilidad de desarrollar planes de mejora continua para un sistema de mantenimiento. Esto supone mucho más que el aumento de la eficiencia y la eficacia de la planta, pues se pretende alcanzar una visión integradora del proceso.

Por su parte, Orozco *et al.* (2019) estiman que la gestión de mantenimiento, tal como se plantea en la actualidad, reviste una concepción que la convierte en un fundament o para las actividades de las empresas del sector industrial. Ello obedece a que se orienta en función de facilitar el resguardo de la disponibilidad de herramientas, equipos, maquinarias e instalaciones, para mantener las actividades empresariales dentro de márgenes óptimos de costos. Para ello, considera aspectos diversos como seguridad del personal; impacto de las actividades industriales sobre el medio ambiente; extensión de la estabilidad y durabilidad de los equipos; garantía de la calidad de los productos o servicios ofrecidos.

De las definiciones previas se pueden extraer ciertos elementos característicos en las concepciones relativas a la auditoría de mantenimiento, ya sea para diferenciarlas o para homologarlas entre sí. La filosofía y la práctica de la auditoría de gestión de mantenimiento involucran, entre otros principios, máxima disponibilidad al mínimo costo; detección de oportunidades de mejora en los procesos de mantenimiento; importancia para la toma de decisiones; procesos de verificación referidos al alcance de indicadores de estándares de mantenimiento (planificados, ejecutados y evaluados) (tabla 4).

Modelos de auditoría de mantenimiento

La auditoría de mantenimiento es compleja, detallada y constituye más que una simple estrategia o instrumento de gestión de mantenimiento. Como todo proceso, está conformada por fases o etapas, las cuales varían según las características propias de la organización (Galar *et al.*, 2011):

- La aplicación de instrumentos de recolección de datos.
- La asignación de medidas específicas, tomadas de indicadores numéricos previamente definidos.
- Varias etapas previas complementarias que se encuadran en modelos específicos (tabla 5).

Tabla 5. Auditoría de mantenimiento

Al-Za hrani (2001)	Se propone un modelo basado en seis esferas clave que se centran en la organización y su personal; medidas de rendimiento; planificación y programación del trabajo; rendimiento; tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC), y gestión de los materiales.
Al-Muha isen y Santarisi (2002)	Utiliza un diagrama de red para estructurar y visualizar los indicadores de mantenimiento.
Clarke (2002)	Propone usar una mezcla de instrumentos cualitativos y cuantitativos, además de una herramienta de gráfico de radar.
Tavares (2003)	Utiliza el radar de mantenimiento para representar varias áreas y sus relaciones de dependencia.
Macián <i>et al.</i> (2010)	Desarrolla un análisis de debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades (DAFO) para evaluar los indicadores de mantenimiento.

Galar <i>et al.</i> (2011)	Propone una combinación de aspectos cualitativos y cuantitativos, asignada a diferentes ponderaciones según los indicadores de desempeño de mantenimiento que están correlacionados.
Viveros <i>et al.</i> (2013)	Desarrolla un modelo que se compone de etapas que se desarrollan progresivamente, según el escenario de la organización junto con la incorporación de las TIC.
Carnero y Delgado (2008)	Utiliza la técnica multicriterio Macbeth (measuring attractiveness by a categorical based evaluation technique) para la auditoría de indicadores de mantenimiento predictivo. Es un enfoque mixto que trabaja la jerarquía analítica difusa .
Mogollón y Puebmag (2021)	Recomiendan una metodología basada en procesos de orden lógico, bajo un procedimiento de ejecución PHVA, también conocido como círculo Deming, mediante las fases: planificar, hacer, verificar y actuar, que comprenden el ciclo de auditoría para la mejora la calidad.

Asimismo, una auditoría de mantenimiento es una actividad que puede realizarse con distintos objetivos, como los descritos por [Montilla \(2019\)](#):

- Verificar procesos de autoevaluación de la gestión como gerente o jefe de mantenimiento.
- Valorar la administración del mantenimiento desarrollada por gerentes, jefes de mantenimiento o supervisores.
- Elaborar un primer diagnóstico de la función mantenimiento para iniciar la certificación de calidad.

Otra característica relevante es que la auditoría puede ser interna o externa, dependiendo del tamaño y complejidad de la organización. Es idóneo que las empresas contrat en especialistas externos o grupos auditores con personal profesional competente en auditoría de mantenimiento, que desarrolle su trabajo según sistemas específicos al respecto ([Sánchez y Calderón, 2013](#)).

Desarrollo de modelos de auditoría

Con la especialización en auditoría de mantenimiento, diversos teóricos han profundizado en sistemas. [Viveros *et al.* \(2020\)](#) y [López *et al.* \(2014\)](#) realizaron revisiones de los principales exponentes y sus propuestas (tabla 5).

Los modelos existentes plantean la necesidad de combinar adecuadamente técnicas y metodologías que se adapten a las condiciones particulares de cada organización. La tendencia actual integra indicadores cuantitativos y cualitativos de manera complementaria.

Modelo de Viveros et al. (2013)

Este patrón metodológico consta de siete etapas progresivas:

- Análisis de la situación actual: enunciación de objetivos, estrategias y responsabilidades.
- Jerarquización de equipos.
- Análisis de puntos débiles en equipos de alto impacto.
- Diseño de planes de mantenimiento y recursos necesarios.
- Programación del mantenimiento y optimización de recursos.
- Evaluación y control de la ejecución.
- Análisis del ciclo de vida y posible renovación de equipos.

Modelo AMORMS (Viveros et al., 2020)

Este enfoque integral combina métodos cualitativos y cuantitativos para examinar rigurosamente todos los aspectos relevantes. Sus características clave incluyen:

- Acciones integrales que revisan indicadores cuantitativos y cualitativos.
- Etapas bien definidas, cíclicas y continuas.
- Contrastación de resultados con los objetivos organizacionales.

Modelo de Mogollón y Piedmag (2021)

Basado en la norma ISO 19011:2018, sobre gestión de activos, este método PHVA (planificar, hacer, verificar, actuar):

- Proporciona un ejercicio sistemático para los auditores.
- Permite ubicar elementos informativos clave.
- Facilita el diagnóstico de procesos a optimizar.
- Guía la toma de decisiones en mantenimiento.

Estos modelos evidencian la evolución hacia auditorías más integrales, en las que la combinación de enfoques cuantitativos y cualitativos, junto con adaptaciones a normativas internacionales, facilita evaluaciones más completas de los sistemas de mantenimiento.

Auditoría de mantenimiento en relación con la industria 4.0 y la inteligencia artificial

En apartados anteriores se mencionó cómo las crecientes necesidades, la tecnología y otros factores han transformado las metodologías y las líneas de pensamiento acerca de cómo abordar sistemáticamente el mantenimiento en las organizaciones; en virtud de ello, uno de los principales elementos transformadores se encuentra en la denominada industria 4.0, la cual es una revolución en la manera de desarrollar los procesos productivos manufactureros, con intervención de las nuevas tecnologías y oportunidades de transformación en los escenarios productivos (Santos *et al.*, 2020).

Por su parte, Turner *et al.* (2019) estiman que las actitudes de la industria se encaminan hacia la conectividad digital y la automatización en la fabricación, y plantean esa necesidad de comprender y adoptar el uso de la inteligencia artificial (IA) para comprender y maximizar la manufactura automatizada; además, aseguran que estas nuevas tecnologías tienen utilidades y perspectivas amplias para ser implementadas en el desarrollo de modelos de mantenimiento predictivo basados en la toma de datos y monitoreo remoto.

Para González *et al.* (2019) y Vahos *et al.* (2019), la auditoría de mantenimiento debe actualizar sus métodos en virtud de que la industria 4.0 es una realidad, ya que motiva la implementación de diversos programas automatizados y herramientas tecnológicas para los sistemas de gestión de mantenimiento.

Asimismo, las tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) han producido el desarrollo de múltiples aplicaciones y programas que agilizan y flexibilizan los procesos; en ese particular, para los sistemas de gestión de mantenimiento se pueden emplear herramientas como *Computer Management Software Systems* (MMS), que consisten en productos informáticos que ayudan a las empresas a ejecutar sus operaciones de mantenimiento de manera eficiente (Parra, 2014). Al igual que el diagnóstico del modelo de gestión de activos, puede apoyarse en el uso del programa de hoja de cálculo Excel, con la adición de algoritmos para desarrollar análisis de criticidad y disponibilidad de equipos; lo cual reduce errores y facilita la auditoría de mantenimiento (Flores *et al.*, 2020). Ese tipo de enfoque está alineado con la visión integral de la gestión de activos, que articula mantenimiento, confiabilidad, riesgos y costos en todo el ciclo de vida del activo (Pérez Moreno, 2022).

En cuanto a la IA, algunos investigadores en este campo, como Nezamian y Burns (2020), han examinado la importancia y aplicaciones de su uso, y han concluido que posee un gran potencial a corto plazo para presentar soluciones ágiles en la gestión de activos y, sobre todo,

para optimizar la toma de decisiones. Por su parte, [Muñoz *et al.* \(2023\)](#) han explorado las implicaciones del uso de la IA en el campo; en ese sentido, han concluido que la IA permite resolver análisis complejos de manera más precisa; en consecuencia, proporciona más eficiencia a la labor de la auditoría.

Sin embargo, los mismos autores plantean que no debe pensarse en la IA como una herramienta todopoderosa que, en el corto y mediano plazo, sustituirá a las personas que se dedican a las auditorías de mantenimiento, sino que debe ser asumida como un instrumento que viene a facilitar el trabajo, a acortar los lapsos dedicados a la aplicación de las fases de la auditoría, al igual que a optimizar la eficiencia de esos procesos tan importantes para la industria, ya sea de índole tradicional o de industria 4.0 ([Muñoz *et al.*, 2023](#)).

En efecto, según [SAP Concur Team \(2024\)](#), la conjunción de la IA con la auditoría agrega una serie de ventajas como la automatización de tareas de este tenor; el análisis predictivo y detección de anomalías; la generación de informes y documentación; la mejora continua de la eficiencia; la precisión de la auditoría; entre otros beneficios.

Según [Pérez \(2020\)](#), la obsolescencia programada es un factor que no solo afecta la gestión del mantenimiento y el coste de la infraestructura industrial, sino también a las auditorías de mantenimiento. Esta estrategia empresarial desvirtúa el mantenimiento en sí mismo, ya que busca retirar un equipo de servicio no porque ya se encuentre agotada su vida útil efectiva, sino que se trata de una práctica impuesta desde el fabricante del activo, para aumentar la rentabilidad, en detrimento del usuario industrial que depende de dicho equipo para su proceso productivo. En consonancia, la Unión Europea ha promovido a través de las estrategias definidas en la política macro contra el cambio climático, la economía circular. Esta política refuerza las auditorías de mantenimiento al fomentar no solo la mejora en la mantenibilidad de los activos, sino también un uso óptimo del ciclo de vida de los sistemas auditados.

Conclusiones

Una vez analizada la bibliografía sobre auditoría de mantenimiento, los métodos comúnmente empleados en el desarrollo de dichas auditorías y de la perspectiva que interrelaciona la auditoría de mantenimiento y la industria 4.0, al igual que con la inteligencia artificial (IA), ha sido posible concluir lo que se expone a continuación.

En primer término, se puede afirmar que las definiciones de *auditoría de mantenimiento* han transitado por diversos cambios en el lapso estudiado, los cuales se relacionan con las transformaciones suscitadas en el contexto de las concepciones, las teorías del mantenimiento y de la

auditoría, vistas como actividades por separado.

Se observó, en el curso de la revisión de material bibliográfico y las teorías asentadas en esos materiales, que también existen ciertas tendencias hacia la transición o superación de la concepción básica de auditoría de mantenimiento, vista como una actividad que busca estudiar las funciones de mantenimiento en función de eficacia, eficiencia, procesos y métodos, y en la cual los auditores tratan de comprobar cómo se gestiona el mantenimiento desde la perspectiva de la máxima disponibilidad al mínimo costo.

En esta línea, los diversos autores que han desarrollado la más reciente bibliografía plantean que las auditorías de mantenimiento son una herramienta de alcance amplio y desempeñan un papel estratégico en la gestión del mantenimiento. Este enfoque promueve la eficiencia operativa, el cumplimiento de estándares de calidad y una visión holística, integral y sistemática.

Se puede asegurar que las bases y la filosofía que dan perspectiva a la auditoría de mantenimiento y los modelos aplicables han evolucionado sensiblemente en las últimas décadas, mediante el impulso de los avances en ciencia, técnica y tecnología; capital humano cada vez más especializado; surgimiento de nuevos paradigmas gerenciales y de gestión de mantenimiento; desarrollos como la industria 4.0 y las aplicaciones de la IA, que incluyen prácticas más eficientes, lo cual abre nuevas posibilidades para que sean exploradas en un futuro inmediato.

Referencias

- Acosta-Palmer, H. R., y Troncoso-Fleitas, M. de la C. (2011). Auditoría integral de mantenimiento en instalaciones hospitalarias, un análisis objetivo. *Ingeniería Mecánica*, 14(2), 107-118. http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59442011000200003
- Al-Muhaisen, M., y Santarisi, N. (2002). Auditing of the maintenance system of Fuhais plant/Jordan Cement Factories Co. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 8(1), 62-76. <https://doi.org/10.1108/13552510210420595>
- Al-Zahrani, A. (2001). *Assessment of factors affecting building maintenance management auditing in Saudi Arabia* [Tesis de maestría]. King Fahd University of Petroleum and Minerals. <https://eprints.kfupm.edu.sa/id/eprint/10454/>
- Arens, A., Elder, R., y Beasley, M. (2007). *Auditoría, un enfoque integral*. Pearson Educación.
- Ben-Daya, M., Duffuaa Abdul Raouf, S. O., Knezevic, J., y Ait-Kadi, J. (2009). *Handbook of maintenance management and engineering*. Springer.

- Biler Reyes, S. A. (2017). Auditoría. Elementos esenciales. *Dominio de las Ciencias*, 3(n.º extra 1), 138-151. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5907383>
- Carnero, C., y Delgado, S. (2008). Maintenance audit by means of value analysis technique and decision rules. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(4), 329-342. <https://doi.org/10.1108/13552510810909948>
- Castillo Calzadilla, T. (2011). Gestión de mantenimiento de la red hospitalaria del estado Anzoátegui, caso: Hospital Universitario "Dr. Luis Razetti". *Ciencia Ergo Sum*, 18(2), 153-163. <https://cienciaergosum.uaemex.mx/article/view/7413>
- Chang Parrales, M. F., Villacrés Parra, S. R., Viscaíno Cuzco, M. A., y Gallegos Londoño, C. M. (2020). Modelo de auditoría para evaluar la gestión de mantenimiento de activos físicos. *Conciencia Digital*, 3(1.2), 104-122. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v3i1.2.1189>
- Clarke, P. (2002). *Physical asset management strategy development and implementation*. Ponencia presentada en la International Conference of Maintenance Societies (ICOMS), Australian Corrosion Association.
- Clarivate. (2024). *Editorial selection process*. <https://clarivate.com/webofsciencegroup/journal-evaluation-process-and-selection-criteria/>
- Dattin, C. F. (2014). The practice of statutory auditing in France (1867-1935): The case of Pont-à-Mousson and Saint-Gobain companies. *Accounting History*, 19(3), 351-368. <https://doi.org/10.1177/1032373214536954>
- Espinoza, A. A. M., Sánchez, R. V., Piedadmag, M., Cerrada, M., y Cabrera, D. (2023). Modelo de auditoría para la gestión del mantenimiento de activos físicos. Caso práctico: laboratorios mecánicos de la Universidad Ecuatoriana. En F. P. García Márquez, I. Segovia Ramírez, P. J. Bernalte Sánchez y A. Muñoz del Río (eds.), *IoT y ciencia de datos en la gestión de ingeniería. CIO 2022. Apuntes de las clases sobre ingeniería de datos y tecnologías de la comunicación* (vol. 160, pp. 1027-1035). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-27915-7_91
- Flores, M., Medina, D., Vargas, D., y Remache-Vinueza, B. (2020). Asignación de modelos de mantenimiento basada en la criticidad y disponibilidad del equipo. *CienciAmérica*, 9(4), 27-34. <https://doi.org/10.33210/ca.v9i4.340>
- Florián, C. (2021). *La auditoría, origen y evolución. ¿Por qué en Colombia solo se conoce a través de leyes?* Universidad Libre de Colombia.
- Galar Pascual, D., y Kumar, U. (2016). *Maintenance audits handbook: a performance measurement framework*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b19139>

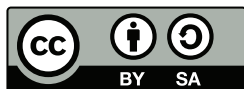
- Galar, D., Kumar, U., Aditya, P., y Berges-Mur, L. (2011). *Auditorías de mantenimiento*. Luleå University of Technology.
- García Garrido, S. (2009). *Auditorías de mantenimiento: qué son, para qué sirven, cómo realizarlas*. Editorial Renovetec.
- García Garrido, S. (2018). *Ingeniería de mantenimiento. Manual práctico para la gestión eficaz del mantenimiento*. Renovetec.
- González González, A., Leal Rodríguez, L. L., Martínez Caballero, D., y Morales Fonte, D. (2019). Herramientas para la gestión por procesos. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración*, 15(28). <https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v15i28.2681>
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., y Baptista Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación*. (6.^a ed.). McGraw-Hill Interamericana.
- Lifetime Reliability Solutions. (2013). *Getting the utmost value from your maintenance audit, maintenance review and maintenance report*. http://www.lifetime-reliability.com/free-articles/maintenance-management/Maintenance_Audit_Maintenance_Review_Maintenance_Report.pdf
- López Campos, M., Crespo Márquez, A., Viveros Gunckel, P., Kristjanpoller Rodríguez, F., y Stegmaier Bravo, R. (2014). Metodología para auditar la asignación de recursos a las actividades de mantenimiento. *DYNA Ingeniería e Industria*, 89(3), 89-97. <https://doi.org/10.6036/5819>
- Macián, V., Tormos, B., Salavert, J. M., y Ballester, S. (2010). Methodology applied for maintenance technical audit in urban transport fleets. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 16(1), 34-43. <https://doi.org/10.1108/13552511011030318>
- Manrique Plácido, J. M. (2019). *Introducción a la auditoría*. Universidad Católica Los Ángeles de Chimbote. [https://repositorio.uladech.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13032/14790/INTRODUCCION%20A%20LA%20AUDITORIA%20\(1\).pdf?sequence=3](https://repositorio.uladech.edu.pe/bitstream/handle/20.500.13032/14790/INTRODUCCION%20A%20LA%20AUDITORIA%20(1).pdf?sequence=3)
- Mantilla Blanco, S. A. (2016). *Estándares/normas internacionales de aseguramiento de la información financiera*. Ediciones de la U.
- Mobley, R. K., Higgins, L. R., y Wikoff, D. J. (2008). *Maintenance engineering handbook*. McGraw-Hill Professional.
- Mogollón, A., y Piedmag, M. (2021). *Modelo de auditoría para la gestión de mantenimiento de activos físicos. Caso de estudio: laboratorios del Área Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca* [Tesis de pregrado, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/21079/1/UPS-CT009264.pdf>

- Montilla Galvis, O. D., y Herrera Marchena, L. G. (2006). El deber ser de la auditoría. *Estudios Gerenciales*, (98), 83-110. https://www.icesi.edu.co/revistas/index.php/estudios_gerenciales/article/view/185
- Montilla Montaña, C. A. (2019). *Mantenimiento industrial y su administración*. Universidad Tecnológica de Pereira.
- Mora Gutiérrez, L. A. (2009). *Mantenimiento. Planeación, ejecución y control*. Alfaomega Grupo Editor.
- Muñoz Abella, M. B. (2015). *Mantenimiento industrial*. Universidad Carlos III. https://www.academia.edu/26982070/Mantenimiento_Industrial
- Muñoz Vargas, J. A., Villanueva Briceno, A. E., y Mendoza de los Santos, A. (2023). Inteligencia artificial en beneficio de la auditoría. *Revista Científica: Biotech and Engineering*, 3(1). <https://doi.org/10.52248/eb.Vol3Iss1.68>
- Nezamian, A., y Burns, I. (2020). Intelligent asset management budgeting and investment decisions for the portfolio of health services assets. En J. P. Liyanage, J. Amandi-Echendu, y J. Mathew (eds.), *Engineering assets and public infrastructures in the age of digitalization: Proceedings of the 13th World Congress on Engineering Asset Management* (pp. 147-155). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-48021-9>
- Orozco Murillo, W., Narváez Benjumea, J. G., García Gómez, W. U., y Quintero Rodas, A. F. (2017). Gestión de mantenimiento y producción más limpia en tres instituciones de salud de Medellín, Colombia. *Revista Ingeniería Biomédica*, 11(21). <https://doi.org/10.24050/19099762.n21.2017.1168>
- Pacheco Rodríguez, B. R. (2021). *Implementación de un sistema de gestión de calidad aplicando la norma ISO 9001:2015 para mejorar la gestión administrativa de la Empresa Naylamp Ingenieros S. A. C.* [Trabajo de grado, Universidad Continental]. https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/9441/4/IV_FIN_108_TE_Pacheco_Rodriguez_2021.pdf
- Parra Garrido, R. (2014). Herramienta tecnológica como apoyo a auditoría interna: diagnóstico y propuesta. Caso estudio: Brinks Chile S. A. *Revista Summa de Arithmetica*, 4, 87-102. <https://doi.org/10.11565/sda.v1i4.41>
- Parra Márquez, C., y Crespo Márquez, A. (2020). *Técnicas de auditoría aplicadas en los procesos de gestión del mantenimiento y de la confiabilidad*. Asociación para el Desarrollo de la Ingeniería de Mantenimiento. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10169.60003>

- Parra Márquez, C., Viveros Gunckel, P., Kristjanpoller Rodríguez, F., Crespo Márquez, A., y González-Prida Díaz, V. (2021). Audit and diagnosis in asset management and maintenance applied in the electrical industry. *DYNA*, 96(3), 238-238. <https://doi.org/10.6036/10037>
- Pérez Moreno, V. M. (2020). Fundamentos terotecnológicos para reemplazo de equipos industriales en la gestión de activos. *Revista Ingeniería Industrial*, 19, 1-15. <https://doi.org/10.22320/s07179103/2020.04>
- Pérez Moreno, V. M. (2022). Metodología para administración de falla, desgaste y obsolescencia en gestión de activos industriales. *Revista Tecnológica - ESPOL*, 34(4), 99-119. <https://doi.org/10.37815/rte.v34n4.925>
- Pérez Rondón, F. A. (2021). *Conceptos generales en la gestión del mantenimiento industrial*. Ediciones USTA. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/33276/9789588477923.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Perilla, D. M. (2017). *Auditoría financiera y contable*. Fundación Universitaria del Área Andina.
- Raouf, A. (2009). Maintenance quality and environmental performance improvement: an integrated approach. En M. Ben-Daya, S. O. Duffuaa Abdul Raouf, J. Knezevic, y J. Ait-Kadi. *Handbook of maintenance management and engineering* (pp. 649-664). Springer.
- Rojas, J. (2015, agosto 3). Auditoria de mantenimiento [Presentación diapositivas]. *Prezi.com*. https://prezi.com/w376mr_mrcmx/auditoria-de-mantenimiento/
- Rossi [usuario]. (4 de enero de 2013). Mantenimiento industrial. *El mundo de la ingeniería industrial*. <https://rochichan.blogspot.com/2013/01/mantenimiento-industrial.html>
- Sánchez, J., y Calderón, V. (2013). Auditoría a la etapa de planificación y diseño del proceso de compensación. *Estudios Gerenciales*, 29(127), 139-150. <https://doi.org/10.1016/j.estger.2013.05.002>
- Sandoval Morales, H. (2012). *Introducción a la auditoría*. Red Tercer Milenio. https://www.aliat.click/BibliotecasDigitales/economico_administrativo/Introduccion_a_la_auditoria.pdf
- Santos, J. P., Schmidt, S., & Asthon, M. S. (2020). Indústria 4.0 como estratégia de inovação. *Anais do Congresso Nacional de Excelência em Gestão (CNEG)*, 16(1), 1-15. <https://www.semanticscholar.org/paper/862323a84d48b7579d45e7e6f0e49fd650554b4d>
- SAP Concur Team. (2024, febrero 6). *Fraude y cumplimiento. Inteligencia artificial en la auditoria de procesos administrativos: ¿cómo mejora este proceso?* <https://www.concur.co/blog/article/inteligencia-artificial-en-la-auditoria-de-procesos-administrativos-como-mejora-este>

- Scientific Papers. (2024, mayo 14). *Best scientific databases in 2024*. <https://spapers.eu/en/blog/best-scientific-databases-in-2024>
- Scopus (2024). *Scopus: comprehensive, multidisciplinary, trusted abstract and citation database*. <https://www.elsevier.com/products/scopus>
- Sondalini, M. (2015). Structure your maintenance audit so that it uncovers both your maintenance problems and your new maintenance improvement opportunities. *Lifetime Reliability*. <http://www.lifetime-reliability.com/cms/tutorials/maintenance-management/content-and-structure-of-maintenance-audit/>
- Stamboliska, Z., Rusiński, E., y Moczko, P. (2015). Maintenance management and applied strategies. En E. Rusiński y D. Pietrusiak (eds.), *Advanced mechanics and biomechanics: selected papers from the 4th International Conference* (pp. 15-27). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-10494-2_2
- Sullivan, G. P., Pugh, R., Melendez, A. P., y Hunt, W. D. (2002). *Operations & maintenance best practices. A guide to achieving operational efficiency*. Pacific Northwest National Laboratory. https://www.pnnl.gov/main/publications/external/technical_reports/PNNL-13890.pdf
- Tavares, L. (2003). *Auditorías de mantenimiento*. Ponencia presentada en el Primer Congreso Mexicano de Confiabilidad y Mantenimiento, México. <https://www.mantenimientoplanificado.com/gerardo%20trujillo%20noria/lourival%20AUDITORIA%20MANTENIMIENTO.pdf>
- Turner, C. J., Emmanouilidis, C., Tomiyama, T., Tiwari, A., y Roy, R. (2019). Intelligent decision support for maintenance: an overview and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 32(10), 936-959. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2019.1667033>
- Vahos, J. D., Pino, A. A., y Castro Maldonado, J. J. (2019). Desarrollo de una herramienta de software para la gestión del mantenimiento de infraestructura en el SENA, regional Antioquia. *Revista CINTEX*, 24(1), 13-19. <https://doi.org/10.33131/24222208.331>
- Vega, E. (2023, septiembre 21). ¿Qué son las limitaciones de la investigación? *Medium*. <https://medium.com/@envervega/qu%C3%A9-son-las-limitaciones-de-la-investigaci%C3%B3n-c0c9307177b9>
- Viveros Gunckel, P., Kristjanpoller Rodríguez, F., Parra Márquez, C., Crespo Márquez, A., y González-Prida Díaz, V. (2020). Modelos de auditoría para la gestión de activos, mantenimiento y procesos de confiabilidad. Caso de estudio: sector de transmisión de electricidad. *DYNA Management*, 8(1). <https://doi.org/10.6036/MN9826>

- Viveros, P., Stegmaier, R., Kristjanpoller, F., Barbera, L., y Crespo, A. (2013). Propuesta de un modelo de gestión de mantenimiento y sus principales herramientas de apoyo. *Ingeniare: Revista Chilena de Ingeniería*, 21(1), 125-138. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000100011>
- Yalçın, N. (2023). A review of published works on auditing history. *Journal of Business Research-Turk*, 15(2), 834-847. <https://doi.org/10.20491/isarder.2023.1621>



Modelos de inteligencia artificial en minería de datos educativos para predecir la deserción en Educación Superior: una revisión integral

Artificial Intelligence Models in Educational Data Mining for Predicting Dropout in Higher Education: A Comprehensive Review

José Leonardo Pérez Niño ¹, Oscar Eduardo Gualdrón Guerrero ² y Diego José Barrera Oliveros ³

Fecha de Recepción: 15 de agosto de 2024

Fecha de Aceptación: 15 de diciembre de 2024

Cómo citar: Pérez-Niño, J., Gualdrón-Guerrero, O., y Barrera-Oliveros, D. (2024). Modelos de inteligencia artificial en minería de datos educativos para predecir la deserción en educación superior: una revisión integral. *Tecnura*, 28(82), 134-155. <https://doi.org/10.14483/22487638.23670>

Resumen


Contexto: la deserción estudiantil en educación superior afecta la calidad y permanencia educativa. La inteligencia artificial (IA) emerge como herramienta clave para predecir y prevenir este fenómeno, a través de modelos aplicados en minería de datos educativos.


Objetivo: analizar modelos de IA utilizados para predecir la deserción en educación superior, identificar variables frecuentes y evaluar la precisión y exactitud de los algoritmos aplicados.


Metodología: se realizó una revisión integral de literatura científica, centrada en estudios recientes que aplican IA en entornos educativos. Se compararon modelos según su rendimiento y frecuencia de uso, así como las variables más empleadas en los procesos predictivos.

Resultados: los modelos más destacados por su rendimiento fueron bosques aleatorios, redes neuronales artificiales y redes profundas. Las variables académicas, demográficas y socioeconómicas fueron las más significativas en los modelos predictivos.

Conclusiones: la IA permite anticipar riesgos de deserción con alta eficacia. Su aplicación depende de factores técnicos y contextuales. Se recomienda profundizar en nuevas variables y combinar enfoques tradicionales con aprendizaje profundo para mejorar la capacidad predictiva.

¹Ingeniero Mecatrónico, Magister en controles industriales (c), Facultad de Ingenierías y arquitectura, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.  Correo electrónico: jose.perez5@unipamplona.edu.co

²Ingeniero Electrónico, PhD en Ingeniería Electrónica. Profesor titular, Facultad de Ingenierías y arquitectura, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.  Correo electrónico: oscar.gualdron@unipamplona.edu.co

³Ingeniero Mecatrónico, Mg en controles Industriales. Doctor en automática (c). Profesor de tiempo completo, Facultad de Ingenierías y arquitectura, Universidad de Pamplona, Pamplona, Colombia.  Correo electrónico: diego.barrera@unipamplona.edu.co

Financiamiento: Este estudio hace parte de un proyecto de investigación aprobado por la Universidad de Pamplona, con financiación de recursos propios y apoyo institucional.

Palabras clave: Deserción estudiantil, algoritmos de aprendizaje automático, modelos predictivos, inteligencia artificial

Abstract

Context: Student dropout in higher education affects both educational quality and student retention. Artificial intelligence (AI) emerges as a key tool to predict and prevent this phenomenon through models applied in educational data mining.

Objective: To analyze AI models used to predict dropout in higher education, identify frequently used variables, and evaluate the precision and accuracy of the applied algorithms.

Methodology: A comprehensive review of scientific literature was conducted, focusing on recent studies that apply AI in educational settings. Models were compared based on their performance and frequency of use, as well as the most commonly employed variables in predictive processes.

Results: The models that stood out for their performance were Random Forests (RF), Artificial Neural Networks (ANN), and Deep Neural Networks (DNN). Academic, demographic, and socioeconomic variables proved to be the most significant in predictive models.

Conclusions: AI enables the anticipation of dropout risks with high effectiveness. Its application depends on technical and contextual factors. It is recommended to explore new variables and combine traditional approaches with deep learning to enhance predictive capacity.

Funding: This study is part of a research project approved by the University of Pamplona, funded through personal resources and institutional support.

Keywords: Student dropout, machine learning algorithms, predictive models, artificial intelligence.

Introducción

La deserción estudiantil en educación superior representa un desafío global con impactos significativos en el desarrollo académico, económico y social. Diferentes estudios han identificado múltiples factores que inciden en la permanencia de los estudiantes, tales como el rendimiento académico, las condiciones socioeconómicas y la motivación personal. En este contexto, la aplicación de técnicas de IA ha surgido como una alternativa eficiente para predecir y mitigar este fenómeno.

En este artículo se presenta una revisión integral sobre la implementación de modelos de IA en la predicción del riesgo de deserción estudiantil. Se analizan diversas metodologías utilizadas en estudios recientes, destacando los enfoques de aprendizaje automático más efectivos. Asimismo, se examinan las variables más influyentes en la predicción, los desafíos técnicos en la implementación de estos modelos y recomendaciones para próximos trabajos.

Predicción de la deserción estudiantil

Los sistemas de alerta temprana, diseñados con modelos de aprendizaje automático (MAA) para identificar a los estudiantes en riesgo de deserción, pueden mejorar los mecanismos de focalización y conducir a intervenciones de política social eficientes en la educación (Colak Oz *et al.*, 2023), en donde el uso de la IA ofrece una educación personalizada, según las características de cada estudiante (González Castro *et al.*, 2019).

Se plantea que una de las principales causas que llevan a la deserción es el rendimiento académico de los estudiantes, el cual se reconoce como uno de los principales problemas que enfrentan las instituciones de Educación Superior, debido a la alta tasa de fracaso en algunas materias (Hoyos y Caicedo Castro, 2024). Por esta razón, es objeto de investigación en un gran número de los artículos revisados, cuyos objetivos consisten en predecir el rendimiento académico, mejorar las calificaciones a futuro y disminuir los índices de deserción.

Deserción estudiantil

La deserción es quizás uno de los fenómenos que más está afectando los sistemas de educación (Díaz, 2009). Se asume la deserción como el estado de un estudiante que, de manera voluntaria o forzosa, no registra matrícula por dos o más periodos académicos consecutivos del programa en el que se matriculó; y no se encuentra como graduado, o se ha retirado por motivos disciplinarios (Gutiérrez *et al.*, 2021). En 2017, tras un boletín del Observatorio de Educación Superior de Medellín (2017) se ratificó que en Latinoamérica la deserción está entre el 40 % y el 75 %.

En Colombia, el encargado de estimar la deserción universitaria es el Sistema para la Prevención de la Deserción de la Educación Superior (SPADIES) (Ministerio de Educación Nacional [MEN], 2025), el cual en 2024 detalló en su informe que para el último periodo de estudio 2024-2, se registró una tasa de deserción de 12,3 %. En 2014, la Universidad de los Andes detalló que los motivos por los cuales los estudiantes desertaban eran principalmente socioeconómicos, académicos e institucionales (tabla 1).

Sin embargo, tras un estudio se concluyó que los factores más comunes y ampliamente utilizados para predecir el rendimiento de los estudiantes en la Educación Superior son sus calificaciones previas y su rendimiento en clase, su actividad de e-learning, su demografía y su información social (Abu Saa *et al.*, 2019).

Tabla 1. Motivos de deserción

Individuales	Socioeconómicos	Académicos	Institucionales
- Edad, género y estado civil	- Estrato social	- Orientación profesional	- Normatividad académica
- Calamidad y/o problema doméstico	- Situación laboral del estudiante	- Tipo de colegio de secundaria	- Becas y formas de financiamiento
- Integración social	- Situación laboral de los padres	- Rendimiento académico superior	- Recursos universitarios
- Expectativas no satisfechas	- Dependencia económica	- Métodos de estudio	- Relaciones con el profesorado y con demás estudiantes
- Incompatibilidad horaria con actividades extraacadémicas	- Personas a cargo	- Calificación en el examen de admisión	- Grado de compromiso con la institución educativa
	- Nivel educativo de los padres	- Insatisfacción con el programa académico	- Calidad del programa
	- Entorno familiar	- Carga académica (número de materias al semestre)	
	- Entorno macroeconómico del país	- Repitencia	

Fuente: [Universidad de los Andes, Facultad de Economía, CEDE \(2014\)](#)

Minería de datos educativos

La minería de datos educativos (MDE) es el proceso de extraer información útil y patrones de una gran base de datos educativa ([Mengash, 2020](#)). Su objetivo es identificar los entornos que favorecen el aprendizaje para mejorar los resultados y obtener información sobre los fenómenos educativos ([Guo et al., 2015](#)); todos estos datos pueden usarse para predecir la probabilidad de deserción, el rendimiento de los estudiantes e, inclusive, la admisión en las universidades.

Predecir el comportamiento y los resultados de aprendizaje del alumnado se considera una de las tareas más importantes del campo de MDE. El interés principal se centra en tres tipos de problemas predictivos (Tsiakmaki *et al.*, 2019):

- Predecir si los estudiantes aprobarán o no un curso.
- Identificar a los estudiantes que tienen mayor riesgo de abandonar un curso, un problema crucial en el aprendizaje a distancia.
- Estimar las calificaciones de los estudiantes en pruebas, exámenes o cursos específicos.

Esto puede dar como resultado que disminuyan los índices de deserción, mejorar rendimiento académico de los estudiantes y mejorar la toma de decisiones en las diferentes instituciones de educación para avanzar con el proceso de admisión de sus aspirantes.

Metodología

Este estudio se enmarca en una investigación de tipo documental y aplicada, ya que se fundamenta en el análisis de literatura científica y tiene como propósito identificar herramientas predictivas que puedan ser utilizadas por instituciones de educación superior para mitigar la deserción estudiantil. El enfoque metodológico corresponde a una revisión integral de literatura científica, centrada en estudios publicados entre 2015 y 2024, priorizando aquellas que presentan métricas de precisión y exactitud en la predicción de la deserción estudiantil. La selección de fuentes se basó en criterios de relevancia, impacto académico y aplicabilidad de los modelos. Asimismo, se identificaron las variables más utilizadas, los algoritmos más frecuentes y los marcos normativos asociados, con el fin de establecer un estado del arte riguroso y actualizado.

A continuación, se analizan las diferentes investigaciones relevantes realizadas en los últimos años sobre la minería de datos educativos, identificando la precisión y exactitud de los modelos con mayor frecuencia de aparición en los trabajos de investigación consultados, y de esta manera lograr identificar el modelo que tiene mejores resultados y mayores citaciones.

Dentro de los artículos se evalúa la precisión y exactitud que tienen los modelos, las cuales se utiliza con el fin de conocer las predicciones realizadas de manera correcta, son medidas de probabilidad de que un documento clasificado o predicho en la clase que corresponda realmente sea esa (Paniagua Medina *et al.*, 2023), con la distinción que la precisión es el grado de concordancia entre los resultados de mediciones repetidas de un mismo objeto y la exactitud hace referencia al grado de concordancia entre una medición y el valor real de una cantidad medida.

Árbol de decisión (AD)

Un árbol de decisión se estructura a partir de un nodo raíz, que se extiende a través de nodos intermedios, conocidos como nodos hoja, hasta llegar a un nodo final (Khan *et al.*, 2019). Esta técnica se emplea para identificar patrones y reglas, dividiendo y segmentando de manera sistemática la información contenida en la base de datos (Agudelo, 2023).

Tabla 2. Precisión y exactitud AD

Autor y referencia	Precisión (%)	Exactitud (%)
Avila Pérez	58.3	58.33
Ramírez P.	87.27	-
Melo A.	88.89	86.81
Vives L.	100	100
Mendes R.	96.2	85.6
Khairy D.	98.7	99.0
Khan I.	-	88.0
Kostopoulos G.	-	85.19
Caicedo-Castro	66.54	66.54
Abideen Zain	94	97
Nasa P.	98.24	95.78
Haron N.	95.8	95.50
Agudelo O.	97.63	93.81
Li X.	80	95

Fuente: elaboración propia

Bosques aleatorios (BA)

Están compuestos por múltiples árboles de decisión generados de manera aleatoria. Se caracterizan por su alta precisión, no requieren escalado ni codificación de variables categóricas y requieren un ajuste mínimo de parámetros (Abideen *et al.*, 2023).

Tabla 3. Precisión y exactitud BA

Autor y referencia	Precisión %	Exactitud %
Mendes	97,6	88.9
Vives L.	100	100
Nasa P.	98.25	97.73
Caicedo-Castro	71.67	73.91

Abideen Zain	95	93
Agudelo O.	93.86	93.0
Khairy D.	98.7	99.0
Li X.	97	98
Hien	-	83.21

Fuente: elaboración propia

Clasificador bayesiano ingenuo (BI)

Los métodos del Clasificador bayesiano ingenuo o Naive Bayes son un conjunto de algoritmos de aprendizaje supervisado que se basan en la aplicación del teorema de Bayes con la suposición "Naive" de independencia condicional entre cada par de características dado el valor de la variable de clase ([Paniagua Medina et al., 2023](#)).

Tabla 4. Precisión y exactitud BI

Autor y referencia	Precisión (%)	Exactitud (%)
Ávila	57.0	57.83
Guo B.	-	20.7
Khan I.	-	84.0
Abideen Zain	49	63
Haron N.	-	94.38
Khairy D.	94.0	94.0

Fuente: elaboración propia

Red neuronal profunda (RNP)

Las redes neuronales son modelos utilizados para clasificación, regresión y agrupamiento, diseñados a partir de la inspiración en el funcionamiento del cerebro humano. Sus nodos están interconectados, permitiendo el intercambio de información de manera similar a cómo las neuronas biológicas se comunican mediante dendritas y axones ([Aslam et al., 2021](#)).

La RNP destaca por su capacidad para modelar relaciones no lineales complejas mediante la incorporación de múltiples capas ocultas. Su propósito es permitir que la red aprenda automáticamente características relevantes para tareas de clasificación o regresión ([Li et al., 2024](#)). Las redes neuronales profundas pueden modelar mejor el comportamiento de los estudiantes y obtienen un buen rendimiento de predicción en comparación con los algoritmos de aprendizaje automático tradicionales.

Tabla 5. Precisión y exactitud RNP

Autor y referencia	Precisión (%)	Exactitud (%)
Vives L.	96.8	97.7
Aslam	94.9	93
Hussain	96	95.34
Li X.	94	94
Liu T.	90.6	92.5
Yang & Bai	90.7	86.6
Guo B.	77.2	77.2

Fuente: elaboración propia

Red neuronal convolucional (RNC)

Son ampliamente empleadas en tareas de predicción, ya que ofrecen diversas configuraciones que deben ajustarse y optimizarse para lograr un rendimiento preciso. Factores como la función de activación, la cantidad de capas, el número de neuronas por capa y la elección de hiperparámetros juegan un papel crucial en la eficacia del modelo ([Akour et al., 2020](#)).

La RNC procesa imágenes mediante convoluciones, permitiendo calcular respuestas basadas en la relación entre píxeles cercanos y utilizando como entrada una imagen representada en una matriz. Por su potencial en el análisis de datos visuales, RNC es un modelo óptimo para predecir el rendimiento académico de los estudiantes, categorizándolos en aprobado o reprobado ([Poudyal et al., 2022](#)). Este enfoque representa una innovación en la MDE debido a la forma en que se implementan las arquitecturas RNC en el análisis.

Tabla 6. Precisión y exactitud RNC

Autor y referencia	Precisión (%)	Exactitud (%)
Akour	95.6	95.5
Kavipriya	91.25	92.41
Poudyal	-	88

Fuente: elaboración propia

Redes de memoria a corto plazo (RMCP)

Estas procesan y almacenan información de entrada mediante tres unidades de compuerta, permitiendo que el modelo retenga únicamente los datos más relevantes y, de este modo,

optimice el uso de la memoria. Gracias a esta capacidad, RMCP es eficaz en la resolución de problemas de dependencia a largo plazo. Además, su aplicación es útil para identificar patrones temporales en series de datos no lineales ([Chen et al., 2023](#)).

Tabla 7. Precisión y exactitud RNC-RMCP

Autor y referencia	Precisión (%)	Exactitud (%)
Vives L.	97	97.7
Aljohani	93.46	95.23
Xie	92.07	89.12
Hien	-	86.26
Chen	84	85

Fuente: elaboración propia

K vecinos más cercanos (K-VMC)

El método de clasificación es una de las técnicas más utilizadas en el aprendizaje automático. Su principio fundamental es clasificar nuevos datos identificando las instancias más similares dentro del conjunto de entrenamiento y basando la predicción en sus etiquetas. Debido a su simplicidad y facilidad de implementación, *k*-VMC ha sido ampliamente aplicado en diversos ámbitos, como sistemas de recomendación, búsqueda semántica e identificación de anomalías ([Abideen et al., 2023](#)).

Tabla 8. Precisión y exactitud k-VMC

Autor y referencia	Precisión (%)	Exactitud (%)
Vives L.	97	98.1
Abideen Zain	80	84
Haron N.	-	88.76
Khairy D.	90.0	89.6

Fuente: elaboración propia

Regresión logística (RL)

Emplea una función logística para modelar la relación entre una combinación lineal de las variables de entrada y sus respectivos pesos. El modelo ajusta un clasificador optimizando la función objetivo, basada en la verosimilitud logarítmica de los datos de entrenamiento, predice un resultado binario ([Caicedo Castro, 2023](#)).

Tabla 9. Precisión y exactitud de RL

Autor y referencia	Precisión (%)	Exactitud (%)
Vives L.	99.6	99.3
Caicedo-Castro	84.16	75.73
Mendes	96.7	89.1
Li X.	43	38
Xie	81.06	88.47

Fuente: elaboración propia

Redes neuronales artificiales (RNA)

Se compone de tres capas principales: la capa de entrada, la capa oculta y la capa de salida. Para su diseño, es fundamental considerar tres aspectos clave: la cantidad de capas ocultas, el número de neuronas en cada una y la función de activación utilizada en las neuronas ([Rabelo y Zárate, 2024](#)).

Tabla 10. Precisión y exactitud de RNA

Autor y referencia	Precisión (%)	Exactitud (%)
Khairy D.	96.0	96.4
Mendes	97.1	87.2
Xie	94.67	94.61

Fuente: elaboración propia

Máquinas de soporte vectorial (MSV)

Es un MAA supervisado que utiliza algoritmos de clasificación para abordar problemas de categorización binaria. Este enfoque es especialmente eficaz para trabajar con datos dispersos, destacándose por su simplicidad y fiabilidad en la clasificación ([Abideen et al., 2023](#)).

Tabla 11. Precisión y exactitud de MSV

Autor y referencia	Precisión (%)	Exactitud (%)
Burgos C.	36.73	62.50
Guo	-	48.4
Caicedo-Castro	85.17	77.64

Abideen Zain	84	59
Nasa P.	91.83	90.97

Fuente: elaboración propia

Resultados

A manera de resumen, a continuación, se incluye el promedio de todas las tablas previas, demostrando que los BA tienen buenos resultados en la relación de precisión, exactitud y frecuencia de aparición. Por su parte las RNA tienen los mejores resultados en cuanto precisión y exactitud, sin embargo, son pocos citados en los trabajos consultados. Cabe destacar que el AD fue el modelo con mayores citaciones, sin embargo, sus resultados de precisión y promedio no son los mejores.

Tabla 12. Precisión promedio de todos los modelos

Modelo	Precisión Promedio (%)	Exactitud Promedio (%)	Frecuencia de aparición
Árbol de decisión	88.46	88.2 %	14
Bosques Aleatorios	94.01	91.86	9
Red neuronal profunda	91.46	90.90	7
Clasificador bayesiano ingenuo	66.67	68.99	6
Redes de memoria a corto plazo	91.63	90.662	5
Regresión logística	80.904	78.12	5
Máquinas de soporte vectorial	74.43	67.702	5
K Vecinos más cercanos	89	90.115	4
Red neuronal convolucional	93.43	91.97	3

Redes neuronales artificiales	95.92	92.73	3
-------------------------------	-------	-------	---

Fuente: elaboración propia

Identificación de variables

Dentro de los trabajos de investigación consultados, gran parte de las razones por las cuales los modelos obtienen buenos resultados se debe a la calidad de las variables que se utilizan, por ello es imperativo que el presente artículo tenga como riqueza añadida la presentación de la figura 1, en la cual se exponen las variables con mayores frecuencias de aparición, además de dar claridad de los autores que abordan su problema de investigación con cada variable en particular.

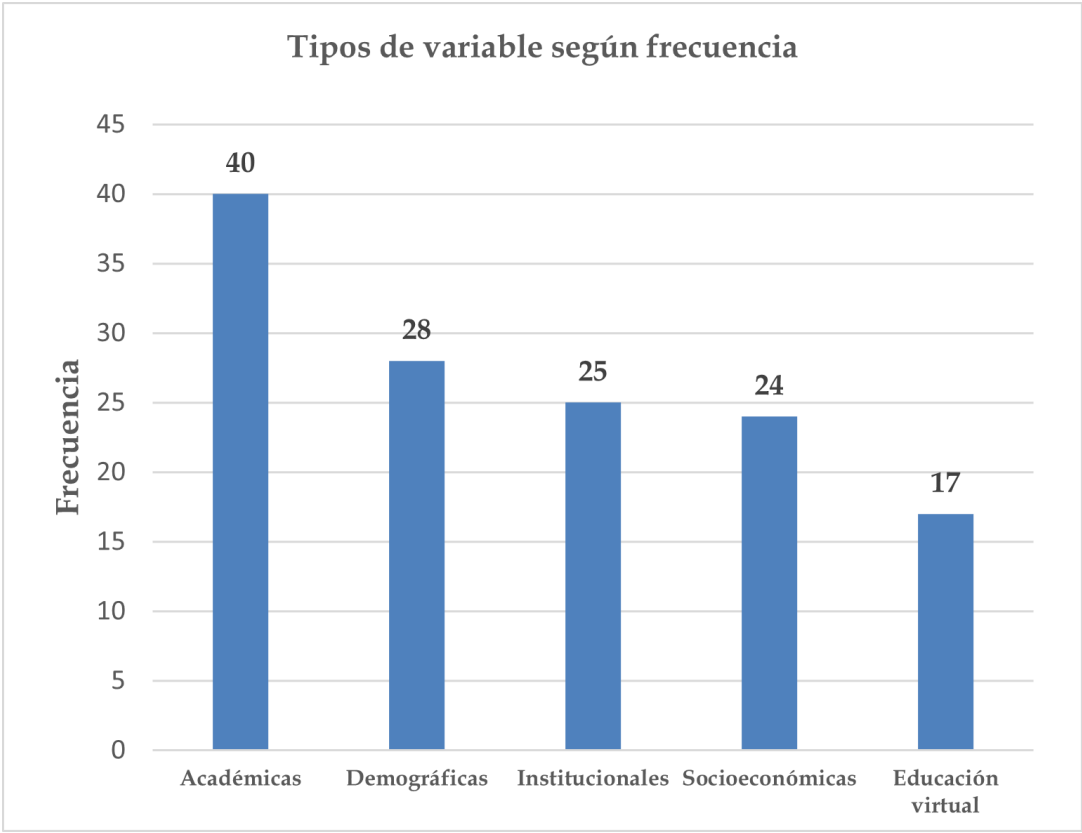


Figura 1. Tipos de variable según frecuencia de aparición en los artículos

Localización del área de estudio

Las variables con mayores citaciones son las académicas, dentro de ellas encontramos 28 autores que toman en cuenta el historial académico del estudiante y las calificaciones que tienen al momento del estudio para entrenar el modelo; algunos de ellos son los trabajos de [Guo et al. \(2015\)](#); [Khan et al. \(2019\)](#); [Agudelo \(2023\)](#); [Aslam et al. \(2021\)](#).

Por otra parte, algunos autores mencionan la importancia de reconocer el promedio académico en la Educación Media como variable predictiva, en paralelo, en Colombia, las Pruebas Saber 11 adelantadas por el Instituto Colombiano para la Evaluación de la Educación (Icfes), constituye un elemento de análisis ([Hoyos y Caicedo Castro, 2024](#); [Guo et al., 2015](#); [Khan et al., 2019](#); [Agudelo, 2023](#); [Caicedo Castro, 2023](#); [Ramírez Gualdrón, 2018](#); [Haron et al., 2024](#); [Hien et al., 2020](#); [Iqbal et al., 2019](#); [Roslan et al., 2024](#)).

En algunos estudios existen patrones asociados al buen o mal desempeño académico de los estudiantes, con respecto al puntaje global obtenido en las competencias genéricas del Examen Saber Pro ([Timarán Buchely y Timarán Pereira, 2023](#)).

Por último, en el apartado de variables académicas, [Agudelo \(2023\)](#) y [Ávila Pérez \(2021\)](#) analizan el número de asignaturas reprobadas del estudiante para saber si desertará o no.

Variables demográficas

Las más consultadas son edad y género, y son objeto de estudio por los siguientes autores: [Aljohani et al. \(2019\)](#); [Akour et al. \(2020\)](#); [Aslam et al. \(2021\)](#); [Guo et al. \(2015\)](#); [Hoyos y Caicedo Castro \(2024\)](#); [Paniagua et al. \(2019\)](#); [Poudyal et al. \(2022\)](#); [Roslan et al. \(2024\)](#); [Xie \(2021\)](#); [Zhang et al. \(2010\)](#).

Por su parte, el lugar de procedencia del estudiante, así como la vivienda en la que reside, se contempla por seis estudios como un elemento importante para el entrenamiento del modelo: [Aljohani et al. \(2019\)](#); [Aslam et al. \(2021\)](#); [Hoyos y Caicedo Castro \(2024\)](#); [Roslan et al. \(2024\)](#); [Xie \(2021\)](#); [Zhang et al. \(2010\)](#).

Factores institucionales y personales

La asistencia del estudiante a clases es analizada en seis documentos, en los cuales se recalca la importancia de este factor en la permanencia estudiantil: [Agudelo \(2023\)](#); [Akour et al. \(2020\)](#); [Albreiki et al. \(2021\)](#); [Ali Khan et al. \(2024\)](#); [Kostopoulos et al. \(2019\)](#); [Rabelo y Zárate \(2024\)](#).

En otros trabajos se menciona que los estudiantes con mayor participación en actividades académicas, ya sean extracurriculares, de liderazgo, entre otros, tienen mayores posibilidades de no desertar ([Agudelo, 2023](#); [Akour et al., 2020](#); [Albreiki et al., 2021](#); [Aslam et al., 2021](#); [Haron et al., 2024](#); [Hoyos y Caicedo Castro, 2024](#); [Nurhana Roslan et al., 2024](#)).

[Agudelo \(2023\)](#); [Akour et al. \(2020\)](#), y [Rabelo y Zárate \(2024\)](#) mencionan que la satisfacción de los estudiantes con su proceso académico en la universidad en la que están matriculados tiene relevancia en el estudio. Para [Ávila Pérez \(2021\)](#); [Haron et al. \(2024\)](#); [Hien et al. \(2020\)](#), y [Mariano et al. \(2022\)](#), las relaciones interpersonales entre el estudiante y los docentes o los compañeros de clases tienden a ser una causa de deserción.

Finalmente, [Guo et al. \(2015\)](#) y [Haron et al. \(2024\)](#) abordan la motivación y la personalidad del estudiante como dos características importantes en el análisis del estudio y posterior creación del modelo.

Variables socioeconómicas

Son importantes para la predicción de la deserción. En nueve documentos se afirma que la situación económica del estudiante es trascendental para reconocer si este continuará con sus estudios: [Hoyos y Caicedo Castro \(2024\)](#); [Agudelo \(2023\)](#); [Alalawi et al. \(2023\)](#); [Albreiki et al. \(2021\)](#); [Aslam et al. \(2021\)](#); [Ávila Pérez \(2021\)](#); [Rabelo y Zárate \(2024\)](#); [Ramírez y Grandón \(2018\)](#), y [Roslan et al. \(2024\)](#).

También se menciona que el estado familiar y el nivel educativo de los padres influyen en la predicción, por ello, los siguientes autores lo incluyen en su investigación: [Akour et al. \(2020\)](#), [Alalawi et al. \(2023\)](#), [Ávila Pérez \(2021\)](#), [Guo et al. \(2015\)](#), [Hoyos y Caicedo Castro \(2024\)](#), [Kavipriya y Sengaliappan \(2021\)](#), [Ramírez y Grandón \(2018\)](#), [Rabelo y Zárate \(2024\)](#), [Zhang et al. \(2010\)](#). Por último, según [Agudelo \(2023\)](#), [Rabelo y Zárate \(2024\)](#), y [Roslan et al. \(2024\)](#), se deben tener en cuenta las becas recibidas por el estudiante para este pronóstico.

Comportamiento en educación virtual

En muchos estudios se analizan específicamente los cursos masivos abiertos en línea (CMAL). Para la permanencia en estos se consideran diferentes variables que permiten evaluar la usabilidad de un software a través de test con usuarios, en los cuales se monitoriza y observa el comportamiento de un grupo de usuarios, mientras estos desarrollan una serie de tareas en un espacio controlado ([Chanchí Golondrino et al., 2024](#)), como el tiempo de conexión o número de clics, variables que son abordadas en los siguientes documentos: [Alalawi et al. \(2023\)](#); [Aljohani et al. \(2019\)](#); [Alnasyan et al. \(2024\)](#); [Chen \(2022\)](#); [Kostopoulos et al. \(2019\)](#); [Li et al. \(2022\)](#); [Liu et](#)

al. (2022); Poudyal et al. (2022), y Xie (2021).

También es importante mencionar que la participación en foros, las bases de datos consultadas por el estudiante y la participación general en los procesos en línea son tema de estudio por ocho escritos: *Akour et al. (2020); Alnasyan et al. (2024); Hoyos y Caicedo Castro (2024); Li et al. (2022); Liu et al. (2022), y Zhang et al. (2010).*

Otras variables

Teniendo en cuenta otras características como el factor innovador, es pertinente mencionar las siguientes variables:

- Escuela de procedencia (*Ramírez y Grandón, 2018*): se trata del lugar en donde el estudiante se graduó de Educación Media.
- Número de créditos matriculados (*Poudyal et al., 2022*): hace referencia a la carga académica por semestre.
- Programa al que está inscrito el estudiante (*Agudelo, 2023*): el artículo menciona que los diferentes programas tienen diferentes tipos de dificultad y ello afecta las probabilidades de deserción del estudiante.
- Estado civil (*Agudelo, 2023*).
- Discapacidad (*Haron et al., 2024*): se expresa el tipo de discapacidad del estudiante.
- Primera opción (*Agudelo, 2023*): en el artículo se pregunta si el programa que el estudiante está estudiando fue elegido como primera opción al matricularse a la universidad.
- Estado de salud (*Aslam et al., 2021*).
- Tiempo en iniciar la vida universitaria (*Hien et al., 2020*): cuánto tiempo tardó en ingresar a la Educación Superior desde que se graduó de la Educación Media.
- Habilidades blandas de cada estudiante (*Kavipriya y Sengaliappan, 2021*).

Futuras recomendaciones

Dentro de la revisión integral se plantean nuevos modelos alternativos con buenos resultados, como el uso del aprendizaje profundo con las redes neuronales artificiales, profundas y convolucionales. El uso de modelos que históricamente han sido utilizados para procesamiento de imágenes o audios han sido de utilidad para los procesos de predicción de la deserción generando nuevos enfoques en estos modelos, por lo cual se recomienda seguir indagando en

estos procesos de inteligencia artificial que pueden desarrollar cada vez procesos más eficientes e innovadores.

También se recomienda indagar un poco más en nuevas variables que sean determinantes dentro del proceso de predicción, profundizar y utilizar las otras características explícitas dentro del presente artículo; como evaluar las habilidades blandas, si la carrera elegida responde al deseo vocacional de la persona, entre otros, generando una recolección de datos más robusta y eficaz, tal cual lo expresa [L. F. Vargas Tamayo et al \(2013\)](#) donde se plantea construir una solución efectiva al problema de la información académica estudiantil ya que en el momento en que se implante y aplique una recolección de datos eficiente, se logrará hacer seguimiento y mejoras posteriores.

Conclusiones

El presente estudio ha evidenciado la relevancia de la inteligencia artificial en la predicción del riesgo de deserción estudiantil, destacando cómo distintas técnicas de aprendizaje automático han sido aplicadas con diversos niveles de éxito. A partir del análisis de los modelos presentados, se puede concluir que no existe un enfoque único y universalmente óptimo, sino que la efectividad de cada método depende de su precisión, exactitud y su aplicabilidad en diferentes contextos educativos.

Los BA emergen como una de las técnicas más equilibradas, con una precisión promedio del 94.01 % y una exactitud del 91.86 %, lo que indica su capacidad para ofrecer predicciones confiables y generalizables. Su alta precisión, combinada con su frecuencia de aparición en los estudios revisados (9 menciones), sugiere que es un modelo preferido para la identificación del riesgo de deserción debido a su estabilidad y facilidad de implementación. Por otro lado, las RNA registran la mayor precisión (95.92 %) y exactitud (92.73 %), pero su menor frecuencia de uso (3 menciones) sugiere que su implementación es más compleja y menos común en la literatura revisada. Esto indica que, aunque son altamente efectivas, su demanda computacional y la necesidad de grandes volúmenes de datos de entrenamiento pueden limitar su aplicabilidad en entornos donde los recursos sean limitados. Las RNP y las RMCP también han demostrado ser enfoques prometedores, con precisiones del 91.46 % y 91.63 %, respectivamente, lo que confirma el potencial del aprendizaje profundo en este ámbito. Sin embargo, su implementación sigue siendo menos frecuente en comparación con modelos más tradicionales como los AD, los cuales, a pesar de ser los más citados en la literatura (14 menciones), presentan un desempeño inferior con una precisión promedio del 88.46 %. Esto sugiere que su popularidad se debe más a su facilidad de interpretación que a su desempeño en la tarea de predicción.

El análisis de las variables utilizadas en los modelos muestra que las calificaciones e historial académico son los predictores más utilizados (28 menciones), seguidos por las características demográficas (20 menciones) y el estado familiar (12 menciones). Esto confirma que el rendimiento académico sigue siendo el factor más determinante en la deserción, aunque variables socioeconómicas y motivacionales podrían aportar valor si se integraran más en los modelos predictivos.

A pesar de estos avances, la implementación de estas técnicas aún enfrenta desafíos, como la necesidad de mejorar la calidad y diversidad de los datos, la interpretabilidad de los modelos más complejos, la adaptación de los algoritmos a diferentes contextos educativos y las voluntades de cada institución de educación superior a implementarlas dentro de sus procesos. Futuras investigaciones deberían centrarse en combinar enfoques tradicionales con técnicas de aprendizaje profundo, así como en la incorporación de variables menos exploradas, como la motivación y el comportamiento en entornos virtuales, para mejorar la capacidad predictiva de los modelos.

En conclusión, la inteligencia artificial ofrece soluciones innovadoras y altamente efectivas para la predicción de la deserción estudiantil, tal como se expresa en ([Llanos Mosquera et al., 2021](#)) la implementación de la inteligencia artificial se ha convertido en una prioridad para la educación virtual, potenciando la forma de entender y comprender las necesidades específicas del estudiante., pero su implementación debe considerar factores técnicos, computacionales, de voluntades y éticos. La combinación de modelos robustos, el uso de datos más representativos y el desarrollo de estrategias adaptadas a cada contexto educativo permitirán avanzar hacia sistemas de predicción más precisos y aplicables, promoviendo la permanencia y éxito de los estudiantes en la educación superior.

Financiamiento

Este trabajo es resultado del proyecto de investigación de maestría titulado “Algoritmo basado en inteligencia artificial para la predicción del riesgo en la deserción estudiantil de la Universidad de Pamplona”, avalado por el programa de Maestría en Controles Industriales y por la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad de Pamplona, en el marco del proceso de trabajo de grado.

Agradecimientos

Agradecemos a la Universidad de Pamplona por el respaldo institucional brindado para el desarrollo de esta investigación. Reconocemos la diligencia, compromiso y disposición de los

miembros de su comunidad académica, cuyo apoyo fue fundamental en las distintas etapas del trabajo. Su colaboración, tanto en el acceso a recursos como en el acompañamiento técnico y académico, fue clave para la consolidación de este estudio.

Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento a la revista *Tecnura* de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas por fomentar el ejercicio de la difusión del conocimiento científico, contribuyendo al fortalecimiento de la investigación en el ámbito académico nacional e internacional.

Referencias

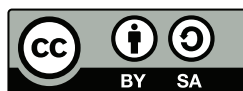
- Abideen, Z. U., Mazhar, T., Razzaq, A., Haq, I., Ullah, I., Alasmay, H., y Mohamed, H. G. (2023). Analysis of enrollment criteria in secondary schools using machine learning and data mining approach. *Electronics (Switzerland)*, 12(3), 694. <https://doi.org/10.3390/electronics12030694>
- Abu Saa, A., Al-Emran, M., y Shaalan, K. (2019). Factors affecting students' performance in higher education: a systematic review of predictive data mining techniques. *Technology, Knowledge and Learning*, 24(4), 567-598. <https://doi.org/10.1007/s10758-019-09408-7>
- Agudelo, O. (2023). *Identificación de deserción temprana en la Universidad de Manizales con aprendizaje automático, como parte de la estrategia de prevención* [Tesis de maestría, Universidad de Manizales]. Repositorio Institucional UM. <https://ridum.umanizales.edu.co/handle/20.500.12746/647>
- Akour, M., Sghaier, H. Al, y Al Qasem, O. (2020). The effectiveness of using deep learning algorithms in predicting students achievements. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 19(1), 388. <https://doi.org/10.11591/ijeecs.v19.i1.pp388-394>
- Alalawi, K., Athauda, R., y Chiong, R. (2023). Contextualizing the current state of research on the use of machine learning for student performance prediction: a systematic literature review. *Engineering Reports*, 5(12). <https://doi.org/10.1002/eng2.12699>
- Albreiki, B., Zaki, N., y Alashwal, H. (2021). A systematic literature review of student' performance prediction using machine learning techniques. *Education Sciences*, 11(9), 552. <https://doi.org/10.3390/educsci11090552>
- Ali Khan, M. A., Ma, H., Farhad, A., Mujeeb, A., Mirani, I. K., y Hamza, M. (2024). When LoRa meets distributed machine learning to optimize the network connectivity for green and intelligent transportation system. *Green Energy and Intelligent Transportation*, 3(3), 100204. <https://doi.org/10.1016/j.geits.2024.100204>

- Aljohani, N. R., Fayoumi, A., y Hassan, S.-U. (2019). Predicting at-risk students using clicks-tream data in the virtual learning environment. *Sustainability*, 11(24), 7238. <https://doi.org/10.3390/su11247238>
- Alnasyan, B., Basher, M., y Alassafi, M. (2024). The power of deep learning techniques for predicting student performance in virtual learning environments: a systematic literature review. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 6, 100231. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100231>
- Aslam, N. M., Khan, I. U., Alamri, L. H., y Almuslim, R. S. (2021). An improved early student's academic performance prediction using deep learning. *International Journal of Emerging Technologies in Learning (IJET)*, 16(12), 108-122. <https://doi.org/10.3991/ijet.v16i12.20699>
- Ávila Pérez, M. L. (2021). *Modelo de predicción de deserción estudiantil, apoyado en tecnologías de data mining, en un curso de primera matrícula de la escuela ECBTI de la UNAD* [Tesis de maestría, Universidad Nacional Abierta y a Distancia]. Repositorio Institucional UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/42544>
- Caicedo Castro, I. (2023). Course prophet: a system for predicting course failures with machine learning: a numerical methods case study. *Sustainability*, 15(18), 13950. <https://doi.org/10.3390/su151813950>
- Chanchí Golondrino, G. E., Ospina Alarcón, M. A., y Campo Muñoz, W. Y. (2024). Construction of a virtual usability laboratory for conducting user tests during remote attendance. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(44), 35-44. <https://doi.org/10.24054/rcta.v2i44.2713>
- Chen, G. (2022). Pinning control of complex dynamical networks. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 68(4), 336-343. <https://doi.org/10.1109/TCE.2022.3200488>
- Chen, H., Wang, Y., Li, Y., Lee, Y., Petri, A., y Cha, T. (2023). Computer science and non-computer science faculty members' perception on teaching data science via an experiential learning platform. *Education and Information Technologies*, 28(4), 4093-4108. <https://doi.org/10.1007/s10639-022-11326-8>
- Colak Oz, H., Güven, Ç., y Nápoles, G. (2023). School dropout prediction and feature importance exploration in Malawi using household panel data: machine learning approach. *Journal of Computational Social Science*, 6(1), 245-287. <https://doi.org/10.1007/s42001-022-00195-3>
- Díaz, A. (2009). Análisis sobre la deserción en la Educación Superior a distancia y virtual: el caso de la UNAD – Colombia. *Revista de Investigaciones UNAD*, 8(2), 117-149.

- González Castro, Y., Peñaranda Peñaranda, M. M., y Manzano Durán, O. (2019). Innovaciones tecnológicas en las prácticas académicas virtuales. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 1(33), 69-77. <https://doi.org/10.24054/rcta.v1i33.87>
- Guo, B., Zhang, R., Xu, G., Shi, C., y Yang, L. (2015). Predicting students performance in educational data mining. En *2015 International Symposium on Educational Technology (ISET)* (pp. 125-128). Wuhan, República Popular de China. <https://doi.org/10.1109/ISET.2015.33>
- Gutiérrez A., D., Vélez Díaz, J. F., y López M., J. (2021). Indicadores de deserción universitaria y factores asociados. *EducaT: Educación Virtual, Innovación y Tecnologías*, 2(1), 15-26. <https://doi.org/10.22490/27452115.4738>.
- Haron, N. H., Mahmood, R., Amin, N. M., Ahmad, A., y Jantan, S. R. (2024). An Artificial Intelligence Approach to Monitor and Predict Student Academic Performance. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 44(1), 105–119. <https://doi.org/10.37934/araset.44.1.105119>
- Hien, D. T. T., Thi, C., Kim, T., The, D., y Nguyen, C. (2020). Optimize the combination of categorical variable encoding and deep learning technique for the problem of prediction of vietnamese student academic performance. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(11). <https://doi.org/10.14569/IJACSA.2020.0111135>
- Hoyos, W., y Caicedo Castro, I. (2024). Tuning data mining models to predict secondary school academic performance. *Data*, 9(7), 86. <https://doi.org/10.3390/data9070086>
- Iqbal, Z., Qayyum, A., Latif, S., y Qadir, J. (2019). Early student grade prediction: an empirical study. En *2019 2nd International Conference on Advancements in Computational Sciences (ICACS)* (pp. 1-7). Lahore, Pakistán. <https://doi.org/10.23919/ICACS.2019.8689136>
- Kavipriya, T., y Sengaliappan, M. (2021). Adaptive weight deep convolutional neural network (AWDCNN) classifier for predicting student's performance in job placement process. *Annals of the Romanian Society for Cell Biology*, 25(1), 507-518.
- Khan, I., Al Sadiri, A., Ahmad, A. R., y Jabeur, N. (2019). Tracking student performance in introductory programming by means of machine learning. En *2019 4th MEC International Conference on Big Data and Smart City (ICBDSC)* (pp. 1-6). Mascate, Omán. <https://doi.org/10.1109/ICBDSC.2019.8645608>
- Kostopoulos, G., Karlos, S., y Kotsiantis, S. (2019). Multiview learning for early prognosis of academic performance: a case study. *IEEE Transactions on Learning Technologies*, 12(2), 212-224. <https://doi.org/10.1109/TLT.2019.2911581>

- L. F. Vargas Tamayo, H. R. Tocasuche González, & J. A. Trisancho Ortiz. (2013). Nuevo software para la administración y control académico de estudiantes en ingeniería industrial. *Tecnura*, 17(1), 174–189. <https://doi.org/10.14483/22487638.7247>
- Li, B., Lowell, V. L., Wang, C., y Li, X. (2024). A systematic review of the first year of publications on ChatGPT and language education: examining research on ChatGPT's use in language learning and teaching. *Computers and Education: Artificial Intelligence*, 7, 100266. <https://doi.org/10.1016/j.caeai.2024.100266>
- Liu, T., Wang, C., Chang, L., y Gu, T. (2022). Predicting High-Risk Students Using Learning Behavior. *Mathematics*, 10(14), 2483. <https://doi.org/10.3390/math10142483>
- Llanos Mosquera, J. M., Hidalgo Suarez, C. G., & Bucheli Guerrero, V. A. (2021). Una revisión sistemática sobre aula invertida y aprendizaje colaborativo apoyados en inteligencia artificial para el aprendizaje de programación. *Tecnura*, 25(69), 196–214. <https://doi.org/10.14483/22487638.16934>
- Mariano, A. M., Ferreira, A. B. de M. L., Santos, M. R., Castilho, M. L., y Bastos, A. C. F. L. C. (2022). Decision trees for predicting dropout in engineering course students in Brazil. *Procedia Computer Science*, 214, 1113–1120. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.11.285>
- Mengash, H. A. (2020). Using data mining techniques to predict student performance to support decision making in university admission systems. *IEEE Access*, 8, 55462–55470. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981905>
- Ministerio de Educación Nacional. (12 de febrero de 2025). *Estadísticas de deserción y permanencia en Educación Superior (SPADIES 3.0). Indicadores 2021*. <https://www.mineduacion.gov.co/sistemasinfo/spadies/secciones/Estadisticas-de-desercion/>
- Observatorio de Educación Superior de Medellín. (2017). *Deserción en la educación superior*. https://www.sapiencia.gov.co/wp-content/uploads/2017/11/5_JULIO_BOLETIN_ODES_DESERCION_EN_LA_EDUCACION_SUPERIOR.pdf
- Paniagua Medina, J. J., Vargas Rodríguez, E., y Guzmán Cabrera, R. (2023). Aprendizaje automático y la Colección Reuters-21578 en la clasificación de documentos. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(40), 39–46. <https://doi.org/10.24054/rcta.v2i40.2344>
- Poudyal, S., Mohammadi-Aragh, M. J., y Ball, J. E. (2022). Prediction of student academic performance using a hybrid 2D CNN model. *Electronics*, 11(7), 1005. <https://doi.org/10.3390/electronics11071005>

- Rabelo, A. M., y Zárate, L. E. (2024). A model for predicting dropout of higher education students. *Data Science and Management*, 8(1), 72-85. <https://doi.org/10.1016/j.dsm.2024.07.001>
- Ramírez, P. E., y Grandón, E. E. (2018). Predicción de la deserción académica en una universidad pública chilena a través de la clasificación basada en árboles de decisión con parámetros optimizados. *Formación Universitaria*, 11(3), 3-10. <https://doi.org/10.4067/S0718-50062018000300003>
- Roslan, N., Jamil, J. M., Mohd Shaharanee, I. N., y Sultan Alawi, S. J. (2024). Prediction of student dropout in malaysian's private higher education institute using data mining application. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 45(2), 168-176. <https://doi.org/10.37934/araset.45.2.168176>
- Timarán Buchely, A., y Timarán Pereira, R. (2023). Minería de datos educativa para descubrir patrones asociados al desempeño académico en competencias genéricas. *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, 2(38), 87-95. <https://doi.org/10.24054/rcta.v2i38.1282>
- Tsiakmaki, M., Kostopoulos, G., Kotsiantis, S., y Ragos, O. (2019). Implementing autoML in educational data mining for prediction tasks. *Applied Sciences*, 10(1), 90. <https://doi.org/10.3390/app10010090>
- Universidad de los Andes, Facultad de Economía, Centro de Estudios sobre Desarrollo Económico CEDE. (2014). *Informe Determinantes de la deserción "Informe mensual sobre el soporte técnico y avance del contrato para garantizar la alimentación, consolidación, validación y uso de la información del SPADIES"*. Bogotá D.C.: Colombia. https://www.mineducacion.gov.co/sistemasdeinformacion/1735/articles-254702_Informe_determinantes_desercion.pdf
- Xie, Y. (2021). Student performance prediction via attention-based multi-layer long-short term memory. *Journal of Computer and Communications*, 09(08), 61-79. <https://doi.org/10.4236/jcc.2021.98005>
- Zhang, H., Li, K., y Fu, X. (2010). On pinning control of some typical discrete-time dynamical networks. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 15(2), 182-188. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2009.01.019>



Caficultor digital: tecnologías 4.0 para producción de café mediante modelos predictivos

Digital Coffee Farmer: Industry 4.0 technologies for the Coffee Production Process through Prediction Models

César Osimani¹, Jaime Andrés Arévalo² y William Ruiz Martínez³

Fecha de Recepción: 14 de mayo de 2024

Fecha de Aceptación: 16 de octubre de 2024

Cómo citar: Osimani, C., Arévalo, J. A., y Ruiz Martínez, W. (2024). Caficultor digital: tecnologías 4.0 para producción de café mediante modelos predictivos. *Tecnura*, 28(82), 156-177. <https://doi.org/10.14483/22487638.22161>

Resumen


Contexto: la industria 4.0, la automatización y el procesamiento de datos están transformando los modelos de negocio en diversos sectores, incluida la agricultura. Este trabajo se enfoca en el sector del café, en Colombia, para analizar la situación actual y así proponer tecnologías 4.0 para mejorar la producción.


Método: se exploraron tendencias y se visitaron fincas cafetaleras en Quindío (Colombia); también, se formularon entrevistas a caficultores para obtener información sobre su trabajo y necesidades. Se propone una red experimental basada en internet de las cosas (*internet of things* [IoT]) para recolectar datos sobre variables agroambientales y se define al “caficultor digital”, como un modelo de inteligencia artificial que replica la toma de decisiones de un caficultor experto.

Discusión: se reflexiona sobre la implementación de tecnología en la zona cafetalera, para lo cual se destaca la experiencia y conocimiento de los caficultores locales. Se plantea la necesidad de recopilar más datos para entrenar el modelo propuesto y se discuten los resultados preliminares con un modelo de red neuronal perceptrón multicapa (*multilayer perceptron* [MLP]).

Conclusiones: a pesar de la falta de datos reales e imposibilidades económicas, el concepto de “caficultor digital” promete mejorar la toma de decisiones en el cultivo del café. Se destaca la importancia de continuar con la recopilación de datos y la experimentación con modelos de inteligencia artificial para avanzar en este campo.

¹Doctor en Ciencias de la Ingeniería, ingeniero en Telecomunicaciones y especialista en Visión Artificial. Universidad Blas Pascal, Córdoba, Argentina . Email: cosimani@ubp.edu.ar

²Ingeniero agrónomo de la Universidad Nacional de Colombia, MBA en Gerencia Sénior de la Universidad EAN. Profesor de medio tiempo en la Corporación Universitaria Iberoamericana . Perteneció al grupo GIGCIC como investigador, clasificado en la categoría C en Colciencias. Email: jaime.arevalo@docente.ibero.edu.co

³Maestría en Gestión Estratégica de Ingeniería de Software, Universidad UNINI de Puerto Rico; especialista en Gerencia de Proyectos, Universidad Autónoma de Colombia; ingeniero de Sistemas, Universidad Autónoma de Colombia. Profesor de tiempo completo en la Corporación Universitaria Iberoamericana . Perteneció al grupo GIGCIC como investigador, clasificado en la categoría C en Colciencias. Email: william.ruiz@docente.ibero.edu.co

Palabras clave: agricultura de precisión, redes de sensores agrícolas, modelos de inteligencia artificial en la agricultura, digitalización en la agricultura.

Abstract

Context: Industry 4.0, automation, and data processing are transforming business models across various sectors, including agriculture. This work focuses on the coffee sector in Colombia, analyzing the current situation and proposing Industry 4.0 technologies to enhance production.

Method: Trends are explored, and coffee farms in Quindío, Colombia are visited, interviewing coffee farmers to gather information about their work and needs. An experimental IoT network is proposed to collect data on agro-environmental variables, and the “Digital Coffee Farmer” is defined, an artificial intelligence model that replicates the decision-making of an expert coffee farmer.

Discussion: Reflection is made on the implementation of technology in the coffee-growing area, highlighting the experience and knowledge of local coffee farmers. The need to gather more data to train the proposed model is raised, and preliminary results are discussed with a Multilayer Perceptron (MLP) neural network model.

Conclusions: Despite the lack of real data and economic constraints, the concept of the “Digital Coffee Farmer” promises to improve decision-making in coffee cultivation. The importance of continuing data collection and experimentation with artificial intelligence models to advance in this field is emphasized.

Keywords: precision agriculture, agricultural sensor networks, artificial intelligence models in agriculture, digitalization in agriculture.

Introducción

En estos tiempos de transformación digital, industria 4.0, automatización, procesamiento de datos e introducción de diversas soluciones tecnológicas para soportar la toma de decisiones, tecnologías como internet de las cosas (*internet of things* [IoT]) y la analítica de datos se presentan como alternativas de gran valor para impactar de forma positiva en el modelo de negocio de las organizaciones de diferentes sectores productivos, entre ellos el agro. La recolección y adquisición de datos que registren el comportamiento de lo que sucede en los procesos es determinante; por tanto, elegir soluciones e implementaciones de IoT es una opción acorde a esta necesidad. En la agricultura, las soluciones IoT se han convertido en herramientas ideales para la adquisición de datos sobre cultivos, aplicación de fungicidas y abonos, entre otros. Esta necesidad lleva a la instalación de sensores para la recolección permanente de datos, en combinación con mediciones muy variadas, y con valores en distintas magnitudes y formatos. Por ello, al contar con un elevado volumen de datos, se requieren de tecnologías que preparen y procesen estos datos de forma adecuada, para así obtener información que aporte valor y soporte a la toma de decisiones.

Las acciones para procesos como el tratamiento del suelo y el cultivo para la producción de alimentos tienen una importancia en diferentes regiones del mundo, ya que favorecen la

economía, aunque también suponen una transformación del medio ambiente natural. Las implementaciones de soluciones IoT pueden brindar apoyo para alcanzar un mejor rendimiento del suelo y minimizar el detrimento del medioambiente.

Los avances en cuanto a sensorización y al uso de las nuevas tecnologías en la agricultura, enfocados en mejorar la producción, su calidad y cantidad, y la reducción de costos de la agricultura y del impacto ambiental, han abierto el camino al concepto de *agricultura inteligente*. Aquí, el agricultor puede obtener en tiempo real métricas, estadísticas e informes confiables –a partir del procesamiento automático de estos– que le permiten tomar decisiones acertadas.

El escenario ideal es que el agricultor disponga de un tablero informativo (*dashboard*) con la cantidad adecuada de información; estos datos serán indispensables para tomar decisiones acertadas con base en su propia experiencia, y las cuales posiblemente un algoritmo no esté en capacidad de sugerir, o tal vez el mismo agricultor no desea automatizarlas, ya que influyen en la estrategia de su negocio. En este contexto, un agricultor debe visualizar información reducida, pero crucial y determinante. Para que sea reducida, en general, debe disponerse de grandes volúmenes de datos, que luego deben reducirse con técnicas de analítica de datos, para extraer información crucial. La necesidad principal de un agricultor es conseguir la mayor cantidad posible de su producto con la máxima calidad.

Para un caficultor, contar con información precisa sobre las condiciones del cultivo resulta fundamental para evaluar posibles cambios en escenarios hipotéticos y tomar decisiones estratégicas en cada fase del proceso, con el fin de maximizar la producción y la calidad del grano. En este artículo se propone el diseño de una red experimental basada en IoT que recolecte datos sobre las variables agroambientales de un cultivo de café en la finca Las Acacias, del municipio de Salento (Quindío), para finalmente presentar y reflexionar sobre el valor que agregaría un modelo de inteligencia artificial orientado a apoyar al caficultor, optimizar recursos y mejorar los resultados productivos.

A continuación se detallan los objetivos específicos de investigación:

- Analizar los patrones de comportamiento de las variables agroambientales registradas mediante sensores IoT, para así determinar su relación con las condiciones del cultivo y su impacto en la toma de decisiones agrícolas.
- Organizar y estructurar los datos recopilados por la red experimental IoT, para así transformarlos en información útil y estandarizada, lo cual facilitará su análisis y aplicación en el manejo del cultivo de café.

- Diseñar y evaluar modelos de aprendizaje automático que generen predicciones precisas a partir de los datos agroambientales, desde las cuales se proporcionen herramientas de apoyo y gestión eficiente del cultivo, además de la mejora de la producción.

Trabajos relacionados

La búsqueda bibliográfica arrojó información sobre agricultura inteligente y la manera como es potenciada por las soluciones IoT ([Espinoza García et al., 2019](#)). Respecto al cultivo de café, se encuentran estudios como el de [Parada Molina et al. \(2020\)](#), quienes analizan cómo las variaciones del clima pueden afectar al cultivo del café en el periodo de floración y durante el inicio del crecimiento del fruto. Todos estos datos se encargan de proporcionar modelos de predicciones que ayudarían a tomar acciones correctivas ante cierto tipo de situaciones. También existen alternativas de bajo costo para la recolección de datos mediante IoT (Ossa Duque 2017) para situaciones en las cuales no se cuenta con altos presupuestos. Hay trabajos donde se exploran distintas arquitecturas como los de [Kalyani y Collier \(2021\)](#); [Montoya Muñoz et al. \(2022\)](#); [Rodríguez et al. \(2021\)](#); y los que estudian esta tendencia en utilizar dichas tecnologías ([Sinha y Dhanalakshmi, 2022](#)).

Una vez que los dispositivos y sensores para la adquisición de datos se encuentren configurados, instalados y en funcionamiento, es necesario procesar la información para construir un sistema que acompañe al caficultor en el proceso de toma de decisiones agronómicas fundamentadas. En primera instancia, se requiere confianza en los datos, a pesar de que los dispositivos y sensores pueden tener complicaciones en su funcionamiento, o de que en eventualmente entreguen datos erróneos provocados por fallas en ellos mismos. En [Montoya Muñoz y Caicedo Rendón \(2020\)](#) se detalla un algoritmo que aísla valores atípicos (*outliers*) en los datos adquiridos por los sensores y así lograr una mayor confiabilidad.

Cuando se busca desarrollar un modelo de predicciones, se debe disponer de gran cantidad de datos a adquirir durante todas las fases del cultivo, como también aquellos después de la cosecha, incluyendo los observados y medidos cuando el producto (granos de café) ya está disponible para su comercialización. Es decir, cuando el caficultor ya tiene los granos de café, los analiza y clasifica según la calidad obtenida. Todos estos datos son necesarios para generar un modelo de predicción. En este punto, se debe determinar qué parámetros medir durante el proceso, cuáles deben conocerse acerca del suelo, qué mediciones efectuar para conocer el clima, entre tantos otros que deben ser obtenidos sin sobredimensionar la cantidad de dispositivos y sensores utilizados. [Varshitha y Choudhary \(2022\)](#) proponen un modelo de aprendizaje automático (*machine learning*) que, mediante los datos recolectados, logran estimar la tasa de fertilidad del suelo y el rendimiento de sus cultivos. [Faria et al. \(2024\)](#) también uti-

lizan modelos de aprendizaje automático para predecir el rendimiento en las plantaciones de café mediante atributos del suelo y de la planta. Los autores obtuvieron datos de un campo de 55 hectáreas durante dos temporadas consecutivas, por medio de diferentes tasas de fertilización.

Con un enfoque similar, [Aworka et al. \(2022\)](#) combinan datos climáticos para predecir el rendimiento del suelo para los cultivos. En este caso, cuando no existe inversión suficiente en tecnología para la adquisición de datos, es posible aprovechar la información meteorológica pública.

El trabajo de [Bakthavatchalam et al. \(2022\)](#) proporciona un enfoque para la agricultura de precisión mediante sistemas IoT y algoritmos de aprendizaje automático, con énfasis en la recomendación de cultivos. En el trabajo se utilizan sensores para medir parámetros como nitrógeno, fósforo, potasio, pH, temperatura, humedad y precipitaciones; además, almacenan los datos en la nube, donde un modelo de aprendizaje supervisado predice cultivos con altos rendimientos. Los autores proporcionan las bases para la selección de una red perceptrón multicapa (*multilayer perceptron* [MLP]) como algoritmo principal para la predicción agrícola, gracias a su capacidad para manejar múltiples variables de entrada y generar resultados en sistemas no lineales. El modelo MLP demostró más precisión y consistencia en la clasificación, comparado con otros algoritmos, como JRip y *decision table*, debido a su capacidad para modelar relaciones no lineales entre variables, como los niveles de nutrientes, el pH y las condiciones climáticas, que son esenciales en la agricultura de precisión.

También existen propuestas como la de [Nguyen et al. \(2023\)](#), quienes ofrecen una plataforma diseñada sobre la base de las tecnologías clave de la agricultura inteligente: IoT, *big data*, inteligencia artificial, *blockchain* y tecnologías de trazabilidad. La plataforma se denomina INN-SA (Innovative & Smart Agriculture) y está desarrollada para integrar tecnologías, promover y mejorar los sistemas de gestión de calidad, la trazabilidad y la gestión eficaz y sostenible de la cadena de suministro y de valor del café en Vietnam.

Metodología

Con el fin de reflexionar a partir de información recolectada de primera mano, se visitaron dos fincas para conocer un día típico laboral y entrevistar a expertos caficultores. Luego, se buscó definir una propuesta con el objetivo de que los caficultores pudieran disponer de información para tomar decisiones basadas en los datos recolectados de su finca. Las etapas del trabajo de campo fueron las siguientes:

- Visitas a fincas y entrevistas: fincas Las Acacias y La Morelia.
- Síntesis de la información: identificación de parámetros útiles para un caficultor.
- Definición de una propuesta digital: el caficultor digital.
- Definición de una red IoT y sensores: para finca Las Acacias.

Entrevistas y organización de la información

El sector cafetero en Colombia ha sido uno de los renglones principales y tradicionales que han contribuido de manera significativa a la economía y desarrollo social en la zona rural, la cual en su estructura social se compone de pequeños productores. En el caso del departamento de Quindío, de acuerdo con el Comité de Cafeteros del Quindío, en su informe de gestión de 2023, el área cafetera está compuesta por 5662 fincas que cubren 18 051 ha de cultivo de café.

En esta región, se adelantaron entrevistas informales en el municipio de Salento, que forma parte del Paisaje Cultural Cafetero (PCC), donde se desarrolla caficultura de montaña y que fue declarado Patrimonio de la Humanidad por la Unesco. Estas entrevistas llevaron a comprender la realidad de la producción del café en la región, y a sentar las bases de la propuesta de este artículo que, de manera anticipada, se mencionó: “caficultor digital”. Este es un concepto que se propone en este trabajo, y está relacionado con la inteligencia y la experiencia de un caficultor humano experto en el cultivo del café, modelado y adaptado para funcionar a través de estrategias de aprendizaje automático. Su objetivo es brindar soporte a quienes tienen a cargo los procesos del cultivo, ofrecer orientación práctica y generar predicciones útiles que faciliten la implementación de acciones efectivas para gestionar la cosecha y lograr una producción adecuada.

Entrevistas

En mayo de 2023 se realizaron entrevistas a caficultores expertos en dos fincas de la región: Las Acacias y La Morelia, ubicadas en el departamento del Quindío. La primera se encuentra en el municipio de Salento, donde la temperatura promedio es de 18 °C y cuenta con una población aproximada de 3000 habitantes en el casco urbano, y 5500 en la zona rural. Tiene un sistema productivo de café, ganadería, especies menores (conejos y gallinas), elaboración de compostaje y de explotación del turismo cafetero en sus instalaciones (figura 1). El café de la finca se comercializa directamente a los turistas que la visitan y hacen un recorrido denominado “ruta de café”, el cual consiste en una explicación detallada de la producción agrícola cafetera y del procesamiento y secado de café, todo esto llevado hasta la taza de café que el visitante se toma al finalizar el recorrido. El productor también vende el café por libras a diferentes almacenes y cafeterías en Colombia.



Figura 1. Finca Las Acacias

Descripción general de Las Acacias

La finca posee 20 000 árboles productivos, distribuidos en 4,5 ha, con una distancia de siembra de 1,20 metros entre árboles y 2,0 m entre calles. El 90 % de su área tiene una topografía montañosa. Las variedades sembradas son: Castillo® y Cenicafé. Los árboles de café empiezan a producir tres años después de sembrados, a diferencia del café cultivado a menos altura que empieza a arrojar cosechas después de dos años. El caficultor en esta finca no lleva un registro de las condiciones climáticas, aunque conoce muy bien los efectos que causan los cambios de temperatura –altas en el día a muy bajas por las noches–, lo cual genera quemaduras en las hojas (figura 2). Cuando el árbol sufre estas quemaduras, puede retrasar el rebrote dos meses, y afectar directamente la producción. El cambio de las condiciones climáticas también favorece el desarrollo de enfermedades y plagas, como la broca y la roya, lo cual redunda en una disminución en la producción y en calidad del grano.

En su trabajo, [Kumari et al. \(2024\)](#) estudian las variedades de enfermedades en las hojas del café, sus rasgos y características, así como la prevención; entre ellas se incluyen el óxido de las hojas, las manchas, la podredumbre y enfermedades de las raíces. Los autores también proponen un modelo para la detección temprana de estas enfermedades, con el objetivo de mejorar la productividad. Por su parte, [Hitimana et al. \(2024\)](#) tienen en cuenta las enfermeda-



Figura 2. Quemaduras en las hojas

des foliares que pueden reducir el rendimiento y afectar la calidad de los granos. Los autores introducen una aplicación móvil para detectar estas enfermedades, la cual integra técnicas de visión artificial que habilita a los usuarios capturar imágenes de alta resolución de las hojas de café directamente en el campo y ser procesadas para una identificación de enfermedades. En su artículo, De [Carvalho Alves *et al.* \(2022\)](#) utilizan algoritmos de aprendizaje automático para determinar el rendimiento del café, a partir de los cuales se obtienen umbrales de nutrientes para lograr un alto rendimiento, con el aumento en el vigor en el manejo de fertilizantes.

La época de mayor cosecha se presenta entre abril y junio. En esta finca hacen zoca (renovación del tronco del árbol del café) cada ocho años. Es importante para un caficultor conocer la fertilidad del suelo, y para ello es necesario realizar los estudios pertinentes para mantener niveles adecuados de nutrientes para una óptima producción, incrementar la resistencia de las plantas a plagas y enfermedades, y mejorar la calidad de las cosechas. La fertilidad del suelo depende de varios factores como el agua, micro- y macronutrientes, materia orgánica, pH y clase textural, que aportan diferentes beneficios a los cultivos. La producción y calidad de los cultivos se ven afectadas por prácticas de fertilización inadecuadas, que carecen de una base de información específica, como el análisis de suelos. Este análisis proporciona detalles sobre las características físicas y químicas del suelo, y es crucial para determinar los métodos de fer-

tilización más adecuados. En Las Acacias se adelantan estudios del suelo cada uno o dos años, y una muestra se visualiza en la tabla 1.

Tabla 1. Estudio del suelo

Determinación	Método	Resultado	Rango adecuado
pH	Potenciómetro en agua 1:1	5,2	Entre 5,0 y 5,5
Materia orgánica	Walkley Black-Colorimétrico	10,2 %	Mayor de 8,0
Fósforo (P)	Bray II-Colorimétrico	11 mg/kg	Mayor de 30
Potasio (K)	Acetato de amonio-Absorción atómica	0,29 Cmolc/kg	Mayor de 0,40
Magnesio (Mg)	Acetato de amonio-Absorción atómica	0,3 Cmolc/kg	Mayor de 0,9
Calcio (Ca)	Acetato de amonio-Absorción atómica	2,1 Cmolc/kg	Mayor de 3,0
Azufre (S)	Fosfato de calcio-Turbidimétrico	No solicitado	Mayor de 12
Aluminio (Al)	Yuan - Absorción Atómica	0,0 Cmolc/kg	Mayor de 1,0
Textura	Al tacto	Franco-arenoso	

Considerando un escenario en donde el uso de tecnología y la digitalización es muy escasa, y las posibilidades de realizar una inversión importante son pocas, se tuvo que orientar la propuesta para que se pudieran utilizar datos meteorológicos públicos, datos compartidos entre caficultores vecinos, información divulgada y proporcionada por la Federación Nacional de Cafeteros, información de los estudios del suelo y datos adquiridos por sensores de bajo costo que oportunamente se instalaron en la finca.

Vale la pena resaltar que este es un artículo de reflexión y se desea conducir el trabajo hacia la creación del “caficultor digital”, el cual tiene relación directa con el caficultor humano. No está de más profundizar en este concepto: el caficultor humano es el caficultor experto, que está representado por las personas que fueron entrevistadas en las fincas. Toda la información obtenida es la base de conocimiento para identificar las variables que el caficultor experto tiene en cuenta para tomar sus decisiones. Por otro lado, el “caficultor digital” deberá utilizar, al menos, las mismas variables, solamente que tendrá la posibilidad de estar procesando información incansablemente y podrá disponer de ella constantemente, gracias a los sensores instalados.

Luego de las entrevistas, se determina que las variables que el caficultor utiliza son temperatura y humedad ambiental; precipitaciones, y humedad del suelo. A partir de estas, se definen los siguientes dispositivos para conformar la red inalámbrica de sensores:

- Módulo *gateway*: DRAGINO LoRaWAN LPS8, SX1308, 868/915 MHz.
- Sensor de temperatura y humedad ambiental: LoRaWAN LSN50v2-S31.
- Sensor de humedad del suelo y conductividad eléctrica: LoRaWAN LSE01-AU915.

Propuesta: caficultor digital

En esta sección se describe la creación de un modelo de inteligencia artificial que replique la inteligencia del caficultor humano. Con este modelo es posible anticiparse a los sucesos y ejecutar las acciones de prevención y precaución para que ciertos eventos no deseados influyan negativamente sobre la producción del café, o minimizar su impacto. A partir de las entrevistas con el caficultor dueño de Las Acacias, sus colaboradores y trabajadores, se obtuvo información a partir de la cual ellos se basan para tomar sus decisiones, cuáles son sus métodos de medición, de qué manera corrigen anomalías, cómo hacen sus estimaciones, y, finalmente, cómo seleccionan y clasifican sus granos de café. En otras palabras, se obtuvo información que permitiera sintetizar la experiencia del caficultor para llevar adelante la producción de café. Ahora bien, se desea parametrizar la inteligencia del caficultor a través de un modelo de inteligencia artificial que emule, imite o reproduzca el comportamiento del caficultor humano.

Se pensó en que un caficultor experto tiene la información más valiosa y nadie mejor que él puede llevar adelante los procesos de cultivo en la finca. Las decisiones que él puede tomar son las más adecuadas y oportunas, con la limitación de que no dispone de grandes volúmenes de datos. Es decir, un caficultor que no posee suficientes sensores de medición automáticos y concentradores de datos realiza un muy buen análisis de la información para tomar las acciones durante el cultivo. La inteligencia humana de ese caficultor es sumamente valiosa. En esta propuesta, se quiere replicar esa inteligencia en un modelo que pueda imitar las acciones, pero a partir de grandes volúmenes de datos.

A la hora de construir un modelo, es necesario disponer de conjunto de datos (*dataset*), el cual está compuesto por las variables de entrada y los resultados obtenidos. Todo esto pensando en una red neuronal artificial. La salida en nuestra propuesta es la acción que el caficultor debe realizar en los cultivos de café.

El modelo

El diseño de la arquitectura de red está inspirado en el trabajo presentado por [Bakthavatchalam et al. \(2022\)](#), que es parte del estado del arte, en el cual se utiliza un método de aprendizaje automático para la predicción de cultivos. En ese trabajo se utilizan los siguientes parámetros: nitrógeno (N), fósforo (F), potasio (P), pH, temperatura ambiente, humedad del suelo y precipitaciones. Allí también se exponen las mediciones en la unidad de medida masa por volumen, generalmente en miligramos por kilogramo de suelo (mg/kg) o partes por millón (ppm). Estas unidades representan la cantidad de cada elemento presente en una muestra específica de suelo.

Considerando la finca Las Acacias, la unidad de medida obtenida luego del análisis en laboratorio es Cmolc/kg (centimoles de carga por kilogramo), la cual expresa la capacidad de intercambio catiónico (CIC) del suelo, que es una propiedad fisicoquímica que describe la capacidad del suelo para retener y liberar cationes, que son iones cargados positivamente. La CIC se debe principalmente a la presencia de arcillas y materia orgánica en su composición, las cuales tienen superficies cargadas negativamente, denominadas *sitios de intercambio catiónico*, que pueden atraer y retener los cationes presentes en la solución del suelo. Cuando las plantas toman agua del suelo, los cationes presentes en los sitios de intercambio catiónico pueden ser liberados y absorbidos por las raíces de las plantas. La CIC es una medida de la fertilidad y de la capacidad de retención de nutrientes del suelo. Un suelo con una alta CIC puede retener una mayor cantidad de nutrientes, lo cual representa un beneficio para el crecimiento y desarrollo de las plantas, ya que disponen de un suministro constante de nutrientes. Por otro lado, un suelo con una baja CIC puede requerir una mayor frecuencia de fertilización para mantener niveles adecuados de nutrientes para las plantas. Como se observa en la tabla 1, se dispone de mediciones de: pH, materia orgánica, fósforo (P), potasio (K), magnesio (Mg) y calcio (Ca).

En Las Acacias, los datos aleatorios de fósforo, potasio, pH y humedad del suelo se generaron gracias a la utilización de rangos basados en estudios locales y en las condiciones agroecológicas del cultivo de café en suelos montañosos. El fósforo (5-15 mg/kg), esencial para el desarrollo radicular y la formación de flores, evidencia su disponibilidad limitada en suelos ácidos debido a la fijación con aluminio y hierro. El potasio (0,25-2,5 Cmolc/kg), vital para la osmorregulación, la resistencia al estrés hídrico y la calidad del grano, se basó en la capacidad de intercambio catiónico típica de los andisoles. El pH (5,0-5,5), que regula la disponibilidad de nutrientes como fósforo y calcio, corresponde a la acidez característica de suelos cafeteros. Para la humedad del suelo (60 %-90 % de capacidad de campo), se estimó la alta pluviosidad y retención hídrica del suelo durante épocas de lluvia. Estos elementos son cruciales para garantizar el crecimiento saludable de las plantas de café y optimizar su productividad. Los rangos, aplicados mediante distribuciones aleatorias ajustadas, simulan la variabilidad esperada en campo, lo cual facilita la creación de modelos predictivos realistas y útiles para el manejo del cultivo.

El modelo que se propone en este trabajo considera únicamente el pH, fósforo y potasio, con el objetivo de acercarse a lo propuesto por [Bakthavatchalam et al. \(2022\)](#), quienes utilizan mediciones de nitrógeno, fósforo, potasio y pH, además de la temperatura ambiente, humedad del suelo y precipitaciones. Basados en esta información, es posible elaborar el modelo de predicciones denominado “caficultor digital”.

De acuerdo con las entrevistas, el caficultor humano utiliza, principalmente, las mediciones de la temperatura ambiental, precipitaciones y la humedad del suelo, para tomar decisiones

respecto a su cultivo. En segundo orden, recoge la información del estudio de suelo, pero para una planificación a mediano plazo. En este sentido, los parámetros de entrada al modelo de predicción propuesto en este trabajo son fósforo (F), potasio (P), pH, temperatura ambiente, humedad del suelo y precipitaciones.

Así, se dispone de un *dataset* de prueba construido con parámetros de entrada muy similares a los que se pretende utilizar para entrenar al caficultor digital. Este *dataset* está pensado para recomendar el tipo de cultivo que mejor rendiría en las condiciones definidas por los parámetros de entrada. El *dataset* se encuentra disponible en [Atharva \(2020\)](#).

Para entrenar un modelo de inteligencia artificial es necesario disponer de los datos de salida; es decir, aquellos datos que el modelo podrá predecir. Estos datos de salida en el modelo “caficultor digital” son las acciones que el caficultor humano debe tomar para alcanzar el rendimiento deseado del cultivo. Para el caficultor digital se determinan las siguientes acciones:

- *Aplicar agroquímicos.* Se realiza debido a diversos factores, como las condiciones climáticas, el estado de las plantas y problemas específicos que se están tratando. Los agroquímicos, que incluyen pesticidas, herbicidas y fertilizantes químicos, se utilizan en el cultivo de café para controlar plagas, enfermedades y mejorar la salud de las plantas.
- *Acción método integral de prevención de enfermedades MIPE.* Implica la implementación de múltiples prácticas y estrategias para prevenir la aparición y propagación de enfermedades en las plantas.
- *Poda de plantas de café.* Es una práctica importante para mantener la salud y el rendimiento de los cafetales. Depende de múltiples factores y momentos, entre los cuales se pueden mencionar la variedad del café; las condiciones climáticas; algunas prácticas MIPE, en momentos de cosecha; eliminación de brotes débiles; poda intensa para rejuvenecer la planta; eliminación de ramas viejas o dañadas; entre otros.
- *Ninguna acción por realizar.* Puede deberse a que no es momento de trabajar con algún agroquímico, o realizar prácticas de prevención de enfermedades. Alguno de los motivos para no realizar acciones sobre la finca es la probabilidad de condiciones climáticas; por ejemplo, si se pronostican lluvias, no es recomendable aplicar agroquímicos, ya que podrían lavarse.

En el momento en que se presenta este artículo de reflexión, no se dispone de cantidades significativas de datos como para lograr un modelo robusto, ya que aún no se encuentra desplegada la red IoT ni los sensores. Sin embargo, de la recopilación de información de trabajos que forman el estado de arte y con la particularización en una región muy importante de Colombia

respecto al cultivo del café, es oportuno avanzar en la definición del modelo de predicciones que, oportunamente, tendrá interesantes mejoras cuando las cantidades de datos adquiridas a través de las redes de sensores se incrementen cosecha tras cosecha.

El *dataset* para crear la primera versión del modelo son datos de la temperatura ambiental y precipitaciones obtenidos desde el sitio Weather Spark⁴ en mediciones del mes en el que se visitó la finca. Respecto a la humedad del suelo, esta se estimó con base en las precipitaciones, aunque la relación entre ambas variables puede ser compleja y depende de varios factores adicionales. La precipitación es una de las principales fuentes de humedad del suelo. Sin embargo, la cantidad de humedad que el suelo retiene depende de varios factores: tipo de suelo, textura, permeabilidad, cobertura vegetal, evapotranspiración y condiciones climáticas adicionales. Si bien la precipitación puede aumentar la humedad del suelo, también es posible que esta disminuya debido a la evaporación y la transpiración de las plantas (evapotranspiración) y otros procesos de pérdida de agua. Por tanto, la estimación precisa de la humedad del suelo en función de las precipitaciones requeriría tener en cuenta estos factores; además, es posible utilizar el modelo de balance hídrico, que considera las entradas y salidas de agua en el suelo a lo largo del tiempo y en diferentes momentos. El modelo de balance hídrico se basa en la siguiente ecuación general:

$$\text{Balance de agua en el suelo} = \text{Precipitación} + \text{Agua de riego} - \text{Evapotranspiración} - \\ \text{Escurrimiento} - \text{Drenaje} \pm \text{Cambio en la humedad del suelo}$$

Donde:

Precipitación: cantidad de agua que cae al suelo en forma de lluvia.

Agua de riego: cantidad de agua agregada al suelo mediante riego artificial.

Evapotranspiración: pérdida de agua del suelo debido a la combinación de la evaporación desde la superficie del suelo y la transpiración de las plantas.

Escurrimiento: cantidad de agua que fluye superficialmente sobre la superficie del suelo y no se infiltra.

Drenaje: cantidad de agua que se mueve a través del suelo y se elimina del perfil del suelo.
Cambio en la humedad del suelo: variación neta de la humedad del suelo durante el periodo de tiempo considerado.

Para calcular la evapotranspiración para un día se recurre al método de Penman-Monteith, el cual asume las temperaturas máxima y mínima del día, humedad relativa promedio, velocidad del viento promedio y radiación solar promedio. Con estos datos, y siguiendo una serie de pasos del método, se obtiene la evapotranspiración estimada para ese día específico. Se estima

⁴Weather Spark es un servicio que proporciona datos meteorológicos (<https://es.weatherspark.com>)

que la evapotranspiración se encuentra en el rango de 4 mm/día y 12 mm/día para el mes de la visita a la finca.

Con el objetivo de probar el modelo y disponer de un *dataset* con variantes en sus datos, aquí se propone generar aleatoriamente los datos de fósforo, potasio, pH y humedad del suelo. En cuanto a las precipitaciones y temperatura, se dispone de los datos reales durante los meses de mayo y junio, desde el sitio Weather Spark. Según los estudios del suelo en Las Acacias, en distintas oportunidades, se tienen los siguientes rangos en las variaciones de los parámetros:

- *Fósforo*: el rango para los niveles de fósforo en el suelo en la zona de montaña en la finca Las Acacias puede variar entre 5 a 15 mg/kg.
- *Potasio*: los niveles de potasio pueden variar entre 0,25 a 2,5 Cmolc/kg.
- *pH*: los niveles de pH pueden oscilar entre 5 y 5,5.
- *Humedad del suelo*: la humedad del suelo puede oscilar entre el 60 % y el 90 % de capacidad de campo en las épocas de lluvia, como en los meses de mayo y junio.

De esta manera queda completo un primer *dataset* de entrada, como muestra, para ese par de meses en el que se visitó la finca. Para completar el *dataset* con una salida etiquetada, se solicita al caficultor experto que indique con una salida o clase específica, según su experiencia. En la tabla 2 se pueden visualizar algunas líneas de un archivo CSV con las columnas del *dataset*.

Tabla 2. Dataset propio

Temperatura (°C)	Precipitaciones (mm)	Fósforo	Potasio (Cmolc/kg)	Humedad del suelo (%)	pH	Acción	Acción específica
13,0	0,6	13,88	1,54	70	5,22	1	1 No hacer nada
12,8	3,8	8,9	1,43	72	5,00	1	2 Aplicar agroquímicos
15,8	0,7	7,74	1,41	78	5,48	1	3 MIPE (*)
15,8	0,6	7,76	0,26	86	5,25	1	4 Poda
15,8	1,3	11,39	1,55	65	5,31	1	
15,5	0,3	14,79	1,32	90	5,17	1	
15,3	0,3	14,82	0,45	82	5,27	3	
17,3	1,3	10,43	1,52	65	5,20	3	
19,4	0,0	10,95	1,10	62	5,40	3	
21,4	0,0	8,18	1,37	84	5,22	3	

*MIPE: manejo integrado de plagas y enfermedades, estrategia agrícola que combina distintos métodos de control para reducir el daño de plagas y enfermedades en los cultivos.

Con estos datos etiquetados con acciones, es posible entrenar el modelo. Luego, se podrán automatizar la toma de decisiones sobre las acciones oportunas para lograr el rendimiento deseado del cultivo.

En situaciones como estas, en donde se tiene una necesidad y se dispone de datos estructurados y etiquetados, se debe decidir sobre la técnica que se utilizará para confeccionar un modelo de predicción. Existe una limitación importante en este momento del proyecto y es la escasez de datos, que genera incertidumbre en cuanto a la precisión del modelo. Es importante establecer expectativas realistas y disponerse a mejorar el modelo a medida que se recopilen datos cuando se disponga de los sensores instalados.

Una red neuronal perceptrón multicapa (*multilayer perceptron* [MLP]) es una opción prometedora para problemas de predicción en este tipo de situaciones. Una MLP es una red neuronal artificial que consta de múltiples capas de neuronas conectadas entre sí. Cada capa se compone de neuronas que realizan operaciones matemáticas para propagar la información y ajustar la red durante el proceso de entrenamiento. En el artículo de [Al-Adhaileh et al. \(2022\)](#) se propone una red MLP para la predicción del rendimiento de los cultivos, según factores ambientales.

La arquitectura de la red MLP está formada de la siguiente manera:

- *Capa de entrada*: 6 neuronas, una por cada variable de entrada.
- *Capas ocultas*: se realizará la experimentación con diferentes configuraciones de capas y número de neuronas en cada capa oculta para obtener el mejor rendimiento con el conjunto de datos disponible.
- *Capa de salida*: 4 neuronas, una por cada acción que el caficultor debe realizar.

La función de activación en las capas ocultas será la función *sigmoid* y *softmax* en la capa de salida, ya que esta permite la clasificación con múltiples clases. La función *softmax* transforma las salidas en la capa de salida en una distribución de probabilidad sobre las diferentes clases.

La función de pérdida (también conocida como *función de costo* o *función de error*) mide la discrepancia entre las salidas predichas por el modelo y las etiquetas reales del conjunto de datos. El objetivo principal durante el entrenamiento de la MLP es minimizar esta función de pérdida para que el modelo pueda arrojar predicciones más precisas. En este problema de clasificación con múltiples clases, se puede utilizar la función de entropía cruzada categórica (*categorical cross-entropy*).

Con el objetivo de ajustar los parámetros de la red, que son los pesos de las conexiones entre las neuronas, durante el entrenamiento, se utiliza un algoritmo de optimización. En esta propuesta se selecciona el descenso de gradiente (*gradient descent*) con propagación hacia atrás de errores (*backpropagation*). Con este ajuste de los pesos se busca que el modelo aprenda a mapear las entradas hacia las salidas, de manera que las predicciones sean lo más cercanas posible a las etiquetas reales del conjunto de entrenamiento (estas salidas son las cuatro acciones de salida). Para hacer esto, la red pasa las entradas hacia adelante a través de las capas (proceso conocido como *propagación hacia adelante*), mediante el cálculo de las salidas predichas. Luego, se compara la diferencia entre las salidas predichas y las etiquetas reales mediante una función de pérdida. Una vez que se calcula la función de pérdida, el algoritmo de optimización entra en acción para ajustar los pesos en las neuronas para minimizar esa función de pérdida. El algoritmo de optimización utiliza la información proporcionada por la función de pérdida y sus gradientes para actualizar los parámetros de la red de manera iterativa. Existen diferentes variantes del algoritmo de descenso de gradiente, como el descenso de gradiente estocástico (*stochastic gradient descent* [SGD]), el descenso de gradiente con momento (*momentum*), el descenso de gradiente con RMSProp (*root mean square propagation*), el descenso de gradiente con *adam* (*adaptive moment estimation*), entre otros. El seleccionado para esta propuesta es *adam*.

Para implementar esta arquitectura de red se dispone de una herramienta denominada WEKA (*Waikato Environment for Knowledge Analysis*), y es frecuentemente utilizada en el ámbito de la investigación en minería de datos y aprendizaje automático. Cuenta con gran cantidad de algoritmos, además, permite un rápido prototipado y experimentación, facilidad de uso y diversas referencias en artículos científicos. También, su disponibilidad es de código abierto y gratuito.

Luego de distintas iteraciones en la experimentación con redes neuronales del tipo perceptrón multicapa, en la figura 3 se ilustra la arquitectura de red propuesta para el entrenamiento con el *dataset* de prueba.

Ahora se busca analizar los resultados del entrenamiento y pruebas de la red perceptrón multicapa con el *software* WEKA. El objetivo es evaluar el rendimiento en las predicciones de las acciones a realizar por el caficultor. Inicialmente, este modelo de red MLP fue probado con el *dataset* que está disponible en [Atharva \(2020\)](#), y permite predecir el tipo de cultivo que mejor rendiría en un suelo y datos climáticos particulares, y entrega resultados con exactitud (*accuracy*) elevada, superando el 95 %. Sin embargo, con el *dataset* de prueba, los resultados fueron inferiores al 60 % de exactitud, lo que es considerablemente negativo, debido a la aleatoriedad de los datos, lo cual será solucionado cuando los sensores se encuentren instalados. Es importante comparar el desempeño del modelo MLP con otros algoritmos del estado del arte para determinar si su uso es importante para el “caficultor digital”.

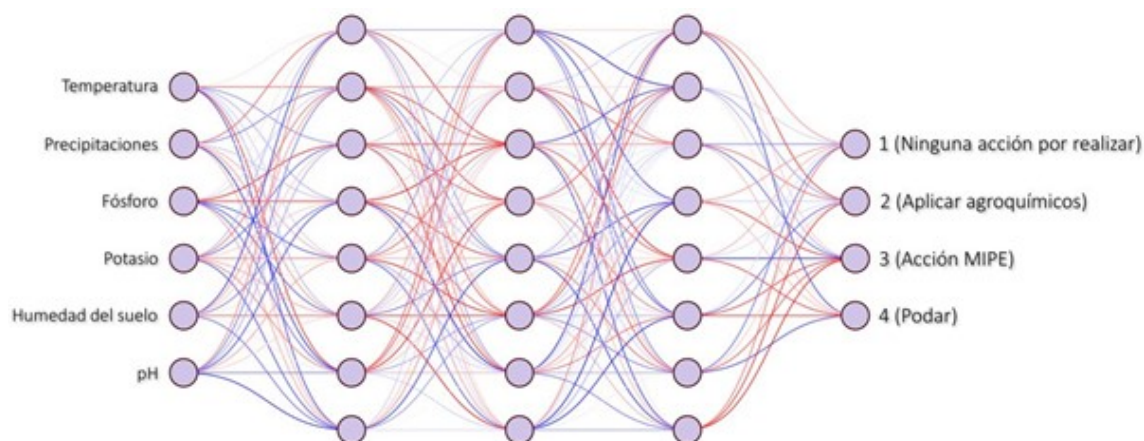


Figura 3. Arquitectura de la red MLP

El estudio de [Laddha \(2023\)](#) presentó un sistema hidropónico automatizado basado en IoT que emplea árboles de decisión para monitorear y controlar parámetros como pH, intensidad lumínica y temperatura. Este enfoque se destacó por su interpretabilidad y eficiencia computacional, pues facilitó la adopción de tecnologías inteligentes en la agricultura. Aunque los árboles de decisión son más fáciles de interpretar, pueden ser propensos al sobreajuste, lo que podría limitar su precisión en escenarios con múltiples variables interdependientes.

Por otro lado, los bosques aleatorios, que combinan múltiples árboles de decisión, han mostrado mejoras en la precisión y robustez en comparación con los árboles individuales. El artículo de [Singh y Sharma \(2024\)](#) revisó aplicaciones de IoT en la agricultura de precisión, y destacó la efectividad de los bosques aleatorios en el manejo grandes volúmenes de datos y en la captura de interacciones complejas entre variables agroambientales. Sin embargo, aunque ofrecen un equilibrio entre interpretabilidad y rendimiento, su capacidad para modelar relaciones altamente no lineales puede ser limitada en comparación con una red MLP.

La regresión logística, conocida por su simplicidad y rapidez computacional, es adecuada para problemas de clasificación binaria o multiclase con relaciones lineales. No obstante, su incapacidad para capturar relaciones no lineales entre variables las hace menos adecuadas para problemas complejos como la predicción en cultivos con múltiples variables.

Reflexión final

En primer lugar, es importante destacar la escasa implementación de tecnología en la zona cafetera donde se llevaron a cabo las entrevistas. A pesar de ello, se obtiene café de alta calidad,

bien recibido por los consumidores. Esto sugiere que los caficultores locales poseen una vasta experiencia y conocimiento gracias a los cuales obtienen resultados satisfactorios, sin depender en gran medida de la recolección automatizada de datos por medio de la tecnología. Sin embargo, es crucial reconocer que la utilización de datos recolectados y la generación de informes mediante su procesamiento continuo podrían permitir anticiparse a posibles eventos adversos en el cultivo.

Tras analizar el estado actual de la tecnología en el sector, se observa una tendencia hacia una mayor implementación de tecnología. Esto se puede leer en el informe de 2023 de la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia ([FNC, 2023](#)), en el cual se destaca y se impulsa el desarrollo tecnológico para los siguientes proyectos:

- *IoT para monitoreo de variable en fincas.* Solución digital para capturar información, dar trazabilidad y relacionar variables de producción en finca (recolección y beneficio, fermentación, secado) con variables de calidad del café (humedad, defectos en taza, perfil de taza, residuos químicos) para retroalimentar al productor, mejorando calidad.
- *Visión artificial.* Detección de defectos físicos y tamaño de grano mediante análisis de imágenes.
- *Nariz electrónica.* Uso de una nariz electrónica para análisis sensorial. Este desarrollo busca apoyar la evaluación de la calidad del café.
- *Inteligencia artificial.* Clasificación de granos según su apariencia física y defectos.

El informe también revela que los proyectos de innovación tecnológica son altamente valorados en el sector, y el “caficultor digital” podría impulsar mejoras de la producción de café.

Si bien los resultados durante el entrenamiento de la red MLP fueron poco satisfactorios, debido a la limitada disponibilidad de datos reales, la generación de datos aleatorios ocasionó la falta de patrones discernibles para agrupar propiedades a lo largo de las capas de la red MLP. Esta es una de las principales limitaciones del proyecto, que introduce incertidumbre en el desempeño del modelo bajo condiciones reales. Para superar este desafío, están planificadas las etapas de recolección de datos mediante sensores IoT, lo que permitirá ajustar y validar el modelo. Además, se evaluará el impacto del modelo en métricas clave como la calidad del grano y el rendimiento de las cosechas, lo que demostrará su influencia positiva en la producción cafetera. Con estas iniciativas, el modelo tiene el potencial de convertirse en otra herramienta para la agricultura de precisión en el sector cafetero.

También es importante definir una metodología para registrar las acciones realizadas por el caficultor humano en la finca. Esto implica que, una vez que los sensores estén instalados y en

funcionamiento, y los datos comiencen a registrarse de forma continua, deben documentarse y organizarse todas las acciones del caficultor en su finca. En este sentido, el conjunto de datos estará etiquetado con la salida correspondiente, que representa la acción que el modelo “caficultor digital” entregará como predicción.

Entre las principales limitaciones del estudio se destaca la falta de datos agroambientales reales recopilados en campo, al momento de iniciar la investigación, lo cual afecta la precisión y relevancia del modelo “caficultor digital”. Actualmente, este se apoya en datos generados aleatoriamente que, si bien resultan útiles para las simulaciones preliminares, no representan con fidelidad la complejidad de las interacciones reales entre las variables ambientales y las prácticas del caficultor. Para superar esta limitación, se implementará una red experimental IoT en la finca Las Acacias, destinada a recolectar datos en tiempo real sobre variables como humedad del suelo, temperatura y pH. Esta red será complementada con una estrategia de monitoreo continuo a lo largo de varias cosechas, con el fin de capturar variaciones estacionales y espaciales. Además, se incorporarán registros manuales aportados por los caficultores locales para enriquecer el conjunto de datos disponibles.

Otra limitación significativa es la dependencia inicial de datos simulados, lo que restringe la capacidad del modelo para identificar patrones reales en las primeras etapas de su desarrollo. Esta situación afecta la calidad de las predicciones, ya que los datos aleatorios no incorporan toda la variabilidad presente en un entorno agrícola real. Para mitigar este problema, el modelo será entrenado de manera progresiva con los datos reales que se recopilen, y será ajustado para reflejar mejor las condiciones específicas del cultivo. Además, se planea una validación cruzada con caficultores expertos, cuyo conocimiento y experiencia serán fundamentales para afinar las predicciones y garantizar que las decisiones generadas sean aplicables y efectivas en la práctica.

Trabajo futuro

En el desarrollo del modelo “caficultor digital”, es crucial avanzar en su validación y mejora a través de varias iniciativas. En primer lugar, se plantea la recolección de datos reales a través de sensores IoT en la finca Las Acacias. Estos datos incluirán parámetros agroambientales reales como temperatura y humedad del suelo y del ambiente, con los cuales se entrenará y probará el modelo.

Asimismo, se sugiere la experimentación con diferentes modelos de predicción, como bosques aleatorios y modelos híbridos, para evaluar su desempeño en comparación con la red MLP. Estas comparaciones ayudarán a evaluar cada enfoque según la necesidad específica del caficultor de la finca.

Por último, es importante evaluar el impacto del modelo en la producción cafetera, además de considerar métricas como la calidad del grano, el rendimiento de las cosechas y la reducción en el uso de insumos agrícolas. Este análisis validará la utilidad del modelo y ayudará a identificar áreas de mejora y a expandir su alcance en el sector cafetero.

Referencias

- Al-Adhaileh, M. H., y Aldhyani, T. H. H. (2022). Artificial intelligence framework for modeling and predicting crop yield to enhance food security in Saudi Arabia. *PeerJ Computer Science*, 8, e1104. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.1104>
- Atharva Ingle. (2020). Crop recommendation dataset. Maximize agricultural yield by recommending appropriate crops. *Kaggle.com*. <https://www.kaggle.com/atharvaingle/crop-recommendation-dataset>
- Aworka, R., Saadio Cedric, L., Hamilton Adoni, W. Y., Thouakesseh Zoueu, J., Kalala Mutombo, F., Mberi Kimpolo, C. L., y Krichen, M. (2022). Agricultural decision system based on advanced machine learning models for yield prediction: case of East African countries. *Smart Agricultural Technology*, 2, 100048. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atech.2022.100048>
- Bakthavatchalam, K., Karthik, B., Thiruvengadam, V., Muthal, S., Jose, D., Kotecha, K., y Varadarajan, V. (2022). IoT framework for measurement and precision agriculture: predicting the crop using machine learning algorithms. *Technologies*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.3390/technologies10010013>
- De Carvalho Alves, M., Sanches, L., Pozza, E. A., Pozza, A. A. A., y Da Silva, F. M. (2022). The role of machine learning on Arabica coffee crop yield based on remote sensing and mineral nutrition monitoring. *Biosystems Engineering*, 221, 81-104. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.06.014>
- Espinoza-García, M., Álvarez-Martínez, G., y Chora-García, D. (2019). La perfecta combinación de la internet de las cosas y la agricultura de precisión. *Killkana Técnica*, 3(2), 31-38. https://doi.org/10.26871/killkana_tecnica.v3i2.533
- Faria, R. O., Marques Filho, A. C., Santana, L. S., Martins, M. B., Sobrinho, R. L., Zoz, T., Oliveira, B. R., Alwasel, Y. A., Okla, M. K., y Abdelgawad, H. (2024). Models for predicting coffee yield from chemical characteristics of soil and leaves using machine learning. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(9), 5197-5206. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13362>
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia (FNC). (2023). *Informe del gerente al 92 Congreso Nacional de Cafeteros*. <https://federaciondecafeteros.org/app/uploads/2023/11/IG-92-CNC-DIGITAL.pdf>

- Hitimana, E., Kuradusenge, M., Sinayobye, O. J., Ufitinema, C., Mukamugema, J., Murangira, T., Masabo, E., Rwibasira, P., Ingabire, D. A., Niyonzima, S., Bajpai, G., Mvuyekure, S. M., y Ngabonziza, J. (2024). Revolutionizing coffee farming: a mobile app with GPS-enabled reporting for rapid and accurate on-site detection of coffee leaf diseases using integrated deep learning. *Software*, 3(2), 146-168. <https://doi.org/10.3390/software3020007>
- Kalyani, Y., y Collier, R. (2021). A systematic survey on the role of cloud, fog, and edge computing combination in smart agriculture. *Sensors*, 21(17), 5922. <https://doi.org/10.3390/s21175922>
- Kumari, M., Kukreja, V., Raj, A., y Chaudhary, S. K. (2024). Coffee leaf diseases classification: a CNN and random forest approach for precision diagnosis. En 2024 *International Conference on Automation and Computation (AUTOCOM)* (pp. 210-214). Dehradun, India. <https://doi.org/10.1109/AUTOCOM60220.2024.10486169>
- Laddha, S. V. (2023). IoT-based automated hydroponic cultivation system: a step toward smart agriculture for sustainable environment. En A. Mishra, D. Gupta, y G. Chetty (eds.), *Advances in IoT and security with computational intelligence* (pp. 61-74). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-5085-0_7
- Montoya-Muñoz A. I., y Caicedo-Rendón, O. M. (2020). An approach based on fog computing for providing reliability in iot data collection: a case study in a Colombian coffee smart farm. *Applied Sciences*, 10(24), 8904. <https://doi.org/10.3390/app10248904>
- Montoya-Muñoz, A. I., Da Silva, R. A., Caicedo-Rendón, O. M., y Da Fonseca, N. L. (2022). Reliability provisioning for fog nodes in smart farming IoT-fog-cloud continuum. *Computers and Electronics in Agriculture*, 200, 107252. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107252>
- Nguyen, V. D., Pham, T. C., Le, C. H., Huynh, T. T., Le, T. H., y Packianather, M. (2023). An innovative and smart agriculture platform for improving the coffee value chain and supply chain. En T. D. L. Nguyen, y J. Lu (eds.), *Machine learning and mechanics based soft computing applications. Studies in computational intelligence* (vol. 1068, pp. 185-197). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6450-3_19
- Ossa Duque, S. I. (2017). Monitoreo y control de variables ambientales mediante una red inalámbrica para agricultura de precisión en invernaderos. *Revista Vector*, 12, 51-60. <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/vector/article/view/236>
- Parada Molina, P. C., Gómez Martínez, M. J., Ortiz Ceballos, G. C., Cerdán Cabrera, C. R., y Cervantes Pérez, J. (2020). Fenómenos meteorológicos y su efecto sobre la producción de

café en la zona central de Veracruz. *UVserva: Revista Electrónica de la Coordinación Universitaria de Observatorios de la Universidad Veracruzana*, (9), 47-58. <https://doi.org/10.25009/uvs.v0i9.2638>

Rodríguez, J. P., Montoya-Muñoz, A. I., Rodríguez-Pabón, C., Hoyos, J., y Corrales, J. C. (2021). IoT-agro: a smart farming system to Colombian coffee farms. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190. 106442. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106442>

Singh, G., y Sharma, S. (2024). A comprehensive review on the Internet of Things in precision agriculture. *Multimedia Tools and Applications*. <https://doi.org/10.1007/s11042-024-19656-0>

Sinha, B. B., y Dhanalakshmi, R. (2022). Recent advancements and challenges of internet of things in smart agriculture: a survey. *Future Generation Computer Systems*, 126, 169-184. <https://doi.org/10.1016/j.future.2021.08.006>

Varshitha, D., y Choudhary, S. (2022). Soil fertility and yield prediction of coffee plantation using machine learning technique. *Research Journal of Agricultural Sciences*, 13(2), 514-518. https://www.researchgate.net/publication/359993485_Soil_Fertility_and_Yield_Prediction_of_Coffee_Plantation_using_Machine_Learning_Technique



CONTENIDO

- Alcance y política editorial de la revista
- Tipos de artículos aceptados
- Formato del artículo
- Envío de artículos
- Procedimiento para la publicación
- Arbitraje de artículos
- Contacto

ALCANCE Y POLÍTICA EDITORIAL DE LA REVISTA

La revista *Tecnura* es una publicación institucional de la Facultad Tecnológica de la Universidad Francisco José de Caldas, de carácter científico-tecnológico con periodicidad trimestral, que se publica los meses de enero, abril, julio y octubre. Su primer número apareció en el segundo semestre del año 1997 y hasta la fecha ha mantenido su regularidad.

Las áreas temáticas de interés de la revista *Tecnura* están enfocadas a todos los campos de la ingeniería, como la electrónica, telecomunicaciones, electricidad, sistemas, industrial, mecánica, catastral, civil, ambiental, entre otras. Sin embargo, no se restringe únicamente a estas, también tienen cabida los temas de educación y salud, siempre y cuando estén relacionados con la ingeniería. La revista publica únicamente artículos de investigación científica y tecnológica, de reflexión y de revisión. En consecuencia, durante la fase de evaluación editorial inicial se rechazarán los artículos cortos y reportes de caso.

La revista *Tecnura* está dirigida a docentes, investigadores, estudiantes y profesionales interesados en la actualización permanente de sus conocimientos y el seguimiento de los procesos de investigación científico-tecnológica, en el campo de las ingenierías. Tiene como misión divulgar resultados de proyectos de investigación realizados en el área de las ingenierías, a través de la publicación de artículos originales e inéditos, realizados por académicos y profesionales pertenecientes a instituciones nacionales o extranjeras del orden público o privado. Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés; sin embargo, tendrán preferencia los artículos que muestren conceptos innovadores de gran interés, que traten sobre asuntos relacionados con el objetivo y cobertura temática de la revista.

Tecnura es una publicación de carácter académico indexada en los Índices Regionales Scielo Colombia (Colombia) y Redalyc (México), además de las siguientes bases bibliográficas: INSPEC del

Institution of Engineering and Technology (Inglaterra), Fuente Académica Premier de EBSCO (Estados Unidos), CABI (Inglaterra), Index Corpernicus (Polonia), Informe Académico de Gale Cengage Learning (México), Periódica de la Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (España) y Dialnet de la Universidad de la Rioja (España). También hace parte de los siguientes directorios: Sistema Regional de Información en Línea para Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal Latindex (México), Índice Bibliográfico Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (España), DOAJ (Suecia), Ulrich de Proquest (Estados Unidos).

Tecnura es una revista arbitrada mediante un proceso de revisión entre pares de doble ciego. La periodicidad de la conformación de sus comités Científico y Editorial está sujeta a la publicación de artículos en revistas indexadas internacionalmente por parte de sus respectivos miembros.

La Universidad Distrital Francisco José de Caldas, sus directivas, el Editor, el Comité Editorial y Científico no son responsables por la opinión y criterios expresados en el contenido de los artículos y estos se publican bajo la exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento del Comité Editorial.

Además de la versión impresa, la revista Tecnura tiene también una versión digital disponible en su página web: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

TIPOS DE ARTÍCULOS ACEPTADOS

De acuerdo con la clasificación del Índice Nacional de Publicaciones Científicas y Tecnológicas

(Publindex-Colciencias), la revista Tecnura recibe postulaciones de artículos inéditos de los siguientes tipos:

Artículos de investigación científica y tecnológica: documento que presenta, de manera detallada, los resultados originales de proyectos de investigación. La estructura generalmente utilizada contiene cuatro apartes importantes: introducción, metodología, resultados y conclusiones.

Artículo de revisión: documento resultado de una investigación donde se analizan, sistematizan e integran los resultados de las investigaciones publicadas o no publicadas, sobre un campo en ciencia o tecnología, con el fin de dar cuenta de los avances y las tendencias de desarrollo. Se caracteriza por presentar una cuidadosa revisión bibliográfica de al menos 50 referencias.

FORMATO DEL ARTÍCULO

Del lenguaje y estilo apropiado para la redacción de artículos

- Deben emplearse estructuras de oraciones simples, evitando las que sean demasiado largas o complejas.
- El vocabulario empleado debe ser básico y común. Los términos técnicos deben explicarse bre-

vemente; asimismo, el significado de las siglas debe presentarse la primera vez que estas aparecen en el texto.

- Los autores son responsables de que su trabajo sea conducido de una manera profesional y ética.

De la extensión de los documentos

Los artículos no deben tener una extensión de más de 25 páginas en tamaño carta y a doble espacio, con márgenes simétricas de 3 cm. Solo en el caso de los artículos de revisión las 25 páginas no incluyen las referencias bibliográficas.

Del formato de presentación

Los artículos presentados deben ser trabajos inéditos escritos en español o inglés y deben digitarse en Microsoft Word (2003 en adelante), cumpliendo con las siguientes indicaciones:

Letra *Times New Roman* de 12 puntos (a excepción de que se requiera lo contrario para algunos apartados).

- Una columna a doble espacio.
- Todas las márgenes de 3 cm.
- Los párrafos se justifican, y no debe haber espacio entre los consecutivos.
- No incluir saltos de página o finales de sección.
- Si se desea resaltar palabras o frases del texto, no usar letra negrita sino letra cursiva.
- Los decimales se deben señalar con coma (,) y no con un punto.
- Los millares y millones se deben señalar con un espacio fino.
- Evitar las notas de pie de página.
- Se debe utilizar nomenclatura arábica hasta el tercer nivel únicamente.

De la estructura del documento

Los trabajos deben tener la siguiente estructura y cumplir con los siguientes requisitos:

Composición de un artículo

Todos los artículos remitidos para su evaluación y posible publicación por parte de la revista *Tecnura* deben tener por lo menos los siguientes componentes:

- Título en español e inglés.
- Información de los autores.
- Resumen en español e inglés.
- Palabras clave en español e inglés.
- Introducción.
- Conclusiones.
- Trabajo futuro (opcional).
- Agradecimientos (opcional).
- Referencias bibliográficas.

Si el artículo es de investigación científica y tecnológica deben tener, además de lo anterior, los siguientes componentes:

- Metodología.
- Resultados.
- Financiamiento.

Título

El título del artículo deberá ser corto o dividido en título y subtítulo, atractivo para el lector potencial y escrito en mayúscula sostenida. Este debe aparecer centrado entre las márgenes, escrito con letra *Times New Roman*, en negrita, tamaño de fuente 18. El título del artículo debe ir en español e inglés separado por un espacio doble. Máximo 20 palabras.

Autores

Después del título debe escribirse el (los) nombre(s) completo(s) del (los) autor(es), acompañado de los datos biográficos básicos: título de pregrado, título de posgrado, ocupación o cargo, afiliación institucional (institución donde labora), dependencia, ciudad, país y correo electrónico. La información anterior debe ir inmediatamente debajo del nombre del autor.

Resumen

Debe establecer el objetivo y alcance del trabajo, una descripción clara y concisa de la metodología, los resultados y las conclusiones obtenidas. Máximo 250 palabras.

Palabras clave

Debe escogerse entre tres y diez palabras clave, escritas en español con letra *Times New Roman*, en negrita y cursiva.

Las palabras clave deben estar escritas en orden alfabético y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar el tesoro de la UNESCO que se pueden encontrar en la página: <http://databases.unesco.org/thessp>.

Abstract

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés del texto que aparece en el resumen en español.

Keywords

Debe ser una traducción correcta y precisa al idioma inglés de la lista de palabras clave en español.

Las *keywords* deben estar escritas en el orden de las palabras clave y ser de uso estandarizado, para lo cual se sugiere utilizar bases de datos internacionales según el área del conocimiento. Por ejemplo, en el área de Eléctrica y Electrónica se sugiere utilizar los Tesoros de la IEEE y/o World Bank que se pueden encontrar en las siguientes páginas respectivamente: http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf, <http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Introducción

Debe describir el planteamiento general del trabajo, así como contexto, antecedentes, estado de arte de la temática abordada, objetivo y posible alcance del trabajo.

Metodología

La redacción de este apartado debe permitir a cualquier profesional especializado en el tema replicar la investigación.

Resultados

Explicación e interpretación de los hallazgos. Si es necesario, se puede presentar una discusión breve y enfocada a la interpretación de los resultados.

Conclusiones

Implicación de los resultados y su relación con el objetivo propuesto.

Financiamiento

Mencionar la investigación asociada de la cual se derivó el artículo y la entidad que avaló y financió

dicha investigación.

Agradecimientos

Preferiblemente deben ser breves y deben incluir los aportes esenciales para el desarrollo del trabajo.

Ecuaciones

Deben aparecer centradas con respecto al texto principal. Las ecuaciones deben ser referenciadas con números consecutivos (escritos entre paréntesis cerca al margen derecho). Las ecuaciones se citan en el texto principal empleando la palabra ecuación y seguida del número entre paréntesis. Las ecuaciones deben ser elaboradas en un editor de ecuaciones apropiado y compatible con el paquete de software InDesign, por ejemplo, el editor de ecuaciones de Windows.

Tablas

Para el caso de realización de tablas se recomienda que estas no sean insertadas como imágenes, considerando que en este formato no pueden ser modificadas. El encabezado de cada tabla debe incluir la palabra Tabla (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de un breve nombre de la tabla. El encabezado debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9.

No se presentan cuadros sino tablas y estas se deben levantar automáticamente desde el procesador de textos. Las tablas deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda tabla debe tener en su parte inferior la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Figuras

Todas las figuras o fotografías deben enviarse en formato PNG o TIFF con una resolución mínima de 300 DPI, adaptadas a escala de grises.

El pie o rótulo de cada figura debe incluir la palabra Figura (en negrita) seguida del número consecutivo correspondiente y de una breve descripción del contenido de la figura. El pie de figura debe estar escrito con letra Times New Roman, en cursiva y tamaño de fuente 9. Las figuras deben ir nombradas y referenciadas en el artículo, en estricto orden. Toda figura debe tener también la fuente de la que fue tomada, o mencionar que es autoría de los autores si es el caso.

Símbolos

Los símbolos de las constantes, variables y funciones en letras latinas o griegas –incluidos en las ecuaciones– deben ir en cursiva; los símbolos matemáticos y los números no van en cursiva. Se deben identificar los símbolos inmediatamente después de la ecuación. Se deben utilizar las unidades,

dimensiones y símbolos del sistema internacional.

Cuando se empleen siglas o abreviaturas, se debe anotar primero la equivalencia completa, seguida de la sigla o abreviatura correspondiente entre paréntesis y en lo subsecuente se escribe solo la sigla o abreviatura respectiva.

Referencias bibliográficas

El estilo de citación de referencias adoptado por la revista *Tecnura* es APA sexta edición. Las citas, referencias bibliográficas e infografía se incluyen al final del artículo. Las referencias bibliográficas deben ordenarse alfabéticamente de acuerdo con el primer apellido del primer autor, sin numeración.

Solo deben aparecer las referencias que fueron citadas en el texto principal del trabajo, en las tablas o en las figuras. Es decir, en la lista no deben aparecer otras referencias aunque hayan sido consultadas por los autores para la preparación del trabajo. Sugerimos utilizar herramientas como: *Citas y bibliografía de Microsoft Word* (para APA sexta edición versión 2013 o superior), *Zotero*, *Mendeley*, entre otras.

El llamado de una referencia bibliográfica se inserta en el texto, en el punto pertinente, bajo ciertas características:

- Si la oración incluye el apellido del autor, solo se debe escribir la fecha dentro de un paréntesis, ejemplo:

Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en . . .

- Cuando no se incluye el autor en la oración, debe ir entre el paréntesis el apellido y la fecha. La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- Si el documento u obra tiene más de dos autores, se debe citar la primera vez con todos los apellidos. 1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008) . . .
- En las menciones siguientes, solo se debe escribir el primer apellido del autor, seguido de un "et al". En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que . . .
- Cuando el documento u obra tiene más de seis autores, se debe utilizar desde la primera mención el "et al".

A continuación se describen una serie de ejemplos de las referencias más utilizadas, según el estilo de referencias adoptado por la revista *Tecnura*:

Publicaciones Periódicas:

Forma Básica

Apellidos, A. A., Apellidos, B. B. & Apellidos, C. C. (Fecha). Título del artículo. Título de la publicación, volumen (número), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Artículo básico

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. *Revista Tecnura*, 18(42), 12-23. doi: <http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Artículo web

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. *Revista Tecnura*, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/article/view/8059/9675>

Libros:

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). Título. Ciudad: Editorial.

Apellidos, A. A. (Año). Título. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>

Apellidos, A. A. (Año). Título. doi: xx.xxxxxxxx

Apellidos, A. A. (Ed.). (Año). Título. Ciudad: Editorial.

Libro con autor

Goleman, D. (2000). *La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual*. México: Ediciones B.

Libro con editor

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). *Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales*. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas

Libro versión electrónica:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). *Psychology of Liberation: Theory and applications*. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/978-0-387-85784-8

Informe técnico

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). Título. (Informe Núm. xxx). Ciudad: Editorial

Informe con autores

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). *U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico. (General Technical Report IITF-40)*. San Juan: International Institute

of Tropical Forestry.

Informe de una agencia del gobierno

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Tesis

Forma Básica

Apellidos, A. A. (Año). Título. (Tesis inédita de maestría o doctorado). Nombre de la institución, Localización.

Tesis inédita, impresa

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Tesis de base de datos comercial

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Tesis web

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Estándares o patentes

Forma Básica

Apellidos, A. A. Título de la patente. País y número de la patente. Clasificación de la patente, fecha de concesión oficial. Número y fecha de solicitud de la patente, paginación.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

ENVÍO DE ARTÍCULOS

Los autores deben enviar sus artículos a través de la aplicación para tal fin del Open Journal System

en formato digital, adjuntando la carta de presentación y el formato de información artículo-autores.

Carta de presentación

El artículo debe ir acompañado de una carta de presentación dirigida al director y editor de la revista, Ing. Cesar Augusto García Ubaque, donde incluya:

- Solicitud expresa de considerar su artículo para publicarlo en la revista Tecnura.
- Título completo del trabajo.
- Nombres completos de todos los autores del trabajo.
- Certificación de la originalidad y el carácter inédito del trabajo.
- Exclusividad de su remisión a la revista Tecnura.
- Confirmación de la autoría con la firma de todos los autores.

Esta carta deberá estar firmada por todos los autores, escanearse y enviarse junto con los demás documentos solicitados.

Formato de información artículo-autores

El artículo además debe ir acompañado de un formato de información sobre el artículo y sus autores, el cual se puede descargar de la página web de la revista Tecnura: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>, en la sección “Formatos y Documentos”. Es importante completar todos los campos de información solicitados, algunos de ellos tienen comentarios para aclarar mejor lo que se está solicitando. El formato no debe escanearse.

Artículo

Artículo en formato digital (Word 2003 en adelante) que cumpla con todas las normas de presentación descritas en el capítulo 3, “Formato del artículo”, de la presente en las instrucciones a los autores.

PROCEDIMIENTO PARA LA PUBLICACIÓN

El procedimiento que sigue la revista Tecnura para la evaluación y posible publicación de los trabajos enviados por los autores es el siguiente en orden cronológico:

1. Envío del artículo acompañado de la carta de presentación y el formato de información por parte de los autores.
2. Notificación al autor de correspondencia de la recepción del artículo.
3. Verificación del tema del artículo con respecto a las áreas de interés de la revista.

4. Verificación de las normas de presentación por parte del monitor de la revista.
5. Notificación al autor de correspondencia de la evaluación de las normas de presentación.
6. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a la evaluación de las normas de presentación
7. Envío del artículo a los árbitros seleccionados.
8. Notificación del inicio del proceso de arbitraje del artículo.
9. Notificación a los autores de la decisión tomada por el Comité Editorial y de las evaluaciones hechas por los árbitros.
10. Envío de las correcciones realizadas por los autores con respecto a las evaluaciones de los árbitros.
11. Estudio de la versión final del artículo y de las evaluaciones de los árbitros por parte del Comité Editorial.
12. Envío por parte de los autores de la carta de cesión de derechos al editor de la revista.
13. Envío de la versión con corrección de estilo y diagramada a los autores.
14. Verificación de errores y aprobación final de la versión con corrección de estilo y diagramada por parte de los autores.
15. Publicación del artículo en el número correspondiente de la revista Tecnura.
16. Notificación a los autores de la publicación del número de interés.
17. Envío de un ejemplar de la revista a cada autor del artículo publicado.

PROCESO DE ARBITRAJE DE ARTÍCULOS

Considerando la periodicidad trimestral de la revista, el Comité Editorial realiza cuatro convocatorias anuales para la recepción de artículos, aproximadamente en los meses de febrero, mayo, agosto y noviembre. Los artículos serán recibidos hasta la fecha máxima establecida en cada convocatoria.

Una vez recibidos los artículos el monitor de la revista realizará una primera evaluación de forma para verificar que cumplan con todos los elementos mencionados en esta guía de instrucciones a los autores. Luego de recibir nuevamente el artículo con las correcciones de forma solicitadas por el monitor de la revista, este será sometido a evaluación por tres pares académicos (paulatinamente se espera incorporar un mayor número de pares externos que participen en el proceso).

Cada artículo remitido a la revista Tecnura es revisado por dos pares académicos externos a la institución de los autores, mediante un proceso de “revisión entre pares” (*Peer-review*) de doble-ciego, garantizando el anonimato de los autores y evaluadores; se considera confidencial todo trabajo recibido y así se le exige a sus evaluadores.

Las posibles conclusiones de los resultados de la evaluación por parte de los árbitros son únicamente tres: publicar el artículo sin modificaciones, publicar el artículo con modificaciones o no publicar el artículo.

Posteriormente, el Comité Editorial toma la decisión de publicar o no los artículos, con base en los resultados de las evaluaciones realizadas por los árbitros asignados. En caso de existir contradicciones en las evaluaciones con respecto a la publicación de un artículo, el Comité Editorial enviará el artículo a un tercer árbitro y se inclinará por las dos evaluaciones que tengan el mismo concepto respecto a la publicación del artículo.

En cada convocatoria el autor de correspondencia debe sugerir al menos cuatro posibles evaluadores externos a su institución laboral, los cuales deben ser especialistas en el tema específico del artículo remitido, tener al menos maestría y por lo menos dos deben ser internacionales. Los posibles evaluadores pueden pertenecer a una universidad o industria, pública o privada; de estos se debe proporcionar el nombre completo, su formación académica más alta, su afiliación institucional y su correo electrónico. Estos cuatro potenciales evaluadores serán analizados por el Comité Editorial a fin de ampliar la base de datos de los árbitros de la revista Tecnura.

El Comité Editorial de la revista Tecnura se reserva los derechos de impresión, reproducción total o parcial del artículo, así como el de aceptarlo o rechazarlo. Igualmente, se reserva el derecho de hacer cualquier modificación editorial que estime conveniente; en tal caso el autor recibirá por escrito recomendaciones de los evaluadores. Si las acepta, deberá entregar el artículo con los ajustes sugeridos dentro de las fechas fijadas por la revista para garantizar su publicación dentro del número programado.

CONTACTO

Para cualquier solicitud de información adicional puede comunicarse a través del correo electrónico de la revista Tecnura: tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com, o por mensajería con el Ing. Cesar Augusto García Ubaque, Director y Editor de la revista Tecnura, a la dirección:

Revista Tecnura
Sala de Revistas, Bloque 5, Oficina 305.
Facultad Tecnológica
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Transversal 70 B N. 73 a 35 sur
Teléfono: 571 – 3239300 Extensión: 5003



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Instrucciones para los autores

<https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/about/submissions>

Celular: 57-3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email:

tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Página web:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura>

CONTENT

- Scope and editorial policy of the journal
- Type of accepted articles
- Article format
- Article submission
- Publication procedure
- Article arbitration
- Contact

Tecnura journal is an institutional publication of the Faculty of Technology from University Francisco José de Caldas. It is a scientific and technological publication with quarterly periodicity, which is published in January, April, July and October. The first issue appeared in the second semester of 1997 and up to now it has maintained its regularity.

The areas of interest of Tecnura journal are focused on all engineering fields such as electronics, telecommunications, electricity, systems, industrial, mechanics, cadastral, civil, environmental, among others. However, it is not restricted to those; it also has room for education and health issues, as long as they are related to engineering. The journal will only publish concerning scientific and technological research, reflection and revision. In consequence, during the initial editorial evaluation, short articles and case reports will be rejected.

Tecnura Journal is addressed for professors, researchers, students and professionals interested in permanent update of their knowledge and follow-up of scientific-technologic processes in the field of engineering. Tecnura Journal has as mission to disseminate results of research projects in the areas of engineering, through the publication of original and unpublished articles, conducted by academics and professionals accredited by public or private national or foreign institutions. Articles submitted to Tecnura journal must be unpublished works written in Spanish or English; nevertheless, preference will be given to articles that show innovative concepts of great interest, related to the objective and scope of the journal.

Tecnura is an academic publication indexed in the Regional Index Scielo Colombia (Colombia) and Redalyc (México); as well as of the following bibliographic databases: INSPEC of the Institution of Engineering and Technology (England), Fuente Académica Premier of EBSCO (United States), CABI (England), Index Copernicus (Poland), Informe Académico of Gale Cengage Learning (México), Periódica from the Universidad Nacional Autónoma de México (México), Oceanet (Spain) and Dialnet from the Universidad de la Rioja (Spain). It is also part of the following directories: Online

Regional Information System for Scientific journals from Latin America, Caribbean, Spain and Portugal Latindex (México), Bibliographic Index Actualidad Iberoamericana (Chile), e-Revistas (Spain), DOAJ (Sweden) and Ulrich of Proquest (United States).

Tecnura is a journal arbitrated by a revision process among double blind peers. The schedule of the conformation of its scientific and editorial committee is subject to the publication of articles in internationally indexed journals by their members.

District University Francisco José de Caldas, its directors, the editor, the editorial and scientific committee are not responsible for the opinions and the criteria expressed in the content of the articles and they are published under the exclusive responsibility of the authors and do not necessarily reflect the ideas of the editorial committee.

In addition to the printed version, Tecnura journal also has a digital version available in its web page: <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>

TYPE OF ARTICLES ACCEPTED

According to the classification of the Scientific and Technological Publications National Index (Publindex-Colciencias), Tecnura journal receives nominations of unpublished articles on the following topics:

- **Scientific and technological research articles:** document that presents, in a detailed manner, the original results of research projects. The generally used structure contains four main parts: introduction, methodology, results and conclusions.
- **Reflection articles:** document that presents research results from an analytic, interpretative or critic perspective from the author, dealing with a specific topic and adopting original sources.
- **Review article:** document that results from a research where the results of published or unpublished research on a science or technology field are analyzed, systematized and integrated, in order to state the advances and tendencies in development. It is characterized for presenting a careful bibliographical review of at least 50 references.

ARTICLE FORMAT

About the appropriate language and style for articles writing

- Authors must use simple sentence structures, avoiding those too long or complex.
- The vocabulary used must be basic and common. Technical language must be briefly explained; also, the meaning of the acronyms must be given the first time they appear in the text.
- The authors are responsible for their work to be conducted in a professional and ethic manner.

About the length of articles

The articles should not exceed 25 pages in letter size and double space, with symmetric margins of 3 cm. Only in the case of review articles, these 25 pages do not include references.

About the presentation format

Submitted articles must be unpublished works written in Spanish or English, and must be typed in Microsoft Word (2003 and beyond), complying with the following indications:

- *Times New Roman* letter, 12 point (except it is required for some sections).
- One column, double-spaced.
- All the margins 3 cm.
- Paragraphs should be justified without spaces between consecutives and without cutting words.
- Do not include page breaks or section finals.
- If you want to emphasize words or phrases from the text, do not use bold letters but italic.
- Decimals should be pointed with comma (,) and not with period (.).
- Thousands and millions should be pointed with a fine space.
- Avoid footnotes.
- Arabic nomenclature must be used only until the third level.

About the article structure

The papers must have the following structure and comply with the following requirements:

Composition of an article

All the articles submitted for evaluation and possible publication by the Tecnura Journal must have at least the following components:

- Title in Spanish and English.
- Information about the authors.
- Abstract in Spanish and English.
- Key words in Spanish and English.
- Introduction.
- Conclusions.

- Future work (optional).
- Acknowledgements (optional).
- Bibliographical references.

If the article is related to scientific and technological research must have, in addition to the above, the following components:

- Methodology.
- Results.
- Financing.

Title

The title of the article must be short or divided in title and subtitle, attractive for the potential reader and written in capital letters. It should appear centered between the margins, written in *Times New Roman* letter, in bold, font size 18. The title of the article has to be in Spanish and English separated by double space. Maximum 20 words.

Authors

After the title the complete name(s) of the author(s) must be written, with their basic biographical data: undergraduate degree, graduate degree, occupation or position, institutional affiliation (institution where they work), dependency, city, country and e-mail. The above information must be immediately below the author's name.

Abstract

The scope and purpose of the work must be established giving a clear and concise description of the methodology, results presented and the conclusions obtained. Maximum of 250 words.

Keywords

Between three and ten keywords must be chosen, written in English with *Times New Roman* letter in bold and italic.

Key words must be written in alphabetic order and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the IEEE thesaurus and World Bank thesaurus that can be accessed at the following web pages respectively:

http://www.ieee.org/documents/2009Taxonomy_v101.pdf

<http://multites.net/mtsql/wb/site/default.asp>

Abstract in Spanish

Translation to the Spanish language of the text that appears in the abstract, it must be correct and precise.

Keywords in Spanish

Translation to the English language of the keywords in Spanish, they must be correct and precise.

Keywords must be written in the order of the English version and must be as standard as possible, for which it is suggested the use of international databases according to the area of knowledge. For example, in the area of Electrics and Electronics it is suggested to use the UNESCO thesaurus that can be found at the following web pages:

<http://databases.unesco.org/thessp>

Introduction

The general idea of the work must be described, its context, backgrounds, state of the art of the topic, objectives and possible scope of the work.

Methodology

The writing of this part must allow any specialized professional in the topic to replicate the research.

Results

Explanation and interpretation of the findings. If necessary, a brief discussion focused on the interpretation of the results can be presented.

Conclusions

Implication of the results and their relation to the proposed objective.

Financing

Mention the associated research from which the article was derived and the entity that endorsed and financed the research.

Acknowledgments

They should preferably be brief and include the essential contributions for the development of the paper.

Equations

Equations must appear centered with respect to the main text. They must be referenced with consecutive numbers (written in parenthesis close to the right margin). Equations are cited in the main text employing the word equation, and followed by the number in parenthesis. Equations must be made in an appropriate equation editor and compatible with "InDesign" software, as for example the equation editor of Windows.

Tables

In the case of implementation of tables, it is recommended that these are not inserted as images, considering that in that format they cannot be modified. The title of each table must include the word table (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief name of the table. The heading must be written in TNR letter, italic and font size 9.

Charts are not presented but tables and they should be automatically raised from the text processor. Tables should be named and referenced in the article, in strict order. Every table must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Figures

All the figures or pictures have to be sent in JPG or PNG format with a minimum resolution of 300 DPI, adapted to gray scale.

The footnote or name of each figure must include the word figure (in italic) followed by the corresponding consecutive number and a brief description of the content of the figure. The footnote of the figure must be written in Times New Roman letter, italic and font size 9. Figures must be named and referenced in the article, in strict order. Every figure must have at the bottom the source from which it was taken, or to mention self-authorship if it is the case.

Symbols

The symbols of the constants, variables and functions in Latin or Greek letters –included in the equations– must be in italic; the mathematical symbols and the numbers do not go in italic. The symbols must be identified immediately after the equation. Units, dimensions and symbols of the international system must be used.

When using acronyms or abbreviations, the complete equivalence should be written first, followed by the corresponding acronym or abbreviation in parenthesis and from there it is only written the respective acronym or abbreviation.

Bibliographic references

The adopted reference citation style by Tecnura journal is APA sixth edition. The cites, bibliographic references and infography are included in the last part of the article. The bibliographic references must be alphabetically ordered according to the author's first surname, without numbering.

There should only appear the cited references in the main body of the work, in tables or in figures. It means, in the list there should not appear other references although they have been consulted by the authors for the work preparation. We suggest using tools such as: Cites and bibliography from Microsoft Word (for APA sixth edition version 2013 or superior), Zotero, Mendeley, among others.

The call for a bibliographic reference is inserted in the text, at the pertinent point, under certain characteristics:

- If the sentence includes the author's surname, it should only be written the date into a parenthesis, for instance:
Cuando Vasco (2012), analizó el problema de presentado en
- When the author is not included in the sentence, surname and date must be into a parenthesis.
La investigación de materiales dio una visión en el área (Martínez, 2012).
- If the document or work has more than two authors, the first cite must include all the surnames.
1990. (Fernández Morales, Villa Krieg & Caro de Villa, 2008)
- In the following mentions, it must only be written the author's first surname, followed by "et al.". En cuanto al estudio de las aguas, Fernández Morales et al. (2008) encontraron que ...
- When the document or work has more than six authors, it must be used from the first mention "et al."

Next it is described a series of examples of the more used references, according to the reference style adopted by Tecnura journal:

Periodical Publications:

Basic Form

Surnames, A. A., Surnames, B. B. & Surnames, C. C. (Date). Article's title. Title of the publication, volume (number), pp. xx-xx. doi: xx.xxxxxxx

Basic article

Guevara López, P., Valdez Martínez, J., Agudelo González, J., & Delgado Reyes, G. (2014). Aproximación numérica del modelo epidemiológico SI para la propagación de gusanos informáticos, simulación y análisis de su error. Revista Tecnura, 18(42), 12-23. doi:<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2014.4.a01>

Web article

Rodríguez Páez, S., Fajardo Jaimes, A., & Páez Rueda, C. (2014). Híbrido rat-race miniaturizado para la banda ISM 2,4 GHZ. Revista Tecnura, 18(42), 38-52. Recuperado de <http://revistas.>

Books:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). Title. City: Editorial.

Surnames, A. A. (Year). Title. Recovered from <http://www.xxxxxx.xxx>

Surnames, A. A. (Year). Title. doi: xx.xxxxxxxx

Surnames, A. A. (Ed.). (Year). Title. City: Editorial.

Book with author

Goleman, D. (2000). La inteligencia emocional: Por qué es más importante que el cociente intelectual. México: Ediciones B.

Book with editor:

Castillo Ortiz, A. M. (Ed.). (2000). Administración educativa: Técnicas, estrategias y prácticas gerenciales. San Juan: Publicaciones Puertorriqueñas.

Book electronic version:

Montero, M. & Sonn, C. C. (Eds.). (2009). Psychology of Liberation: Theory and applications. [Versión de Springer]. doi: 10.1007/ 978-0-387-85784-8

Technical report:

Basic Form

Surnames, A. A. (Year). Title. (Report No. xxx). City: Editorial

Report with authors

Weaver, P. L., & Schwagerl, J. J. (2009). U. S. Fish and Wildlife Service refuges and other nearby reserves in Southwestern Puerto Rico. (General Technical Report IITF-40). San Juan: International Institute of Tropical Forestry.

Report from a Government agency

Federal Interagency Forum on Child and Family Statistics. America's Children: Key National Indicators of Well-Being, 2009. Washington, DC: U.S. Government Printing Office. Recuperado de <http://www.childstats.gov/pubs/index.asp>

Thesis

Basic form

Surnames, A. A. (Year). Title. (Unpublished master or doctorate thesis). Institution name, Location.

Unpublished thesis, printed

Muñoz Castillo, L. (2004). *Determinación del conocimiento sobre inteligencia emocional que poseen los maestros y la importancia que le adscriben al concepto en el aprovechamiento de los estudiantes*. (Tesis inédita de maestría). Universidad Metropolitana, San Juan, PR.

Commercial database thesis

Santini Rivera, M. (1998). *The effects of various types of verbal feedback on the performance of selected motor development skills of adolescent males with Down syndrome*. (Tesis doctoral). Disponible en la base de datos ProQuest Dissertations and Theses. (AAT 9832765).

Web thesis

Aquino Ríos, A. (2008). *Análisis en el desarrollo de los temas transversales en los currículos de español, matemáticas, ciencias y estudios sociales del Departamento de Educación*. (Tesis de maestría, Universidad Metropolitana). Recuperado de http://suagm.edu/umet/biblioteca/UMTESIS/Tesis_Educacion/ARAquinoRios1512.pdf

Standards or patents

Basic form

Surnames, A. A. Title of the patent. Country and number of the patente. Classification of the patent, date of official license. Number and date of patent request, pagination.

Hernández Suárez, C. A., Gómez Saavedra, V. A., & Peña Lote, R. A. Equipo medidor de indicadores de calidad del servicio de energía eléctrica para usuario residencial. Colombia., 655. G4F 10/0, 15 de Marzo 2013. 27 de Octubre 2011, 147

ARTICLE SUBMISSION

Authors must submit their articles through the application Open Journal System in digital format, attaching the cover letter and the article-authors format.

Cover letter

The article must be submitted with a cover letter addressed to the director and editor of the journal, Engineer Cesar Augusto Garcia Ubaque, including:

- Specific request to consider your article to be published in Tecnura journal.
- Full title of the article.
- Full names of all the authors of the paper.

- Certification of the originality and unpublished character of the paper.
- Exclusivity of submission to Tecnura journal.
- Authoring confirmation with signature of all the authors.

This letter must be signed by all the authors, scanned and sent with the remaining requested documents.

Article-authors information format

The article has to be submitted with an information format about the article and its authors which can be downloaded from the web page of Tecnura journal <http://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>, in the section "Forms and Documents". It is important to complete all the fields of information requested, some of them have comments to clarify better what is being requested. The format must not be scanned.

Article

Article in digital format (Word 2003 and later editions) that complies with all the presentation rules described in chapter three, "Article structure", of this guide of instructions for authors.

PUBLICATION PROCEDURE

The procedure to be followed by Tecnura journal for the evaluation and possible publication of the papers sent by the authors is the following in chronological order:

1. Delivery of the article with the cover letter and the information format by the authors.
2. Notification to the author about the reception of the article.
3. Verification of the presentation rules by the monitor of the journal.
4. Notification to the author about the evaluation of the presentation rules.
5. Submission of corrections made by the authors related to the evaluation of presentation rules.
6. Submission of the articles to the selected arbitrators.
7. Notification of the beginning of the arbitration process of the article.
8. Notification to the authors about the decision made by the editorial committee, and about the evaluations made by the arbitrators.
9. Delivery of the corrections made by the authors with respect to the evaluations made by the arbitrators.

10. Study of the final version of the article and the evaluations of the arbitrators by the editorial committee.
11. Delivery by the authors of the letter that surrenders right to the editor of the journal.
12. Submission of the version with style corrections and diagrammed to the authors.
13. Verification of errors and final approval of the version with style corrections and diagrammed by the authors.
14. Publication of the article in the corresponding number of Tecnura journal.
15. Notification to the authors of the number of interest.
16. Delivery of a copy of the journal to each one of the authors of the published article.

ARTICLE ARBITRATION PROCESS

Considering the quarterly periodicity of the journal, the Editorial Committee makes four calls every year for the submission of articles, approximately in the months of February, May, August and November. The articles will be received until the date established in the call.

Once received the articles, the monitor of the journal will make an initial form evaluation to verify the completion of the elements mentioned in this guide of instructions to authors. After receiving again the article with the requested corrections by the journal's monitor, the paper will be submitted to evaluation by three academic peers (through time it is expected to include more external peers to participate in the process).

Each article sent to Tecnura journal is checked by two expert academic peers external to the institution of the authors, by a process of "Peer-review" of double blind, guaranteeing the anonymity of authors and evaluators; every paper sent is considered confidential and so it is demanded to evaluators.

Possible conclusions of the result of the evaluation by the judges are only three: publish the article without modifications, publish the article with modifications and not publish the article.

Subsequently, the Editorial Committee takes the decision to publish or not the articles, based on the results of the evaluations made by the assigned arbitrators. In case of contradictions in the evaluations with respect to the publication of an article, the editorial committee will send the article to a third peer and will be inclined for the two evaluations that have the same concept with respect to the publication of the article.

In each call the main author must suggest at least four possible external arbitrators to his work institution evaluators, who must be specialists in the specific topic of the article sent and must have at least Masters level, and at least two must to be international. Potential evaluators can belong to

a university or industry, public or private; their complete names must be provided, highest academic formation, institutional affiliation and e-mail. The editorial committee will analyze these four potential evaluators in order to enrich the database of arbitrators of Tecnura journal.

The Editorial Committee of Tecnura journal reserves the right to print, reproduce total or partially the article, as the right to accept or reject it. In the same way, it has the right to make any editorial modification that considers necessary; in this case the author will receive written recommendations from the evaluators. If accepted, authors must deliver the article with the suggested adjustments within the dates given by the journal to guarantee its publication in the programmed number.

CONTACT

For any additional information request, please send an e-mail to Tecnura journal tecnura@udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com or by mail to Cesar Augusto Garcia Ubaque, Director and Publisher of Tecnura Journal, to the following address:

Tecnura Journal

Journals Room, Block 5, Office 305.

Faculty of Technology

Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Transversal 70 B N. 73 a 35 sur

Phone: 571-3239300 Extension: 5003

Mobile: 57-3153614852

Bogotá D.C., Colombia

Email:

tecnura.ud@correo.udistrital.edu.co, tecnura@gmail.com

Web page:

<https://revistas.udistrital.edu.co/ojs/index.php/Tecnura/index>