

Ciencia, tecnología e innovación aplicada para la transformación y el bienestar social

ISSN 2992-7315
Año 4 No. 8 Julio-Diciembre 2026

RICT

Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Edición Semestral volumen 4, número 8, julio-diciembre 2026

Ciencia, tecnología e innovación aplicadas para generar soluciones multidisciplinarias que impulsen la transformación digital, la educación, la salud, la sostenibilidad, la calidad y competitividad industrial, así como el bienestar social, fortaleciendo la vinculación entre conocimiento, tecnología y sociedad.

ISSN 2992-7315
9 772992 731002

DESDE 2023

https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026)

ISSN: 2992-7315

Volumen 4 – No. 8 – 2026

Semestral

ISSN: 2992-7315

Investigación Multidisciplinaria

Ciencia, tecnología e innovación aplicada para generar soluciones multidisciplinarias que impulsen la transformación digital, la educación, la salud, la sostenibilidad, la calidad y competitividad industrial, así como el bienestar social, fortaleciendo la vinculación entre conocimiento, tecnología y sociedad.

Comité Editorial

Leonardo Miguel Moreno Villalba
Editor en jefe
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
lmoreno@tese.edu.mx

Francisco Jacob Ávila Camacho
Editor asociado
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
fjacobavila@tese.edu.mx

Juan Manuel Stein Carrillo
Investigador
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
jmsteinc@tese.edu.mx

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, año 4, No. Regular 8, Julio-Diciembre 2026, es una Publicación semestral, indexada y arbitrada a doble ciego editada por el Instituto de Innovación y Cientas Aplicadas / Leonardo Miguel Moreno Villalba. Av. Valle de Guadiana 59, Col. Valle de Aragón 3ª Sección, Ecatepec de Morelos, Estado de México, C.P. 55280, Tel. (+52) 720 460 0897, https://rictrevista.org, rict.revista@gmail.com. Editor responsable: Leonardo Miguel Moreno Villalba. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo No. 04-2023-072413552000-102, ISSN: 2992-7315, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este Número Francisco Jacob Ávila Camacho, Av. Valle de Guadiana 59, Col. Valle de Aragón 3ª Sección, Ecatepec de Morelos, Estado de México, C.P. 55280, fecha de última modificación 10 de noviembre de 2025.

DESDE 2023

https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026)

ISSN: 2992-7315

Directorio

Leonardo Miguel Moreno Villalba
Editor en Jefe (Editor-in-Chief)
https://orcid.org/0000-0003-0937-3586
Francisco Jacob Ávila Camacho
Editor Asociado (Associate Editor)
https://orcid.org/0000-0002-0086-5827

Consejo Editorial (Editorial Board)

Dr. Adolfo Melendez Ramírez
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
https://orcid.org/0000-0002-4751-0089
Dr. Genaro Iván Cerón Montes
Universidad Tecnológica de Tecamac
https://orcid.org/0000-0002-1111-0307
Dr. Juan Manuel Stein Carrillo
Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec
https://orcid.org/0000-0003-3594-504X
Dr. José Alberto Hernández Aguilar
Universidad Autónoma del Estado de Morelos
https://orcid.org/0000-0002-5184-0005
Dr. Abraham Jorge Jiménez Alfaro
Tecnológico de Estudios Superiores de Chimalhuacan
https://orcid.org/0000-0003-3058-9082
M. en ISC. Roberto Carlos Muñoz Celaya
Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
Dra. Hilda María Torres Rodríguez
Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo
https://orcid.org/0009-0003-8671-4919
Dra. Mariana Zuleima Perez González
Estancias Postdoctorales por México, SECITHI, Ciudad de México
https://orcid.org/0000-0003-4662-2449

Comité Técnico Revisor para este número(Reviewer Board)

Dr. Emmanuel Tonatihu Juárez Velázquez
Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec
Dr. Carlos Alfonso Trejo Villanueva
Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec

DESDE 2023

https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026)

ISSN: 2992-7315

Dr. Isaac Israel Gutiérrez Villegas
Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec
Dra. María Luisa Lozano Camargo
Tecnológico de Estudios Superiores del Oriente del Estado de México
Dr. Erick Axel Padilla García
Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec
Dr. Dennys Fernandez Conde
Universidad Politécnica de Querétaro
Dr. Jesús de la Cruz Alejo
Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec
M. en C. Edgar Corona Organiche
Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec
Dr. Mario Ricardo Cruz Deviana
Universidad Nacional Autónoma de México, FES Aragón
Dr. Abraham Jorge Jiménez Alfaro
Tecnológico de Estudios Superiores de Chimalhuacan
Dr Derlis Hernández Lara
Universidad Nacional Autónoma de México / CUAED
Dra. Susana Lezama Álvarez
Tecnológico de Estudios Superiores de Coacalco
Dr Arturo Aguilar Pérez
Universidad Nacional Autónoma de México, FES Aragón
M en C Sergio Esteban Moreno Vázquez
Instituto Politécnico Nacional

DESDE 2023

https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026)

ISSN: 2992-7315

Contenido

Editorial i

Artículos de Investigación

1. **Modelo de detección de textos generados con inteligencia artificial y generación de propuestas de retroalimentación pedagógica.**
   Mario Alberto Camarillo Cabrera 1

2. **Evaluación del Impacto de la Implementación de norma ISO 9001:2015 Sistemas de Administración de Calidad Total en las Empresas Metalmecánica.**
   Sara Lizeth Pérez Lagunas, Hilda Rojas Chávez, Luis Enrique Hernández Dorado 7

3. **Implementación de un sistema de visión artificial para el fortalecimiento del aseguramiento de calidad y liberación de piezas en procesos de inyección de plásticos.**
   Arturo Aguilar Pérez, Ricardo Vázquez Ortíz, José Daniel Castro Díaz, Blanca Gabriela Cuevas González, María de la Luz Delgadillo Torres, Wenceslao Cuauhtémoc Bonilla Blancas 15

4. **Clasificación experimental de movimientos mediante IoT para el estudio del temblor asociado a la enfermedad de Parkinson.**
   Andres Felipe Orduz Pérez, Cesar Augusto Romero Molano, Luis Ángel Lavado Matias 25

5. **Diseño, construcción y validación funcional de un deshidratador solar sustentable utilizando materiales recuperados.**
   Alexander Uceta Lantigua 32

6. **Gestión digital de olimpiadas académicas: experiencia piloto en educación preuniversitaria.**
   María de la Luz Delgadillo Torres, Mariana Bárcenas Castañeda, Blanca Gabriela Cuevas González , Arturo Aguilar Pérez 43

7. **Análisis comparativo de algoritmos de árboles de decisión para la predicción de tratamientos en lesiones óseas de muñeca.**
   Edgar Corona Organiche, Brandon Moya Bucio, Abraham-Jorge Jiménez-Alfaro, Griselda Cortés-Barrera, Norma-Karen Valencia-Vázquez 63

8. **Caracterización inicial del agua recogida por el sistema de Cosecha de lluvia del CETIS 119 T.M.**
   Victor Hugo Martínez Flores, JAVIER NORBETO GUTIERREZ VILLEGAS, LUIS ANTONIO MENDEZ SANCHEZ, GELSYS MORAIMA HERNANDEZ GARCIA, HECTOR ARTEAGA HERNANDEZ 72

DESDE 2023

https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026)

ISSN: 2992-7315

9. **Diseño e Implementación de un Prototipo Experimental de Hardware para Monitoreo Atmosférico Inalambrico Basado en Arduino® y Protocolo IEEE 802.15.4.**
Rodriguez-Ortiz, Morales-Morales, Franco-Baltazar, Lopez-Navarro, Meziat-Castro..... 77

Artículos de Revisión

10. **Optimizadores estocásticos adaptativos en la visión computacional: una revisión sistemática.**
Marcela de los Ángeles Yanes-Pérez, José Adán Hernández-Nolasco, Miguel A. Wister 88

11. **Nanotecnología aplicada al área médica: un análisis de las patentes concedidas en México en el periodo 2000-2026**
Roberto Soto Vázquez, Edgar Zayago Lau 100

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. X1 – X2

ISSN: 2992-7315

Editorial.

Francisco-Jacob Ávila-Camacho [a, b]

[a] Centro de Cooperación Academia Industria, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55280, Ecatepec, Estado de México, México.
[b] División de Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico Nacional de México / TES Ecatepec, 55280, Ecatepec, Estado de México, México.

Resumen

Con este octavo número, RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación cierra un ciclo más de su cuarto volumen y reafirma su vocación de servir como espacio de diálogo entre la academia, la industria y la sociedad. La edición reúne once contribuciones, dos artículos de revisión y nueve de investigación, elaboradas por equipos de instituciones de México, Colombia y República Dominicana. El hilo que las une está en el título de la edición: ciencia, tecnología e innovación aplicadas a problemas concretos, cuyo valor se mide por su capacidad de transformar entornos productivos, educativos, sanitarios y ambientales, y de contribuir al bienestar de las personas.

Palabras clave: Tecnología al servicio de la salud, sustentabilidad, visión por computadora, procesos educativos

Abstract

With this eighth issue, RICT Journal of Scientific, Technological, and Innovation Research concludes another cycle of its fourth volume, reaffirming its commitment to serving as a forum for dialogue among academia, industry, and society. This edition brings together eleven contributions—two review articles and nine research papers—authored by teams from institutions in Mexico, Colombia, and the Dominican Republic. The common thread linking them is reflected in the issue's title: science, technology, and innovation applied to concrete problems—work whose value is measured by its capacity to transform productive, educational, healthcare, and environmental settings, and to contribute to human well-being.

.

Keywords: Technology in the service of health, sustainability, computer vision, educational processes

1. Introducción

1.2. Tecnología al servicio de la salud

Tres trabajos abordan el campo de la salud desde ángulos complementarios. Orduz Pérez et al. (2026) desarrollan un sistema de bajo costo basado en TinyML e Internet de las Cosas para el estudio del temblor asociado a la enfermedad de Parkinson; con un microcontrolador ESP32, un sensor de movimiento MPU6050 y un sensor electromiográfico, clasifican las señales en tres categorías (sin temblor, temblor leve y temblor intenso) y obtienen con Random Forest un desempeño de 96 % en exactitud, precisión, sensibilidad y F1, con un modelo que opera en tiempo real sobre el propio dispositivo.

En el ámbito del apoyo a la decisión clínica, Corona Organiche et al. (2026) comparan los algoritmos de árboles de decisión ID3 y C4.5 para recomendar tratamientos en lesiones óseas de muñeca, a partir de los registros retrospectivos de 3,360 pacientes atendidos en 2023 y 2024. El algoritmo C4.5 alcanzó una exactitud de 99.98 % y un AUC-ROC de 0.94, y generó reglas clínicas legibles en las que la severidad de la lesión ocupa la raíz del árbol. Los autores subrayan, con acierto, que el modelo requiere validación externa y que debe complementar, no sustituir, el juicio médico.

Desde la perspectiva de la gestión tecnológica, Soto Vázquez y Zayago Lau (2026) analizan las 448 patentes de nanomedicina concedidas en México entre 2000 y 2026. Su estudio revela que cerca del 76 % pertenece a titulares extranjeros y que más de la mitad se refiere a medicamentos y a la administración de agentes terapéuticos. La conclusión es un llamado a fortalecer las capacidades tecnológicas

*Autor para la correspondencia: editor@ccaitese.com
Correo electrónico: editor@ccaitese.com (Francisco-Jacob Ávila-Camacho).

Historial del manuscrito: recibido el 24/11/2026, última versión-revisada recibida el 21/11/2026, aceptado el 24/11/2026, publicado el 24/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.24507415

nacionales en un campo con gran potencial para atender los problemas de salud del país.

1.3. Inteligencia artificial, visión computacional y calidad industrial

La revisión sistemática de Yanes-Pérez et al. (2026), realizada bajo el protocolo PRISMA, sintetiza 79 estudios (de 701 registros iniciales) sobre el comportamiento de los optimizadores estocásticos adaptativos en tareas de visión computacional. Aunque Adam fue el comparador más frecuente (97.5 % de los estudios), resultó el de mejor desempeño solo en 24.7 % de sus evaluaciones, frente a 64.7 % de AdamW y 60.7 % de AdaGrad. El trabajo identifica además un predominio de las imágenes médicas (60.8 %) y una presencia aún escasa de los Vision Transformers (17.7 %), y concluye que no existe un optimizador universalmente superior, por lo que su elección debe sustentarse en pruebas empíricas.

Esa misma tecnología encuentra aplicación directa en la planta productiva. Aguilar Pérez et al. (2026) proponen un sistema de visión artificial para fortalecer el aseguramiento de calidad y la liberación de piezas en procesos de inyección de plásticos. Mediante cámaras industriales, iluminación controlada y algoritmos de análisis de imagen, el diseño busca detectar rebabas, rechupes, deformaciones y variaciones dimensionales con criterios objetivos de aceptación y rechazo, reducir la subjetividad de la inspección manual y sentar las bases para esquemas de Industria 4.0 y manufactura inteligente.

En la misma línea de mejora de procesos, Perez Lagunas et al. (2026) evalúan el impacto de la norma ISO 9001:2015 en una empresa del sector metalmecánico. Al comparar indicadores antes y después de su adopción (tasa de defectos, tiempo de ciclo, tiempos muertos, productividad y satisfacción del cliente), documentan una disminución de los productos no conformes, menores tiempos de retrabajo y mejoras en la productividad y en el acceso a mercados que exigen certificación. Los autores advierten que estos beneficios dependen del compromiso de la dirección, la capacitación continua y una cultura orientada a la mejora.

1.4. Innovación en los procesos educativos

Dos artículos se ocupan de la educación. Camarillo Cabrera (2026) propone un modelo de detección de textos generados por modelos de lenguaje que, en lugar de limitarse a una función punitiva, produce retroalimentación pedagógica para el estudiante. La propuesta combina procesamiento del lenguaje natural y estilometría con estrategias de evaluación formativa de corte socioconstructivista, con el propósito de reducir los falsos positivos y fortalecer la escritura académica y el pensamiento crítico.

Por su parte, Uceta Lantigua (2026) documenta la experiencia piloto del primer sistema digital integrado para la gestión de olimpiadas académicas en la Regional de Educación 15 (Santo Domingo III), en República Dominicana, desarrollado como módulo del sistema SIGACOM. En la primera Olimpiada de Lengua Española 2026, con 96 estudiantes de seis distritos educativos y 89 centros, la fase de aplicación pasó de una jornada completa a menos de media jornada y los resultados estuvieron disponibles en menos de 24 horas. El caso aporta evidencia de que la innovación evaluativa es viable en contextos educativos públicos latinoamericanos con infraestructura limitada.

1.5. Sustentabilidad, agua y monitoreo ambiental

El número se completa con tres trabajos vinculados con el ambiente y el aprovechamiento responsable de los recursos. Delgadillo Torres et al. (2026) diseñan, construyen y validan un deshidratador solar elaborado con remanentes industriales recuperados (policarbonato, acero inoxidable y piezas metálicas). Las pruebas en exterior con rodajas de manzana mostraron un funcionamiento estable, una temperatura interna superior a la ambiental y una reducción gradual de la humedad mediante circulación natural de aire, lo que confirma la viabilidad de los materiales recuperados en este tipo de dispositivos.

Martínez Flores et al. (2026) presentan la caracterización inicial del agua captada por el sistema de cosecha de lluvia del CETIS 119, que almacena el agua pluvial en dos cisternas de 5,000 litros y beneficia a 1,430 estudiantes, 54 docentes y 48 trabajadores administrativos. El trabajo plantea como siguiente etapa el diseño de un prototipo de tratamiento que haga apta el agua para consumo humano, y muestra cómo los planteles educativos pueden convertirse en laboratorios de soluciones ante la escasez hídrica.

Finalmente, Rodriguez Ortiz et al. (2026) diseñan e implementan un prototipo de estación de monitoreo atmosférico inalámbrico, basado en Arduino Nano, diez sensores comerciales y un radio XBee S1 bajo el protocolo IEEE 802.15.4. La unidad transmisora mide variables como temperatura, humedad relativa, calidad del aire, presión atmosférica, índice UV, viento y precipitación con un consumo de 0.36 W, alimentada por un panel solar de 2 W y una batería de ion de litio, y alcanzó un enlace de 65 m con línea de vista. Se trata de una plataforma asequible para la telemetría ambiental en lugares sin conectividad a internet.

1.6. Una mirada de conjunto

Leídos en conjunto, los once artículos dejan ver tres rasgos que distinguen a la investigación aplicada que RICT busca promover. El primero es la apuesta por soluciones de bajo costo y alta pertinencia local: microcontroladores, sensores comerciales, materiales recuperados y sistemas de información desarrollados a la medida de las instituciones que los utilizan. El segundo es una visión responsable de la inteligencia artificial, que se valora por su capacidad de explicar sus decisiones, de apoyar y no reemplazar el juicio de médicos y docentes, y de elegirse con base en evidencia empírica y no por inercia. El tercero es la orientación hacia el bienestar social y la sustentabilidad, visible en el cuidado de la salud, la calidad de los procesos productivos, la equidad educativa y el uso responsable del agua y la energía. A ello se

suma la colaboración entre instituciones de educación media superior y superior, centros tecnológicos y universidades de distintos países, que constituye una de las mayores fortalezas de esta edición.

El Comité Editorial agradece a las autoras y los autores por confiar sus trabajos a la revista, a las personas evaluadoras por su lectura rigurosa y generosa, y al equipo editorial por hacer posible esta publicación. Invitamos a la comunidad académica a leer, citar y discutir estos artículos, y a seguir enviando contribuciones que, desde la ciencia, la tecnología y la innovación, contribuyan a transformar la realidad de nuestras comunidades.

2. Referencias

Aguilar Pérez, A., Vázquez Ortíz, R., Castro Díaz, J. D., Cuevas González, B. G., Delgadillo Torres, M. de la L., & Bonilla Blancas, W. C. (2026). Implementación de un sistema de visión artificial para el fortalecimiento del aseguramiento de calidad y liberación de piezas en procesos de inyección de plásticos. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 15–24. https://doi.org/10.5281/zenodo.23129583

Camarillo Cabrera, M. A. (2026). Modelo de detección de textos generados con inteligencia artificial y generación de propuestas de retroalimentación pedagógica. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 1–6. https://doi.org/10.5281/zenodo.23127130

Corona Organiche, E., Moya Bucio, B., Jiménez-Alfaro, A.-J., Cortés-Barrera, G., & Valencia-Vázquez, N.-K. (2026). Análisis comparativo de algoritmos de árboles de decisión para la predicción de tratamientos en lesiones óseas de muñeca. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 63–71. https://doi.org/10.5281/zenodo.23929595

Delgadillo Torres, M. de la L., Bárcenas Castañeda, M., Cuevas González, B. G., & Aguilar Pérez, A. (2026). Diseño, construcción y validación funcional de un deshidratador solar sustentable utilizando materiales recuperados. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 32–42. https://doi.org/10.5281/zenodo.23193599

Martínez Flores, V. H., Gutierrez Villegas, J. N., Mendez Sanchez, L. A., Hernandez Garcia, G. M., & Arteaga Hernandez, H. (2026). Caracterización inicial del agua recogida por el sistema de cosecha de lluvia del CETIS 119 T.M.. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 72–76. https://doi.org/10.5281/zenodo.24118658

Orduz Pérez, A. F., Romero Molano, C. A., & Lavado Matias, L. Á. (2026). Clasificación experimental de movimientos mediante IoT para el estudio del temblor asociado a la enfermedad de Parkinson. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 25–31. https://doi.org/10.5281/zenodo.23193092

Perez Lagunas, S. L., Rojas Chávez, H., & Hernández Dorado, L. E. (2026). Evaluación del impacto de la implementación de norma ISO 9001:2015 sistemas de administración de calidad total en las empresas metalmecánica. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 7–14. https://doi.org/10.5281/zenodo.23129348

Rodriguez Ortiz, J. G., Morales Morales, C., Franco Baltazar, Á. A., López Navarro, I. E., & Meziat Castro, L. P. (2026). Diseño e implementación de un prototipo experimental de hardware para monitoreo atmosférico inalámbrico basado en Arduino® y protocolo IEEE 802.15.4. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 77–87. https://doi.org/10.5281/zenodo.24502597

Soto Vázquez, R., & Zayago Lau, E. (2026). Nanotecnología aplicada al área médica: Un análisis de las patentes concedidas en México en el periodo 2000-2026. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 100–106. https://doi.org/10.5281/zenodo.24504130

Uceta Lantigua, A. (2026). Gestión digital de olimpiadas académicas: Experiencia piloto en educación preuniversitaria. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 43–62. https://doi.org/10.5281/zenodo.23264360

Yanes-Pérez, M. de los Á., Hernández-Nolasco, J. A., & Wister, M. A. (2026). Optimizadores estocásticos adaptativos en la visión computacional: Una revisión sistemática. RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación, 4(8), 88–99. https://doi.org/10.5281/zenodo.24503641.

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 1 – 6

ISSN: 2992-7315

Modelo de detección de textos generados con inteligencia artificial y generación de propuestas de retroalimentación pedagógica.
Model for detecting artificial intelligence-generated texts and generating pedagogical feedback proposals.

Mario Alberto Camarillo Cabrera

Maestría en Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.

Resumen

La expansión de la inteligencia artificial generativa en la educación superior ha intensificado la necesidad de distinguir entre escritura académica humana, escritura asistida y textos producidos automáticamente. Sin embargo, los detectores disponibles presentan limitaciones técnicas, sesgos lingüísticos y riesgos éticos cuando se usan como instrumentos sancionadores. Este artículo propone un modelo conceptual de detección y retroalimentación pedagógica orientado a textos académicos en español. La propuesta integra procesamiento del lenguaje natural, rasgos estilométricos, clasificación algorítmica e interpretación pedagógica para convertir señales de posible generación automática en recomendaciones formativas. El trabajo no reporta todavía un corpus experimental cerrado ni métricas empíricas de desempeño; por ello, sus resultados se presentan como diseño metodológico, arquitectura funcional y protocolo de validación. El aporte principal consiste en articular la detección técnica con retroalimentación descriptiva, diagnóstica y prescriptiva, de modo que la herramienta apoye la autoría académica, la revisión de textos y la integridad educativa sin sustituir el juicio docente.

Palabras clave: inteligencia artificial generativa, detección de textos, retroalimentación formativa, escritura académica, procesamiento del lenguaje natural.

Abstract

The expansion of generative artificial intelligence in higher education has increased the need to distinguish between human academic writing, AI-assisted writing, and automatically generated texts. However, current detectors show technical limitations, linguistic bias, and ethical risks when used as punitive instruments. This paper proposes a conceptual model for detecting AI-generated academic texts in Spanish and producing pedagogical feedback. The proposal integrates natural language processing, stylometric features, algorithmic classification, and pedagogical interpretation to transform signals of possible automatic generation into formative recommendations. The study does not yet report a closed experimental corpus or empirical performance metrics; therefore, the results are presented as a methodological design, functional architecture, and validation protocol. The main contribution is the articulation of technical detection with descriptive, diagnostic, and prescriptive feedback, so the tool may support academic authorship, text revision, and educational integrity without replacing teachers' professional judgment.

Keywords: generative artificial intelligence, text detection, formative feedback, academic writing, natural language processing.

1. Introducción

La inteligencia artificial generativa ha modificado de manera acelerada las condiciones de producción, revisión y evaluación de textos académicos. En el ámbito universitario, los modelos de lenguaje extensos permiten generar borradores, resúmenes, explicaciones, paráfrasis y respuestas argumentativas con un nivel de fluidez que dificulta distinguir cuándo un texto expresa una construcción autoral propia y cuándo reproduce una salida automatizada. Esta situación no solo introduce un problema técnico de clasificación textual, sino también un problema pedagógico: si la detección se usa únicamente para sancionar, se corre el riesgo de producir acusaciones injustas, debilitar la confianza institucional y desaprovechar una oportunidad para enseñar escritura académica, pensamiento crítico y uso responsable de la tecnología.

La literatura reciente advierte que la detección automática de textos generados por IA no debe asumirse como evidencia definitiva. Existen métodos basados en probabilidad,

*Autor para la correspondencia: 202510890@tese.edu.mx
Correo electrónico: 202510890@tese.edu.mx (Mario-Alberto-Camarillo-Cabrera).
Historial del manuscrito: recibido el 11/04/2026, última versión-revisada recibida el 29/05/2026, aceptado el 01/06/2026, publicado el 05/10/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.23127130

curvatura, rasgos estilométricos y clasificadores supervisados, pero su desempeño depende del idioma, el dominio, la longitud del texto, el modelo generador, la edición humana posterior y las condiciones del corpus. Además, los detectores comerciales suelen operar con baja transparencia metodológica, lo cual complica la reproducibilidad y la interpretación de sus resultados en contextos educativos.

En este marco, el presente artículo propone un modelo conceptual para analizar textos académicos en español y generar retroalimentación pedagógica. El énfasis no está en sustituir la evaluación docente ni en emitir veredictos automáticos, sino en diseñar una arquitectura que permita identificar señales lingüísticas relevantes y traducirlas en orientaciones útiles para la mejora de la escritura. La propuesta se ubica en una fase de diseño metodológico y validación preliminar conceptual; por tanto, no se presentan métricas experimentales definitivas ni se afirma la existencia de un sistema entrenado en producción.

Enunciado del problema

Las instituciones de educación superior enfrentan dificultades para responder al uso de inteligencia artificial generativa en tareas escritas. Por un lado, necesitan proteger la integridad académica y promover la autoría auténtica; por otro, deben evitar prácticas de vigilancia algorítmica que generen falsos positivos o decisiones sancionadoras sin evidencia suficiente. El problema central consiste en que la mayoría de las soluciones de detección se concentran en clasificar un texto como “humano” o “generado por IA”, pero no explican de manera pedagógica qué rasgos del texto requieren revisión ni cómo el estudiante puede mejorar su escritura.

En el caso de textos en español, el reto se amplía debido a la menor disponibilidad de corpus documentados, la variabilidad regional del idioma, la diversidad de géneros académicos y la falta de validaciones públicas comparables. La ausencia de un enfoque integrado provoca que la detección sea técnicamente frágil y pedagógicamente limitada. En consecuencia, se requiere un modelo que combine análisis lingüístico, interpretación contextual y retroalimentación formativa, sin presentar la clasificación algorítmica como prueba absoluta.

Objetivo y alcance

El objetivo del trabajo es diseñar un modelo conceptual de detección de textos generados con inteligencia artificial y generación de propuestas de retroalimentación pedagógica para textos académicos en español. El alcance se limita a la definición de arquitectura, módulos funcionales, flujo de datos, criterios de análisis lingüístico, lógica de retroalimentación y protocolo de evaluación futura. No se reporta entrenamiento final de un clasificador, repositorio de código, corpus validado ni resultados estadísticos concluyentes; esos elementos quedan definidos como líneas de validación empírica posterior.

2. Estado del arte

La detección de texto generado por IA se ha desarrollado mediante aproximaciones diversas. Un primer grupo utiliza clasificadores supervisados entrenados con textos humanos y textos sintéticos; su ventaja es la posibilidad de aprender patrones específicos del corpus, pero su principal debilidad es la dependencia del conjunto de entrenamiento. Cuando el dominio, idioma o modelo generador cambian, el desempeño puede deteriorarse. Un segundo grupo emplea señales probabilísticas del propio modelo de lenguaje, como la predictibilidad, la entropía o la curvatura de la probabilidad. DetectGPT, por ejemplo, plantea que los textos generados por modelos tienden a ubicarse en regiones de curvatura negativa de la función de log-probabilidad, lo que permite una detección sin entrenar un clasificador independiente.

A pesar de estos avances, la literatura muestra límites relevantes. Los detectores pueden fallar ante paráfrasis, edición humana ligera, traducción, textos breves o estilos de escritura muy estandarizados. También se han reportado sesgos contra escritores no nativos del inglés, lo cual es especialmente importante para comunidades académicas multilingües. En educación, este riesgo implica que un sistema de detección no debe convertirse en juez automático, porque una clasificación errónea puede afectar la trayectoria de un estudiante.

Además, investigaciones recientes sobre integridad académica y evaluación de detectores advierten que la IA generativa puede producir textos plausibles pero difíciles de verificar, y que las herramientas de detección presentan resultados variables según el modelo generador, el género textual y las condiciones de evaluación (Cotton et al., 2024; Elkhatat et al., 2023; Gao et al., 2023; Perkins, 2023). Por ello, el estado del arte coincide en que los detectores no deben emplearse como única evidencia sancionadora, sino como instrumentos de apoyo sujetos a revisión humana y criterios pedagógicos explícitos.

Desde la perspectiva educativa, la discusión no puede reducirse a identificar fraude. La IA generativa puede apoyar procesos de planeación, explicación y revisión, pero también exige criterios de transparencia, alfabetización digital y responsabilidad académica. Las recomendaciones internacionales insisten en una visión centrada en las personas, con reglas institucionales claras, protección de datos y formación docente y estudiantil. Por ello, una herramienta de detección útil para educación debe explicar sus límites, evitar decisiones punitivas automáticas y contribuir al aprendizaje.

En el campo de la retroalimentación, la evidencia pedagógica destaca que los comentarios más efectivos son específicos, oportunos, comprensibles y orientados a la mejora. La retroalimentación formativa debe ayudar al estudiante a responder tres preguntas: hacia dónde va, cómo está avanzando y qué acciones puede realizar después. Desde el aprendizaje autorregulado, esta información permite revisar estrategias, reconocer errores recurrentes y planear mejoras. En consecuencia, el vacío que atiende esta propuesta no es únicamente técnico; consiste en vincular la detección lingüística con una intervención pedagógica explícita.

Tabla 1: Síntesis de trabajos relacionados y aportación de la propuesta.

Línea de trabajo	Aporte principal	Limitación para este estudio	Respuesta propuesta
Detectores probabilísticos y de curvatura	Identifican señales estadísticas asociadas a texto generado por LLM.	Pueden depender del modelo generador y de condiciones específicas de prueba.	Usar la señal técnica como indicio, no como veredicto final.
Clasificadores supervisados	Permiten entrenar modelos con rasgos lingüísticos y corpus etiquetados.	Requieren corpus documentado y validación por idioma y dominio.	Definir protocolo de corpus en español antes de reportar métricas.
Críticas a detectores comerciales	Evidencian fragilidad, sesgo y baja transparencia.	Dificultan replicar resultados y justificar decisiones educativas.	Exigir explicabilidad, revisión humana y comunicación de incertidumbre.
Retroalimentación formativa	Orienta al estudiante hacia acciones concretas de mejora.	No siempre se integra con análisis computacional.	Convertir rasgos detectados en comentarios descriptivos y prescriptivos.

Fuente: elaboración propia a partir del alcance metodológico del estudio.

3. Materiales y Método

El estudio se plantea como una investigación aplicada de diseño y desarrollo tecnológico en fase conceptual. La metodología se organiza en cuatro etapas: revisión documental, diseño de arquitectura funcional, especificación de criterios lingüísticos y pedagógicos, y propuesta de protocolo de validación. Esta reformulación es necesaria porque el manuscrito no documenta todavía un corpus experimental cerrado, un modelo entrenado verificable ni resultados reproducibles. En lugar de presentar hallazgos estadísticos no comprobados, el artículo delimita una arquitectura evaluable y un plan de validación futuro.

Diseño general de la solución propuesta

La solución propuesta opera como un sistema modular. El texto académico ingresa al sistema, se normaliza, se segmenta y se representa mediante características lingüísticas. Posteriormente, un módulo de clasificación o puntuación estima señales de posible generación automática. El resultado técnico se interpreta junto con información contextual del género académico, la longitud del texto y el propósito de escritura. Finalmente, un módulo pedagógico convierte los rasgos observados en recomendaciones de mejora. La Figura 1 resume esta arquitectura.

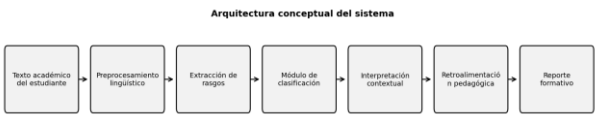


Figura 1: Arquitectura conceptual del sistema propuesto. Fuente: elaboración propia.

Módulos funcionales

El primer módulo corresponde al ingreso y preprocesamiento. Su función es recibir el texto, normalizar caracteres, eliminar ruido mínimo, segmentar oraciones y preparar unidades de análisis. El segundo módulo extrae rasgos lingüísticos y estilométricos, tales como longitud promedio de oración, diversidad léxica, repetición de conectores, densidad nominal, presencia de afirmaciones genéricas, patrones de cohesión y variación sintáctica. Estos rasgos no deben interpretarse de manera aislada, porque un texto humano también puede mostrar regularidad y un texto generado puede ser editado posteriormente.

El tercer módulo corresponde a la clasificación o puntuación. En una futura implementación, este componente podría entrenarse con aprendizaje supervisado o calibrarse mediante reglas ponderadas y revisión experta. En el estado actual del artículo, se define como componente metodológico, no como modelo empírico ya validado. El cuarto módulo realiza la interpretación contextual para evitar decisiones binarias. El quinto módulo genera retroalimentación pedagógica en tres niveles: descriptivo, al explicar qué se observa; diagnóstico, al señalar por qué puede afectar la calidad académica; y prescriptivo, al proponer acciones de reescritura.

Tabla 2: Componentes técnicos y pedagógicos del modelo conceptual.

Módulo	Entrada	Proceso	Salida
Preprocesamiento	Texto del estudiante	Normalización, segmentación y tokenización	Texto preparado para análisis
Extracción de rasgos	Texto segmentado	Cálculo de rasgos léxicos, sintácticos y discursivos	Vector de características
Clasificación o puntuación	Vector de características	Estimación de señales de posible generación automática	Puntuación interpretable, no concluyente
Interpretación contextual	Puntuación y metadatos académicos	Análisis por género, longitud y propósito del texto	Nivel de riesgo y advertencias
Retroalimentación	Rasgos y nivel de riesgo	Generación de comentario descriptivo, diagnóstico y prescriptivo	Reporte formativo para revisión

Fuente: elaboración propia a partir del alcance metodológico del estudio.

Representación formal del análisis

Para evitar una ecuación ambigua, el modelo se expresa como una función de puntuación que recibe una representación lingüística del texto. Sea t el texto analizado y sea φ(t) el vector de características lingüísticas y estilométricas extraídas. La función fθ representa el clasificador o mecanismo de puntuación que deberá calibrarse en la fase empírica. La salida pIA no debe leerse como certeza absoluta, sino como una estimación condicionada al modelo, al corpus y a los criterios de validación.

$$pIA = f\theta(\varphi(t)) \qquad (1)$$

En la ecuación (1), t representa el texto de entrada, φ(t) corresponde al vector de rasgos calculados, θ denota los parámetros del modelo o los criterios de calibración, y pIA indica una puntuación de probabilidad o riesgo de generación

automática. Dado que el artículo no documenta un entrenamiento empírico final, θ y pIA se presentan como parte de la arquitectura metodológica, no como resultados medidos.

Descripción algorítmica

Algoritmo 1: Proceso conceptual de detección y retroalimentación.

Entrada: texto académico t
Salida: reporte formativo R
1. Normalizar t y segmentarlo en oraciones y unidades léxicas.
2. Calcular φ(t): rasgos léxicos, sintácticos, discursivos y estilométricos.
3. Estimar pIA = fθ(φ(t)) o una puntuación de riesgo equivalente.
4. Identificar rasgos relevantes: repetición, generalidad, baja evidencia, cohesión débil.
5. Interpretar la puntuación según género textual, extensión y propósito académico.
6. Generar retroalimentación descriptiva: "qué se observa".
7. Generar retroalimentación diagnóstica: "por qué afecta la calidad del texto".
8. Generar retroalimentación prescriptiva: "qué puede reescribirse y cómo".
9. Devolver R sin emitir sanción automática ni reemplazar la revisión docente.

Fuente: elaboración propia. El algoritmo describe el flujo metodológico y no implica una implementación ya validada en producción.

Protocolo de evaluación propuesto

La validación futura debe separar la evaluación técnica de la evaluación pedagógica. La evaluación técnica requiere un corpus documentado con textos humanos, textos generados por modelos de lenguaje, textos asistidos por IA y textos editados por humanos. Cada muestra debe registrar idioma, género textual, longitud, fuente, condiciones de generación, criterios éticos y consentimiento cuando corresponda. Sobre ese corpus podrán calcularse exactitud, precisión, exhaustividad y F1; sin embargo, estos indicadores solo deberán reportarse cuando exista una matriz de confusión verificable.

La evaluación pedagógica debe revisar si la retroalimentación es clara, específica, útil y no punitiva. Para ello se propone una revisión por expertos en escritura académica y educación superior, además de una prueba piloto con estudiantes bajo consentimiento informado. La Figura 2 presenta el flujo metodológico previsto para esa validación.



Figura 2: Flujo metodológico de validación futura. Fuente: elaboración propia.

4. Resultados

El resultado principal del trabajo es una arquitectura conceptual evaluable que integra detección lingüística y retroalimentación pedagógica sin presentar la clasificación algorítmica como evidencia definitiva. Esta contribución es de diseño metodológico y no de validación experimental final.

Resultado 1: arquitectura funcional trazable

La arquitectura propuesta permite trazar cada salida del sistema hacia un módulo específico. Esta trazabilidad es relevante porque evita que el reporte final sea una etiqueta opaca. En lugar de afirmar únicamente "texto generado por IA", el modelo identifica rasgos observables y los relaciona con acciones de revisión. La Figura 3 muestra el ciclo pedagógico esperado después del análisis técnico.

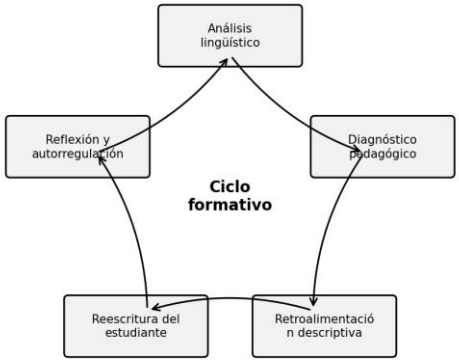


Figura 3: Ciclo de retroalimentación pedagógica. Fuente: elaboración propia.

Resultado 2: criterios de retroalimentación

La propuesta organiza la retroalimentación en tres capas. La capa descriptiva comunica el rasgo observado sin juicio moral; por ejemplo, repetición de conectores de cierre o afirmaciones generales sin evidencia. La capa diagnóstica explica el efecto de ese rasgo en la calidad académica del texto. La capa prescriptiva propone una acción concreta: incorporar evidencia, matizar una afirmación, variar la estructura sintáctica, precisar conceptos o vincular el argumento con fuentes.

Tabla 3: Conversión de rasgos lingüísticos en retroalimentación formativa.

Rasgo observado	Interpretación pedagógica	Retroalimentación sugerida
Repetición de conectores conclusivos	Puede indicar cierre artificial o falta de desarrollo argumentativo.	Revisar la progresión del argumento y conservar solo conectores necesarios.
Afirmaciones generales sin evidencia	Debilita la validez académica del texto.	Agregar ejemplo, dato, cita o justificación vinculada con la disciplina.
Homogeneidad extrema en longitud de oraciones	Puede reducir naturalidad y variedad discursiva.	Alternar estructuras, integrar explicaciones y matices propios.
Vocabulario grandilocuente sin precisión conceptual	Produce apariencia de profundidad sin sustento.	Sustituir términos generales por conceptos definidos y verificables.

Fuente: elaboración propia a partir del alcance metodológico del estudio.

Resultado 3: ejemplo cualitativo de funcionamiento

Para ilustrar la salida esperada se utiliza un fragmento didáctico construido para el artículo. El ejemplo no forma parte de un corpus experimental ni permite calcular métricas. Su función es mostrar cómo una señal lingüística puede transformarse en retroalimentación formativa.

Texto de entrada: "En conclusión, la inteligencia artificial es una herramienta trascendental que revoluciona todos los sectores de la sociedad moderna. Por lo tanto, las nuevas

generaciones deben adoptarla para alcanzar mejores resultados en el futuro".

Lectura técnica: el fragmento presenta conectores conclusivos acumulados, afirmaciones amplias sin evidencia y léxico valorativo poco preciso. Estos rasgos pueden coincidir con patrones de escritura generada o asistida por IA, pero no constituyen prueba suficiente de autoría automática.

Retroalimentación pedagógica: "El párrafo comunica una idea general, pero necesita evidencia y precisión. Revisa qué sector, contexto o caso quieres explicar. En lugar de afirmar que la IA 'revoluciona todos los sectores', incorpora un ejemplo verificable, delimita el alcance de tu afirmación y explica con tus propias palabras por qué ese ejemplo sostiene tu argumento".

Resultado 4: esquema de evaluación

La propuesta queda lista para una siguiente fase de validación que combine criterios técnicos, pedagógicos y éticos. El diseño evita reportar porcentajes o métricas no comprobadas; en su lugar, define qué evidencias deberán recabarse para sostener una evaluación robusta. La Figura 4 sintetiza los tres planos de evaluación.



Figura 4: Esquema de evaluación técnica, pedagógica y ética. Fuente: elaboración propia.

5. Discusión

La propuesta coincide con la literatura que cuestiona el uso de detectores automáticos como instrumentos sancionadores. Los estudios sobre sesgo y confiabilidad muestran que la clasificación de autoría generada por IA puede variar según idioma, estilo de escritura, edición posterior y condiciones de evaluación. En consecuencia, el modelo planteado adopta una postura prudente: el análisis técnico se entiende como indicio que debe interpretarse, no como dictamen definitivo.

Frente a enfoques centrados solo en detección, el aporte de este trabajo es integrar una capa pedagógica explícita. Esta capa responde a la necesidad de que el estudiante comprenda qué aspectos del texto debe mejorar. Así, la detección deja de funcionar como una etiqueta cerrada y se convierte en una oportunidad para fortalecer autoría, argumentación y revisión crítica. Esta orientación resulta compatible con modelos de retroalimentación formativa y aprendizaje autorregulado, donde el objetivo es promover acciones de mejora y no únicamente calificar el producto final.

La principal limitación es que el artículo aún no cuenta con una validación empírica completa. Por ello, no se sostienen cifras de precisión, F1, AUC, tasas de falsos positivos ni comparaciones cuantitativas con detectores comerciales. La discusión se limita a la pertinencia del diseño, su coherencia con la literatura y las condiciones necesarias para validar el prototipo. Esta delimitación fortalece la honestidad científica del manuscrito y reduce el riesgo de sobreafirmar resultados inexistentes.

6. Conclusiones

El artículo presenta un modelo conceptual para detectar señales de textos generados con inteligencia artificial y transformarlas en retroalimentación pedagógica. La contribución central consiste en articular procesamiento del lenguaje natural, rasgos estilométricos, interpretación contextual y comentarios formativos para apoyar la escritura académica en español.

La revisión realizada permite concluir que la detección automática no debe emplearse como prueba única de autoría ni como mecanismo sancionador aislado. Su valor educativo aumenta cuando se comunica con transparencia, reconoce incertidumbre y ofrece al estudiante rutas concretas de mejora. En ese sentido, el modelo propuesto privilegia la formación, la autorregulación y la integridad académica por encima de la vigilancia automática.

Como trabajo futuro, será necesario construir un corpus documentado en español, definir criterios de etiquetado, implementar el prototipo, calcular métricas técnicas verificables y evaluar la utilidad pedagógica de la retroalimentación mediante revisión experta y pruebas piloto con estudiantes. Solo después de esa validación podrán reportarse resultados cuantitativos de desempeño. Esta ruta permitirá avanzar hacia una herramienta responsable, reproducible y útil para contextos universitarios hispanohablantes.

7. Referencias

Bender, E. M., Gebru, T., McMillan-Major, A., Shmitchell, S., (2021). On the dangers of stochastic parrots: Can language models be too big? Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency, 610-623. DOI: 10.1145/3442188.3445922

Boud, D., Molloy, E., (2013). Rethinking models of feedback for learning: The challenge of design. Assessment & Evaluation in Higher Education 38(6), 698-712. DOI: 10.1080/02602938.2012.691462

Cotton, D. R. E., Cotton, P. A., Shipway, J. R., (2024). Chatting and cheating: Ensuring academic integrity in the era of ChatGPT. Innovations in Education and Teaching International 61(2), 228-239. DOI: 10.1080/14703297.2023.2190148

Elkhatat, A. M., Elsaid, K., Almeer, S., (2023). Evaluating the efficacy of AI content detection tools in differentiating between human and AI-generated text. International Journal for Educational Integrity 19, 17. DOI: 10.1007/s40979-023-00140-5

Gao, C. A., Howard, F. M., Markov, N. S., Dyer, E. C., Ramesh, S., Luo, Y., Pearson, A. T., (2023). Comparing scientific abstracts generated by ChatGPT to real abstracts with detectors and blinded human reviewers. npj Digital Medicine 6, 75. DOI: 10.1038/s41746-023-00819-6

Hattie, J., Timperley, H., (2007). The power of feedback. Review of Educational Research 77(1), 81-112. DOI: 10.3102/003465430298487

Hyland, K., Hyland, F., (2006). Feedback on second language students' writing. Language Teaching 39(2), 83-101. DOI: 10.1017/S0261444806003399

Kasneci, E., Sessler, K., Küchemann, S., Bannert, M., Dementieva, D., Fischer, F., Gasser, U., Groh, G., Günnemann, S., Hüllermeier, E., Krusche, S., Kutyniok, G., Michaeli, T., Nerdel, C., Pfeffer, J., Poquet, O., Sailer, M., Schmidt, A., Seidel, T., Stadler, M., Weller, J., Kuhn, J., Kasneci, G., (2023). ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. Learning and Individual Differences 103, 102274. DOI: 10.1016/j.lindif.2023.102274

Liang, W., Yuksekgonul, M., Mao, Y., Wu, E., Zou, J., (2023). GPT detectors are biased against non-native English writers. Patterns 4(7), 100779. DOI: 10.1016/j.patter.2023.100779

Miao, F., Holmes, W., (2023). Guidance for generative AI in education and research. UNESCO.

Mitchell, E., Lee, Y., Khazatsky, A., Manning, C. D., Finn, C., (2023). DetectGPT: Zero-shot machine-generated text detection using probability curvature. Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning, 24950-24962.

Nicol, D. J., Macfarlane-Dick, D., (2006). Formative assessment and self-regulated learning: A model and seven principles of good feedback practice. Studies in Higher Education 31(2), 199-218. DOI: 10.1080/03075070600572090

Perkins, M., (2023). Academic integrity considerations of AI large language models in the post-pandemic era: ChatGPT and beyond. Journal of University Teaching & Learning Practice 20(2). DOI: 10.53761/1.20.02.07

Shute, V. J., (2008). Focus on formative feedback. Review of Educational Research 78(1), 153-189. DOI: 10.3102/0034654307313795

Weber-Wulff, D., Anohina-Naumeca, A., Bjelobaba, S., Foltýnek, T., Guerrero-Dib, J., Popoola, O., Šigut, P., Waddington, L., (2023). Testing of detection tools for AI-generated text. International Journal for Educational Integrity 19, 26. DOI: 10.1007/s40979-023-00146-z

Zimmerman, B. J., (2002). Becoming a self-regulated learner: An overview. Theory Into Practice 41(2), 64-70. DOI: 10.1207/S15430421TIP4102_2

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 7 – 14

ISSN: 2992-7315

Evaluación del Impacto de la Implementación de norma ISO 9001:2015 Sistemas de Administración de Calidad Total en las Empresas Metalmecánica
Evaluation of the Impact of Implementing ISO 9001:2015 Total Quality Management Systems in Metalworking Companies

Sara Lizerh Pérez Lagunas, Hilda Rojas Chávez, Luis Enrique Hernández Dorado

Maestría en Ingeniería en Sistemas Computacionales, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.

Resumen

La presente investigación evalúa el impacto de la implementación de la norma ISO 9001:2015 en la eficiencia operativa y la competitividad de una empresa del sector metalmecánico. Mediante un enfoque documental y cuantitativo, se analizaron indicadores clave antes y después de la adopción del sistema de gestión de calidad, tales como tasa de defectos, tiempo de ciclo, tiempo de inactividad, productividad y satisfacción del cliente. Los resultados muestran una disminución significativa de productos no conformes, reducción en tiempos de reproceso y mejora en la productividad operativa. Asimismo, se observó un incremento en la satisfacción del cliente y mayores oportunidades de acceso a mercados que exigen certificación. Se concluye que la implementación de ISO 9001:2015 no solo fortalece el control y la estandarización de procesos, sino que también contribuye al posicionamiento competitivo de las empresas metalmecánicas, siempre que exista compromiso directivo, capacitación continua y una cultura organizacional orientada a la mejora continua.

*Palabras clave***:** ISO 9001:2015, Sector metalmecánico, gestión de calidad, eficiencia operativa, competitividad.

Abstract

This research evaluates the impact of implementing ISO 9001:2015 on the operational efficiency and competitiveness of a company in the metalworking sector. Using a documentary and quantitative approach, key indicators were analyzed before and after the adoption of the quality management system, such as defect rate, cycle time, downtime, productivity, and customer satisfaction. The results show a significant decrease in nonconforming products, reduced rework times, and improved operational productivity. Likewise, an increase in customer satisfaction and greater opportunities to access markets that require certification were observed. It is concluded that the implementation of ISO 9001:2015 not only strengthens process control and standardization, but also contributes to the competitive positioning of metalworking companies, provided that there is management commitment, continuous training, and an organizational culture oriented toward continuous improvement.

Keywords: ISO 9001:2015, metalworking sector, quality management, operational efficiency, competitiveness.

1. Introducción

En un entorno industrial caracterizado por la globalización, la alta exigencia de los clientes y la necesidad de mejorar de manera continua, las organizaciones buscan modelos de gestión que les permitan estandarizar sus procesos y elevar su desempeño. En este contexto, la norma ISO 9001:2015 se consolida como uno de los referentes internacionales más utilizados para el diseño, implementación y mejora de los sistemas de gestión de la calidad, al promover el enfoque al cliente, el liderazgo, la toma de decisiones basada en evidencia y la mejora continua.

La literatura especializada señala que la implementación de ISO 9001:2015 favorece la reducción

Sara Lizeth Perez Lagunas
Correo electrónico: 202410930@tese.edu.mx
ORCID iD: 0009-0005-9844-3073

Historial del manuscrito: recibido el 18/05/2026, última versión-revisada recibida el 22/07/2026, aceptado el 29/07/2026, publicado el 5/10/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.23129348

de desperdicios, la mejora del control de procesos y el incremento de la satisfacción del cliente. La propia Organización Internacional de Normalización indica que esta norma ayuda a las empresas a establecer procesos eficaces, fortalecer la confianza de los clientes y mejorar sus resultados operativos. De manera complementaria, estudios en el sector manufacturero mexicano muestran que el liderazgo y el enfoque al cliente constituyen factores críticos para una adopción exitosa, mientras que la resistencia al cambio, la escasa participación de la alta dirección y las debilidades en la documentación representan barreras frecuentes. En el caso del sector metalmecánico, estas exigencias adquieren especial relevancia debido a la precisión técnica, la trazabilidad y el cumplimiento normativo que demandan sus procesos productivos.

A pesar de estos avances, todavía se conoce de manera limitada cómo impacta la implementación de la norma ISO 9001:2015 en la eficiencia operativa y en la competitividad de empresas metalmecánicas mexicanas analizadas desde estudios de caso concretos. Gran parte de los trabajos previos describe beneficios generales de la certificación o aborda al sector manufacturero en conjunto, por lo que persiste un área de oportunidad para examinar con mayor detalle los cambios que se producen en indicadores como la tasa de defectos, el tiempo de ciclo, la productividad, la satisfacción del cliente y el posicionamiento competitivo. Esta ausencia de evidencia aplicada dificulta comprender con precisión hasta qué punto la norma trasciende el cumplimiento documental y se traduce en mejoras observables dentro de la operación cotidiana.

Por ello, la presente investigación analiza el caso de Lagoons Precision Machinery S.A. de C.V. y tiene como objetivo evaluar el impacto de la implementación de la norma ISO 9001:2015 en la eficiencia operativa y la competitividad de una empresa del sector metalmecánico, con el fin de identificar las mejoras generadas en sus procesos, en sus indicadores clave de desempeño y en su capacidad para responder a las exigencias del entorno industrial.

1.1. Industrial Metalmecánica

> "La industria metalmecánica constituye uno de los sectores estratégicos para el desarrollo industrial, debido a que suministra maquinaria, componentes, herramientas y productos metálicos utilizados en cadenas productivas como la automotriz, aeroespacial, minera, energética, de la construcción y manufacturera. Su actividad se basa en la transformación de metales y aleaciones mediante procesos de mecanizado, soldadura, fundición y fabricación de precisión, los cuales requieren altos niveles de control, trazabilidad y cumplimiento de especificaciones técnicas.
>
> Debido a las exigencias de calidad impuestas por clientes nacionales e internacionales, las empresas metalmecánicas enfrentan la necesidad de optimizar continuamente sus procesos productivos para reducir defectos, minimizar desperdicios y garantizar la conformidad de sus productos. En este contexto, la implementación de sistemas de gestión de la calidad, como la norma ISO 9001:2015, representa una estrategia para fortalecer la estandarización de procesos, mejorar la eficiencia operativa y aumentar la competitividad de las organizaciones del sector."

1.2. Objetivo de la industria metalmecánica

La industria metalmecánica tiene como objetivo principal convertir la materia prima metálica en productos intermedios y finales, tales como láminas, alambres, placas, repuestos, autopartes, receptores de radio y tuercas. Esta transformación se realiza con el fin de abastecer a otras industrias y contribuir a la cadena productiva, proporcionando bienes de consumo y herramientas metálicas especializadas. Además, la industria metalmecánica se caracteriza por su complejidad en los procesos y requiere de una alta precisión por parte de los operadores especializados

Las empresas de este ramo requieren tener la certificación de ISO 9001-2015 para poder ser proveedores de empresas transnacionales, ya da la certeza que como proveedor manejan las calibraciones de equipos de medición en donde se puede evitar un defecto y asegura la mejora continua en sus procesos y cuentan una trazabilidad desde que entra la pieza que se va a reparar o desde que entra el material en bruto que se va a transformar en lo que requiere el cliente (The Quality Alliance , 2023)

1.3. Sistema de Gestión de la Calidad

Un Sistema de Gestión de Calidad (SGC) es un conjunto de procedimientos diseñados para mejorar la eficiencia y promover la calidad en una organización. Guiando a las empresas en la normalización y mejora de los controles de calidad en procesos clave, un SGC se basa en políticas, procesos y responsabilidades definidos para aumentar la satisfacción del cliente. Este sistema incluye planeación, control y mejora continua para cumplir con los requisitos y superar las expectativas de los clientes (ISO, 2024).

Los Sistemas de Gestión de Calidad (SGC) son esenciales en la competitiva economía global actual, siendo un requisito indispensable para el éxito sostenible. Un SGC eficaz permite satisfacer consistentemente las expectativas de los consumidores y ofrecer productos y servicios con el mínimo desperdicio. Además, un SGC digitalizado ahorra tiempo a las organizaciones, reduce

riesgos y disminuye la probabilidad de errores humanos. (ISO, 2024).

Los SGC pueden seguir normas como ISO 9001:2015, ampliamente reconocida para la gestión de calidad. La implementación de un Sistema de Gestión de Calidad (SGC) según esta norma exige una planificación y ejecución cuidadosas, y debe estar diseñado para cumplir con las normativas y reglamentos del sector, incorporando medidas robustas de seguridad digital para proteger los datos.

Un SGC es crucial para mejorar el rendimiento, asegurar la calidad y aumentar la satisfacción del cliente en cualquier empresa. En 2008, la ISO publicó la norma ISO 9001:2008, centrada en la imagen que los clientes tienen de la organización. Según Herrera (2008), esta norma tiene tres componentes: administración, sistema de calidad y aseguramiento de la calidad.

El primer componente se refiere a la administración, que utiliza un método para alcanzar las metas estratégicas de la organización mediante acciones correctivas y preventivas.

El segundo componente del Sistema de Gestión de Calidad requiere que los procedimientos y gestiones de cambios se documenten en un manual para mantener una base de datos actualizada acorde con las circunstancias actuales de la empresa.

El tercer componente es el aseguramiento de la calidad, enfocado en la mejora continua y verificación del cumplimiento de las expectativas del cliente.

En 2015, la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) presentó la versión actual de la norma ISO 9001:2015, la cual enfatiza que el Sistema de Gestión de Calidad no es un fin en sí mismo, sino una herramienta estratégica para fomentar la prevención y la innovación. Esta versión de la norma no prescribe un método único de documentación, sino que deja a cada organización la libertad de elegir el procedimiento más adecuado según las necesidades de sus clientes y su contexto legal.

Carlos Gonzales Chávez, en su tesis de 2018, demostró que la estandarización de actividades dentro del Sistema de Gestión de Calidad facilita el seguimiento y fomenta la mejora continua. Según él, un Sistema de Gestión de Calidad efectivo tiene seis fases: liderazgo para establecer objetivos, planificación de riesgos y oportunidades, provisión de recursos, ejecución conforme a especificaciones, auditoría interna y acciones correctivas y preventivas.

En el siglo XXI, las metodologías para implementar la calidad han evolucionado en la industria de la construcción para adaptarse a cada organización, ya que la competitividad del mercado exige que las empresas se centren en garantizar la satisfacción del cliente para sobrevivir y prosperar. Esta retrospectiva permite entender que los conceptos de calidad han evolucionado con las necesidades del mercado y que la globalización ha impulsado a las empresas a cambiar constantemente para superarse y mantenerse en un mundo competitivo, lo que resulta en una mejora continua que enfatiza la necesidad de revisar constantemente las causas de los problemas, reducir los costos excesivos y optimizar diversos componentes de manera conjunta.

2. Materiales y Método

La investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, con diseño documental, descriptivo y comparativo. Se empleó un estudio de caso de tipo no experimental y longitudinal para evaluar el impacto de la implementación de la norma ISO 9001:2015 mediante el análisis de indicadores operativos registrados antes y después de la certificación.

La unidad de análisis estuvo integrada por los procesos del área de metalmecánica, particularmente las actividades de mecanizado, control de calidad, tiempos muertos, productividad, no conformidades y costos operativos. La información se obtuvo a partir de fuentes documentales primarias, entre ellas informes de auditoría, registros de producción, reportes de no conformidades, bitácoras de mantenimiento, listas de verificación y formatos de evaluación. Como apoyo, se consultaron fuentes secundarias especializadas sobre sistemas de gestión de calidad e ISO 9001:2015.

En cuanto a los aspectos éticos, la investigación utilizó información institucional con fines exclusivamente académicos, resguardando la confidencialidad de los datos organizacionales. Debido a que no se realizaron intervenciones con seres humanos, no fue necesario aplicar consentimiento informado.

2.2. Evaluación de la Implementación

Propuesta de Plan para Medir el Impacto de la Implementación de ISO 9001:2015

Establecimiento de Indicadores de Rendimiento Clave (KPIs)

Los Indicadores Clave de Desempeño (Key Performance Indicators, KPI) son métricas cuantitativas utilizadas para evaluar el desempeño de un proceso respecto a los objetivos establecidos por la organización. En este estudio se utilizaron para medir la eficiencia operativa y la competitividad antes y después de la implementación de la norma ISO 9001:2015.

Descripción: Definir KPIs específicos que reflejen la eficiencia operativa y la competitividad.

Para medir los KPIs se utiliza una checklist , que en español es una lista de verificación. Este método relaciona tareas, actividades y conductas para alcanzar un resultado sistemático. Garantiza que no se olvide nada importante y que las actividades se cumplan de manera organizada.

Los checklists en negocios son esenciales para controlar procesos y tienen otros beneficios:

- Mantienen la organización detallando cada paso de un proceso.
- Mejoran la productividad al optimizar el tiempo para cada tarea.

- Reducen errores, ya que con todo listado es mucho más difícil equivocarse.

KPIs Sugeridos:

- Eficiencia Operativa: Tiempo de ciclo de producción, tasa de defectos, tiempo de inactividad, costos operativos, productividad por hora trabajada.
- Competitividad: Cuota de mercado, tasa de crecimiento de ventas, satisfacción del cliente, tiempos de entrega, número de nuevos contratos/negocios.

2.3. Recolección de Datos Pre y Post Implementación

Los datos correspondientes al periodo previo (Pre implementación) comprenden los registros institucionales del año 2019, mientras que el periodo posterior (Post implementación) corresponde a los registros del año 2024, una vez consolidado el Sistema de Gestión de Calidad certificado bajo ISO 9001:2015

Descripción: Recopilar datos antes y después de la implementación de ISO 9001:2015 para realizar comparaciones.

Hoja de verificación

Para el diseño de control se empleo una Hoja de Verificación es una tabla destinada a registrar datos de forma sencilla y sistemática. Sus ventajas son proporcionar datos claros, obtenidos mediante un proceso simple y eficiente que puede aplicarse en cualquier área de la organización. La hoja de verificación permite observar la información fácilmente, realizar un primer análisis y apreciar la magnitud y localización de los problemas principales, que se tomarán en cuenta para controlar la calidad de los procesos de metalmecánica.

Fuentes de Datos:

- Antes de la Implementación: Informes de auditoría interna, registros de producción.
- Después de la Implementación: Informes de auditoría interna y externa, registros actualizados de producción, encuestas de satisfacción del cliente.

*3. Medición de la Percepción de Calidad***:**

- Revisar encuestas de satisfacción del cliente, estudios de mercado y otros documentos que reflejen la percepción de calidad por parte de los clientes.

Para esto se utilizó ISO 9001:2015 – Requisito 10 Mejora, para determinar y seleccionar las oportunidades de mejora e implementar cualquier acción necesaria para cumplir los requisitos del cliente y aumentar la satisfacción del cliente.

Éstas deben incluir:

- Mejorar los productos y servicios
- Corregir, prevenir o reducir los efectos no deseados;
- Mejorar el desempeño y la eficacia del SGC.

No conformidad y acción correctiva

- Controlar y corregir
- Hacer frente a las consecuencias
- Eliminar las causas de las No conformidades
- Revisar la eficacia de las acciones tomadas
- Dependiendo del problema es la acción.

Mejora continua

La organización debe considerar los resultados del análisis y la evaluación, y las salidas de la revisión por la dirección, para determinar si hay necesidades u oportunidades que deben considerarse como parte de la mejora continua.

- Formular recomendaciones para las empresas del sector metalmecánico que buscan mejorar su desempeño y calidad.

2.4. Métodos de Análisis.

El análisis comparativo se realizó entre los periodos 2019 (pretest) y 2024 (postest), organizando los datos en tablas y gráficos para identificar variaciones en eficiencia operativa y competitividad. La implementación del SGC se estructuró bajo el ciclo PHVA (Planificar, Hacer, Verificar, Actuar), que permitió establecer objetivos, ejecutar procesos estandarizados, verificar resultados mediante auditorías internas y actuar con medidas correctivas. Las fases incluyeron diagnóstico inicial, diseño del sistema, implementación, auditoría interna y certificación, apoyadas por herramientas de control como listas de verificación y flujogramas

Análisis Comparativo:

Los datos fueron recolectados mediante la revisión documental de registros de producción, reportes de no conformidades e indicadores de desempeño correspondientes a los periodos de preimplementación (2019) y postimplementación (2024). Posteriormente, la información se organizó en tablas comparativas para su análisis.

***Métodos de Análisis**:*

Se aplicó estadística descriptiva mediante el cálculo de frecuencias, porcentajes y variaciones porcentuales para comparar los resultados entre ambos periodos. Los gráficos de barras se utilizaron para comparar indicadores, los gráficos de líneas para visualizar tendencias y los diagramas de dispersión para identificar la relación entre variables.

.

3. Resultados

En el año 2019 (pretest), la tasa de defectos alcanzó el 30% (300 piezas no conformes de 1,000 producidas). En contraste, en 2024 (postest) este indicador se redujo al 6% (55 piezas no conformes), lo que evidencia una mejora sustancial en el control de calidad.

Otros indicadores mostraron avances significativos:

- Tiempo de ciclo: disminuyó en promedio 22%, reflejando mayor agilidad en la ejecución.

- Tiempo de inactividad: se redujo 35%, gracias a una mejor programación de mantenimiento.
- Productividad: aumentó 18%, alcanzando un promedio de 2.06 piezas por hora.
- Satisfacción del cliente: se situó en 89%, superando la meta institucional del 85%.

Finalidad de los gráficos comparativos:

- Los gráficos de barras se emplearon para mostrar comparaciones directas entre los periodos pretest y postest, destacando la reducción de defectos y el aumento de productividad.
- Los gráficos de líneas permitieron visualizar la evolución trimestral de los indicadores en 2024, mostrando la estabilidad y mejora sostenida en el tiempo.
- Los diagramas de dispersión se utilizaron para identificar relaciones entre variables, como la correlación entre productividad y tiempo de inactividad, lo que permitió comprender mejor los factores que influyen en la eficiencia operativa.

En el análisis trimestral previo, los defectos de acabado se asociaron principalmente con errores del personal y uso de material incorrecto, mientras que las porosidades se vincularon con problemas del proceso térmico y de fundición. Aunque estos registros correspondieron únicamente a un trimestre, permitieron identificar los puntos críticos del proceso que posteriormente fueron atendidos mediante la estandarización operativa.

Desempeño posterior a la implementación

Después de la implementación del sistema de gestión de la calidad, el área de mecanizado operó con procedimientos documentados para las actividades de fresado, torneado y mandrinado, lo que permitió mayor control sobre la ejecución de las tareas y mejor seguimiento de los criterios de conformidad en las piezas procesadas.

La evolución trimestral de la tasa de defectos durante 2024 mostró estabilidad en los dos primeros trimestres (6%), una mejora adicional en el tercer trimestre (4%) y un cierre anual de 6%, con un promedio anual claramente inferior al registrado antes de la implementación.

Tabla 1
Tasa de defectos a lo largo del año 2024

TRIMESTRE	Piezas Producidas	Piezas Defectuosas	Tasa de Defectos (%)
ENE-MARZ	250	15	6%
ABR-JUN	250	15	6%
JUL-SEP	250	10	4%
OCT-DIC	250	15	6%
Promedio	**1,000**	**55**	6%

Cierre de años	Piezas Producidas	Piezas Defectuosas	Tasa de Defectos trimestre (%)	Tasa de Defectos anual (%)
2023	**1,000**	**300**	8%	30%
2024	**1,000**	55	1%	6%

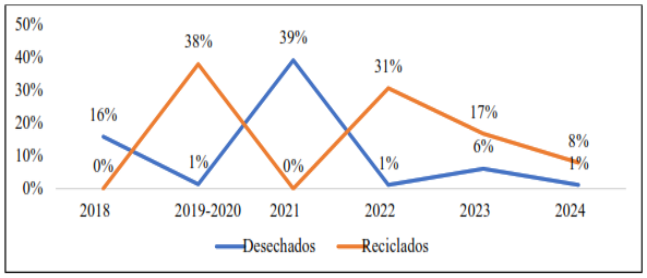


Figura 1. Disminución de Productos con Defectos Reciclados y Desechados del Área de Mecanizado

Tabla 2
Principales Causas por Tipo de Error en el Área de Mecanizado, Valuación de un trimestre para el 2019

Error	Causas	Porcentaje
Fuera de Medida	Error de Personal. Tratamiento térmico inadecuado.	20% 3%
Mala Calidad de Acabado	Error de Personal. Material Errado.	6% 2%
Porosidades	Problema de fundición.	10%

El tiempo de ciclo disminuyó en promedio 22%, lo que indicó una ejecución más ágil de las operaciones y una mejor capacidad de respuesta en la entrega de productos.

El tiempo de inactividad se redujo 35%, resultado que se relacionó con una programación más ordenada del mantenimiento y con una mejor gestión de los recursos disponibles en el área.

La productividad aumentó 18%, lo que reflejó un uso más eficiente de la maquinaria y del personal durante la operación del proceso de mecanizado.

De manera complementaria, el análisis de productividad por trimestre mostró un comportamiento estable en 2024, con una producción de 250 piezas por trimestre, 514 horas trabajadas y una productividad promedio de 2.06 piezas por hora.

Tabla 3
Evolución de la tasa de defectos a lo largo del año 2024

IMESTRE	**Piezas Producidas**	**Horas Trabajadas**	**Productividad Promedio**
ENE-MARZ	250	514	2.06
ABR-JUN	250	514	2.06
JUL-SEP	250	514	2.06

OCT-DIC	250	514	2.06
Promedio	**1,000**	**2356**	2.06

Evaluación operativa del torno

En el torno 1 se registró una productividad de 2.06 piezas por hora, valor que se mantuvo dentro del rango esperado para la operación analizada, aunque todavía mostró margen de mejora frente al desempeño potencial del proceso.

Los factores que afectaron la productividad del torno fueron las paradas no planificadas por mantenimiento, los problemas con herramientas, los cambios frecuentes de herramental y algunas condiciones mecánicas menores que generaron tiempos de espera. Asimismo, se observó que la experiencia del operador influyó en la continuidad del proceso y en la respuesta ante incidencias operativas.

En comparación con la situación previa a la certificación, después de la implementación se registró una disminución de los tiempos destinados a retrabajos y reprocesos, además de una mejor capacidad para medir el desperdicio operativo mediante indicadores derivados de las piezas no conformes y de la producción total. Este cambio permitió contar con evidencia cuantificable para el seguimiento del desempeño.

Competitividad

En términos de competitividad, uno de los resultados más relevantes fue la consolidación de registros sistemáticos para el control de procesos y no conformidades, lo que fortaleció la toma de decisiones basada en evidencia y el seguimiento de los objetivos de calidad.

En 2019 se registraron 278 productos no conformes de los tres principales defectos del área de mecanizado sobre un total de 3,382 inspecciones. Para 2024, esta cifra descendió a 177 productos no conformes sobre 5,109 inspecciones, lo que indicó una reducción absoluta de no conformidades aun cuando el volumen de inspección fue mayor.

El seguimiento del indicador institucional orientado a disminuir los productos no conformes y los reprocesos mostró cumplimiento de la meta establecida de mantener este valor en un nivel menor o igual a 7%, lo que confirmó la efectividad del sistema implementado en el control del desempeño del área.

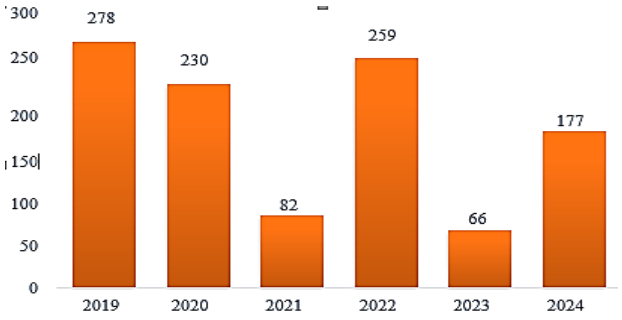


Figura 1 Evolución de Productos No Conformes por Principales Defectos del Área de Mecanizado.

La evaluación de la calidad del servicio al cliente en el último semestre de 2024 arrojó un resultado de 89%, valor que superó la meta institucional de 85% y mostró una percepción favorable del desempeño de la empresa por parte de sus usuarios.

Tabla 4Nivel de Servicio de Calidad del Cliente

Periodo	Punt. Máx.	Puntaje Obtenido	Indicador	Meta	Result.
Sem. 1	70	62.00 64.00 60.00	Puntaje Promedio Obtenido/ PuntajeMáx	>= 85%	89%
Anual	70	62.00		85%	89%

En concordancia con este resultado, la satisfacción del cliente se mantuvo por encima de la meta institucional y constituyó un indicador favorable del fortalecimiento competitivo alcanzado por la empresa tras la implementación del sistema de gestión de la calidad.

Adicionalmente, la empresa accedió a proyectos con clientes que exigieron el cumplimiento de estándares de calidad, lo que evidenció un fortalecimiento de su posicionamiento competitivo en mercados con mayores requisitos.

Las reclamaciones asociadas a defectos disminuyeron 40%, resultado que fue consistente con la reducción de no conformidades y con la mejora observada en los controles del proceso.

Mejora de procesos

La implementación de flujogramas estandarizados y mapas de proceso facilitó la trazabilidad de las operaciones y mejoró el control sobre las actividades críticas del área de mecanizado.

Asimismo, las acciones correctivas y preventivas quedaron documentadas y sistematizadas, lo que contribuyó a disminuir la reincidencia de errores y a fortalecer la disciplina operativa.

Finalmente, se observó una mayor participación del personal en las actividades de auditoría interna y seguimiento del sistema, lo que reflejó un avance en la consolidación de una cultura organizacional orientada a la calidad.

4. Discusión

Los hallazgos de este estudio muestran que la implementación de la norma ISO 9001:2015 se asocia con mejoras observables en la eficiencia operativa y en la competitividad de la empresa analizada, lo que responde al objetivo planteado en la investigación. Más que representar únicamente un requisito documental, el sistema de gestión de la calidad funciona en este caso como un mecanismo de estandarización, control y seguimiento que favorece el desempeño del área de mecanizado.

Esta interpretación coincide con la revisión de Sampaio, Saraiva y Guimarães-Rodrigues (2019) quienes señalan que la literatura sobre certificación ISO 9001 reporta beneficios recurrentes en el desempeño organizacional, aunque también advierte resultados heterogéneos según el contexto y la forma de adopción. En el presente caso, la reducción de defectos, la disminución de tiempos improductivos y la mejora en indicadores orientados al cliente sugieren que la norma se internaliza en prácticas operativas y no permanece solo en el plano formal.

Asimismo, los resultados son consistentes con lo planteado por Psomas y Pantouvakis (2015), quienes identifican que los beneficios de ISO 9001 pueden agruparse en dimensiones operativas, de calidad, de mercado y de desempeño financiero. Aunque el presente estudio no evalúa variables financieras directas, sí muestra evidencia en tres planos comparables: mejora operativa, fortalecimiento del control de calidad y una posición competitiva más sólida reflejada en la satisfacción del cliente y en el acceso a proyectos con mayores exigencias.

En relación con el contexto mexicano, los hallazgos guardan correspondencia con el estudio de Sanchez-Lizarraga Limon-Romero, Tlapa y Baez-Lopez (2020), quienes documentan que el liderazgo y el enfoque al cliente son factores críticos para la implementación satisfactoria de ISO 9001 en el sector manufacturero mexicano. El caso analizado refuerza esa idea, ya que los avances observados en control del proceso, cumplimiento de metas y satisfacción del cliente sugieren que la adopción del sistema no depende solo de la certificación, sino de su integración en la gestión cotidiana.

No obstante, los resultados también deben interpretarse con cautela. La mejora observada no implica que la certificación, por sí sola, garantice el éxito organizacional en cualquier contexto. La evidencia disponible sugiere que los beneficios de la norma dependen del grado en que sus principios se incorporan a la operación real, a la cultura interna y a la toma de decisiones. Desde esta perspectiva, el estudio apoya la hipótesis general de que ISO 9001:2015 contribuye al desempeño empresarial, pero también muestra que dicho efecto está condicionado por la forma de implementación.

Esta lectura es congruente con los hallazgos de Allur, Heras-Saizarbitoria y Casadesús (2014), quienes muestran que la motivación inicial para adoptar ISO 9001 no siempre se traduce automáticamente en mayores beneficios; sin embargo, una mayor internalización del sistema sí se relaciona, en el largo plazo, con mejores resultados. Este contraste resulta relevante porque evita una interpretación simplista de la norma y respalda la idea de que su valor depende menos del certificado en sí que del uso efectivo de sus prácticas en la organización.

En ese sentido, el caso estudiado sugiere que la disminución de no conformidades, la mejora en la trazabilidad y el fortalecimiento de la disciplina operativa son efectos que emergen cuando existe documentación útil, seguimiento de indicadores, acciones correctivas y participación del personal. Estos elementos ayudan a explicar por qué algunas organizaciones convierten la norma en una herramienta de mejora continua, mientras otras la reducen a una exigencia administrativa con impacto limitado.

En conjunto, la discusión permite sostener que los resultados del estudio se alinean con el conocimiento actual sobre los beneficios potenciales de ISO 9001, pero aportan evidencia específica para una empresa metalmecánica mexicana, un ámbito menos documentado en la literatura aplicada. Por ello, el principal aporte del trabajo consiste en mostrar, desde un estudio de caso, cómo la implementación del sistema puede traducirse en mejoras medibles cuando se articula con el control del proceso, la gestión de no conformidades y la orientación al cliente.

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos permiten concluir que la implementación de la norma ISO 9001:2015 contribuyó al fortalecimiento de la eficiencia operativa y de la competitividad de la empresa metalmecánica analizada. La reducción de productos no conformes, la disminución de tiempos improductivos, la mejora en la productividad y el incremento en la satisfacción del cliente muestran que el sistema de gestión de la calidad trascendió el cumplimiento documental y se tradujo en mejoras verificables en el desempeño organizacional.

Desde la perspectiva del objetivo de investigación, el estudio confirmó que la adopción de procedimientos estandarizados, mecanismos de trazabilidad, acciones correctivas y seguimiento mediante indicadores permitió mejorar el control del proceso de mecanizado y respaldó una toma de decisiones más consistente. En este sentido, el trabajo aportó evidencia aplicada sobre los efectos de ISO 9001:2015 en un estudio de caso del sector metalmecánico mexicano, ámbito en el que todavía existe una necesidad de mayor documentación empírica.

En términos prácticos, los hallazgos sugieren que la implementación eficaz de la norma no depende únicamente de la certificación, sino de su integración real en la operación cotidiana, del compromiso directivo, de la participación del personal y del uso sistemático de la información para la mejora continua. No obstante, por

tratarse de un estudio de caso con base en registros institucionales, los resultados deben interpretarse dentro del contexto específico analizado y no generalizarse de manera automática a todas las empresas del sector.

Finalmente, se recomienda que futuras investigaciones amplíen el análisis a múltiples empresas metalmecánicas y consideren periodos de observación más extensos, así como variables económicas y financieras que permitan evaluar con mayor profundidad el impacto integral de ISO 9001:2015. Aun con estas limitaciones, la presente investigación demuestra que un sistema de gestión de la calidad correctamente implementado constituye una herramienta estratégica para elevar el desempeño y consolidar la posición competitiva de la organización.

6. Agradecimientos

Agradezco a Dios por brindarme fortaleza, sabiduría y la oportunidad de culminar este trabajo. A mi familia, por su amor, apoyo incondicional y confianza en cada etapa de este proceso. Asimismo, expreso mi sincero agradecimiento a mis maestros, cuyas enseñanzas, orientación y dedicación fueron fundamentales para la realización de este artículo.

7. Referencias

Cepeda , J. D., & Cifuentes , W. M. (2019). Sistema de Gestión de Calidad en el Sector público. Una revisión literaria. Podium, 36. https://doi.org/https://doi.org/10.31095/podium.2019.36.3

Deginición. (2024). Definición de Sistema de Gestión de calidad. Deginición.De. https://definicion.de/sistema-de-gestion-de-calidad/

Hernández, L. (27 de junio de 2020). La reinvención de la industria metalmecánica en México y sus oportunidades de desarrollo. México Industry. https://mexicoindustry.com/noticia/la-reinvencion-de-la-industria-metalmecanica-en-mexico-y-sus-oportunidades-de-desarrollo

ISO. (2015). ISO 9000:2015 Sistemas de gestión de la calidad — Fundamentos y vocabulario. Organización Internacional de Normalización. https://doi.org/https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:9000:ed-4:v1:es

ISO. (2015b). Sistemas de gestión de calidad — Requisitos (ISO 9001:2015). Organización Mundial de Normalización. https://www.iso.org/es/contents/data/standard/06/20/62085.html

ISO. (14 de 05 de 2024). La Familia ISO: LA SERIE DE NORMAS ISO. (I. O. Standardization, Editor) Normas ISO. https://www.normas-iso.com/la-familia-iso/

ISO. (2024). Sistemas de gestión de la calidad: Introducción. (O. I. Normalización, Editor) ISO Sitio Web. https://www.iso.org/es/gestion-calidad/que-es-sgc

Kappa Consulting . (31 de julio de 2023). Desafíos comunes en la gestión de calidad y cómo superarlos. Kappa Consulting S.A Sito Web. https://kappaconsultingsa.com/desafios-comunes-en-la-gestion-de-calidad-y-como-superarlos/

Legarda, A., & Toapanta, J. (2021). Impacto de la Gestión de Calidad Total en la satisfacción del cliente. Revista Técnica de Producción, 30(3), 123-136.

Mecanizados Inter. (2020). QUE ES LA METALMECANICA. Mecanizados Inter2000. https://www.inter2000mecanizados.com/post/que-es-la-metalmecanica

Nápoles, L., Campos, N., & De Peralta, N. (2'23). LA MEJORA DE LOS SISTEMAS DE GESTIÓN DE LA CALIDAD ISO 9001: UN ESTUDIO EXPLORATORIO. Desarrollo Sustentable Negocios Emprendimiento y Educación, 5(41), 15-25. https://doi.org/10.51896/rilcods.v5i41.79

Psomas, E., & Pantouvakis, A. (2015). Dimensiones generales del rendimiento de la norma ISO 9001: un estudio exploratorio Disponible para comprar. Revista TQM, 27(5), 519-531. https://doi.org/https://doi.org/10.1108/TQM-04-2014-0037

Rodríguez, L. F. (2020). Impacto por la implentación de un sistema de Gestión de calidad en empresa colombianas. Fundación Universidad de América. https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/7499/1/478816-2019-II-GC.pdf

Sampaio, P., Saraiva, P., & Guimarães, A. (2009). Investigación sobre la certificación ISO 9001: preguntas, respuestas y enfoques. Revista Internacional de Gestión de Calidad y Confiabilidad , 26(1), 38–58. https://doi.org/https://doi.org/10.1108/02656710910924161

Sánchez-Lizarraga, M., Limón-Romero, J., Tlapa, D., & Baez , Y. (2019). Norma ISO 9001: análisis exploratorio en el sector manufacturero en México. DYNA, 87(213). https://doi.org/https://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.83230

Tarí , J., & Heras-Saizarbitoria, I. (2014). Impulsores internos y externos de la certificación de calidad en la industria de servicios: ¿Tienen diferentes impactos en el éxito? Serv Bus, 8, 37–354. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s11628-013-0198-6

The Quality Alliance . (2023). Beneficios de obtener la certificación ISO 9001:2015 para la industria metalmecánica. The Quality Alliance . https://qalliance.org/es/norma-iso-9001-licitaciones/

Baker, R. C., (1963a). Título del artículo. Nombre de la revista 34, 184–186.

Baker, R. C., (1963b). Título del libro. Nombre de la editorial, Lugar de publicación.

Dog, P. R., (1958). Título del capítulo. In: Editor (Ed.), Título del libro. Vol. II. Nombre de la editorial, Lugar de publicación, Ch. 7, pp. 56–98.

García, F. J., 2007. Título del libro. Nombre de la editorial, Lugar de publicación.

García, F. J., Martínez, R., (2008). Título del artículo. Nombre de la revista número volumen, números de página.

DOI: 10.3923/ijbc.2010.190.202

García, F. J., Martínez, R., (2008). Título del artículo. Nombre de la revista número volumen, números de página.

DOI: 10.3923/ijbc.2010.190.202

Keohane, R., (1958). Título del libro. Nombre de la editorial, Lugar de publicación

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 15-24

ISSN: 2992-7315

Implementación de un sistema de visión artificial para el fortalecimiento del aseguramiento de calidad y liberación de piezas en procesos de inyección de plásticos.

Implementation of a Computer Vision System to Enhance Quality Assurance and Product Release in Plastic Injection Molding Processes.

Arturo Aguilar Pérez[a], Ricardo Vázquez Ortíz[b], José Daniel Castro Díaz[a], Blanca Gabriela Cuevas González[b], María de la Luz Delgadillo Torres[b], Wenceslao Cuauhtémoc Bonilla Blancas[c]

[a]*Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Centro Tecnológico Aragón, C.P. 57170, Ciudad Nezahualcóyotl, Estado de México, México*
[b] *Tecnológico Nacional de México/ TES de Ecatepec, División de Ingeniería Química y Bioquímica, C.P. 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.*
[c] *Tecnológico Nacional de México/ TES de Ecatepec, Laboratorio de Energías Alternas Renovables, Posgrado en Eficiencia Energética y Energías Renovables, C.P. 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.*

Resumen

La inspección visual manual de piezas obtenidas mediante moldeo por inyección puede presentar variabilidad asociada al criterio del operador y favorecer errores en la aceptación o rechazo de productos. Este trabajo describe la implementación y validación preliminar de un sistema de visión artificial orientado al fortalecimiento del aseguramiento de calidad y la liberación de piezas en procesos de inyección de plásticos. El sistema se basó en un sensor de visión Keyence® IV-500CA, configurado mediante herramientas de reconocimiento de patrones, presencia/ausencia y evaluación geométrica. Se diseñó una estación experimental para controlar las condiciones de inspección y favorecer la repetibilidad. El sistema permitió clasificar preliminarmente piezas conformes (OK) y no conformes (NG) ante defectos como rebabas, deformaciones y desviaciones geométricas. Los resultados demostraron la factibilidad técnica de la arquitectura desarrollada para reducir la subjetividad de la inspección visual y fortalecer la consistencia de los criterios de aceptación y rechazo. Como trabajo futuro, se plantea ampliar su validación mediante métricas cuantitativas de desempeño e integración en condiciones reales de producción.

Palabras clave: visión artificial, aseguramiento de calidad, inyección de plásticos, inspección automatizada, integración de sensores industriales.

Abstract

Manual visual inspection of injection-molded parts may introduce variability associated with operator judgment and lead to errors in product acceptance or rejection. This work describes the implementation and preliminary validation of a computer vision system aimed at strengthening quality assurance and part release in plastic injection molding processes. The system was based on a Keyence® IV-500CA vision sensor configured using pattern recognition, presence/absence detection, and geometric evaluation tools. An experimental station was designed to control inspection conditions and improve repeatability. The system enabled the preliminary classification of conforming (OK) and non-conforming (NG) parts based on defects such as flash, deformation, and geometric deviations. The results demonstrated the technical feasibility of the developed architecture for reducing the subjectivity of visual inspection and improving the consistency of acceptance and rejection criteria. Future work will focus on extending its validation through quantitative performance metrics and integration under actual production conditions.

Keywords: computer vision, quality assurance, plastic injection molding, automated inspection, industrial sensor integration.

1. Introducción

La industria de transformación de plásticos mediante moldeo por inyección constituye uno de los procesos manufactureros más utilizados debido a su capacidad para producir piezas con geometrías complejas, alta repetibilidad y elevados volúmenes de producción. Su aplicación abarca sectores como el automotriz, médico, electrónico, alimentario

*Autor para la correspondencia: arturoaguilar8s5@aragon.unam.mx
Correo electrónico: arturoaguilar8s5@aragon.unam.mx (Arturo Aguilar Pérez)

Historial del manuscrito: recibido el 18/7/2026, última versión-revisada recibida el 13/08/2026, aceptado el 18/08/2026, publicado el 05/10/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.23129583

y de bienes de consumo, donde la calidad dimensional y superficial constituye un requisito fundamental para garantizar la funcionalidad y aceptación del producto final [1]–[3].

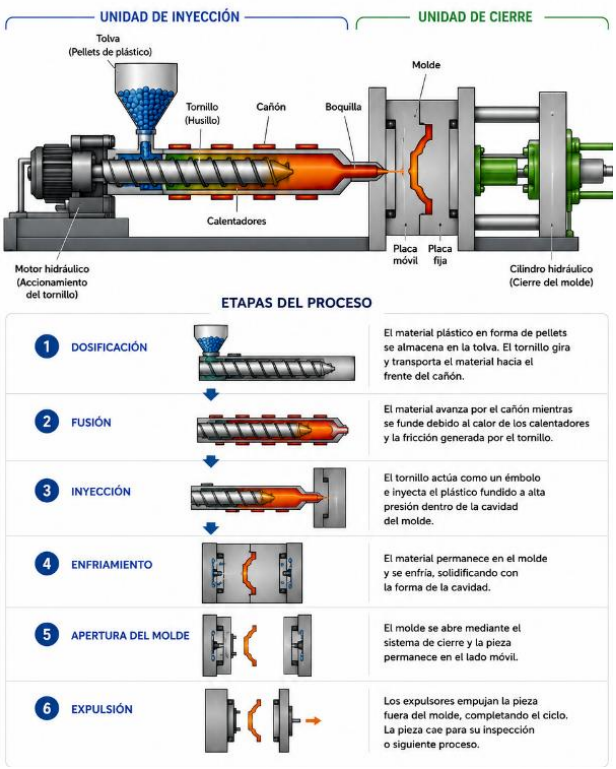


Figura 1: *Proceso de inyección de plásticos.*

Durante el proceso de inyección, como se muestra de manera esquemática en la **Figura 1**, el material termoplástico es plastificado, inyectado dentro del molde, enfriado y posteriormente expulsado. Las variaciones en parámetros como temperatura, presión, velocidad de inyección, tiempo de enfriamiento y condiciones del molde pueden favorecer la aparición de defectos como rebabas (*flash*), rechupes (*sink marks*), deformaciones (*warpage*) y variaciones dimensionales. Estas no conformidades pueden generar desperdicio de material, reprocesos y pérdidas económicas, por lo que su detección oportuna constituye una actividad crítica dentro del aseguramiento de calidad [4]–[6].

Tradicionalmente, la inspección de piezas moldeadas puede realizarse mediante evaluación visual manual, cuya efectividad depende de factores como la experiencia del operador, las condiciones de inspección y la repetibilidad de los criterios de aceptación. Frente a estas limitaciones, los sistemas de visión artificial constituyen una alternativa para automatizar la adquisición y evaluación de información visual, permitiendo establecer criterios objetivos y repetibles para la detección y clasificación de defectos en procesos de manufactura [7]–[10]. En años recientes, estas tecnologías han evolucionado hacia sistemas de inspección cada vez más automatizados, incluyendo técnicas de procesamiento digital de imágenes, aprendizaje automático y aprendizaje profundo para aplicaciones industriales de detección de defectos [11]–[15].

En este contexto, el objetivo del presente trabajo es implementar y realizar una validación preliminar de un sistema de visión artificial basado en un sensor industrial Keyence IV-500CA, orientado al fortalecimiento del aseguramiento de calidad y al apoyo del proceso de liberación de piezas obtenidas mediante moldeo por inyección de plásticos. La contribución del trabajo se centra en la integración tecnológica del sistema de inspección, el establecimiento de criterios automatizados de aceptación y rechazo y su aplicación para la clasificación de piezas conformes (OK) y no conformes (NG), sin plantear el desarrollo de un nuevo algoritmo de visión computacional.

2. Antecedentes

2.1 Inyección de plásticos y defectos de manufactura

El moldeo por inyección es un proceso de manufactura en el que un material termoplástico es fundido e introducido a presión dentro de la cavidad de un molde, donde posteriormente se enfría y solidifica hasta adquirir la geometría requerida. La calidad de las piezas obtenidas depende de la interacción entre las propiedades del material, las características del molde y parámetros de operación como temperatura, presión y velocidad de inyección, tiempo de sostenimiento y condiciones de enfriamiento [1]–[5].



Figura 2: *Presencia de exceso de material (flash).*

Las variaciones en estas condiciones de procesamiento pueden favorecer la aparición de defectos como rebabas (flash), rechupes (sink marks), deformaciones (warpage), llenado incompleto, líneas de flujo y desviaciones dimensionales. Como se observa en las **Figuras 2** y **3**, este tipo de no conformidades puede modificar tanto la geometría como la apariencia superficial del producto, afectando su funcionalidad y los criterios establecidos para su liberación.

La identificación oportuna de estos defectos resulta, por tanto, fundamental para disminuir desperdicios, reprocesos y variabilidad dentro del proceso productivo [4]–[10].

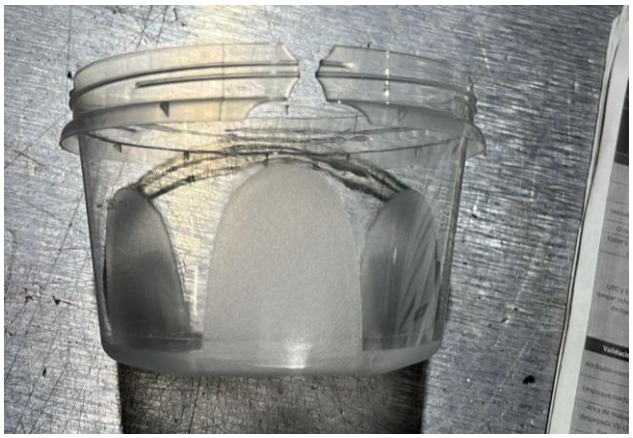


***Figura 3**. Producto incompleto.*

2.2 Visión artificial aplicada al aseguramiento de calidad

La visión artificial se ha consolidado como una alternativa tecnológica para automatizar actividades de inspección y control de calidad mediante la adquisición y procesamiento digital de imágenes. Su aplicación en ambientes de manufactura permite evaluar características visuales y geométricas de manera sistemática, reducir la dependencia de evaluaciones exclusivamente manuales e incrementar la repetibilidad de los criterios utilizados para identificar productos conformes y no conformes [9]–[15].

En años recientes, la inspección visual automatizada ha incorporado técnicas avanzadas de procesamiento de imágenes, aprendizaje automático y aprendizaje profundo para la detección y clasificación de defectos industriales. Arquitecturas basadas en redes neuronales convolucionales (CNN), detectores de objetos como YOLO y, más recientemente, *Vision Transformers* han mostrado resultados relevantes en aplicaciones de inspección industrial [11]–[15]. Sin embargo, su implementación puede requerir conjuntos de datos etiquetados, etapas de entrenamiento y recursos computacionales adicionales, por lo que los sensores de visión inteligentes con herramientas de inspección embebidas continúan representando una alternativa práctica para aplicaciones industriales con características y criterios de aceptación previamente definidos.



***Figura 4.** Inspección con visión artificial [16].*

Para el desarrollo experimental del presente trabajo se empleó específicamente un sensor de visión industrial Keyence® IV-500CA, mostrado de manera representativa en la **Figura 4**. Este dispositivo integra adquisición y procesamiento de imágenes en una plataforma industrial compacta y permite configurar herramientas de inspección orientadas al reconocimiento de patrones, detección de presencia/ausencia y evaluación de características geométricas. Estas funciones permiten establecer umbrales de evaluación para la clasificación automatizada de las piezas inspeccionadas como conformes (OK) o no conformes (NG) [16].

3. Metodología

La metodología empleada se estructuró con el propósito de implementar y realizar una validación preliminar de un sistema de visión artificial orientado al fortalecimiento del aseguramiento de calidad y al apoyo de la liberación de piezas obtenidas mediante moldeo por inyección. El procedimiento comprendió el diagnóstico del proceso convencional de inspección, la selección de tecnologías de medición, la identificación de variables críticas de calidad, la definición de criterios de aceptación y rechazo, el diseño y fabricación de una estación experimental y la configuración y validación preliminar del sistema de visión artificial.



Figura 5. *Metodología.*

La plataforma de inspección se basó en un sensor industrial Keyence® IV-500CA, seleccionado por integrar adquisición y procesamiento de imágenes, así como herramientas configurables para reconocimiento de patrones, presencia/ausencia y evaluación geométrica [16]. **La Figura 5** presenta de manera esquemática las etapas que conformaron la metodología experimental.

3.1 Diagnóstico del proceso

Se realizó un análisis del procedimiento convencional de inspección empleado para la evaluación de piezas plásticas moldeadas por inyección. Durante esta etapa se identificaron los defectos recurrentes, los criterios utilizados para la liberación del producto y las principales limitaciones asociadas con la inspección visual manual.

El diagnóstico permitió identificar características susceptibles de ser evaluadas mediante visión artificial y establecer los requerimientos iniciales del sistema de inspección**. La Figura 6** muestra una de las condiciones utilizadas para la inspección convencional de las piezas.



Figura 6. *Tarima de inspección.*

3.2 Selección de tecnologías de medición e inspección

A partir del diagnóstico se seleccionaron las tecnologías de medición e inspección aplicables a las características críticas del producto. Para la evaluación dimensional se consideraron instrumentos convencionales y un medidor magnético de espesores Magna-Mike, mostrado en la **Figura 7**.

Para la inspección visual automatizada se seleccionó un sensor Keyence® IV-500CA que se muestra en la **Figura 8**, perteneciente a la serie IV de sensores de visión industrial. El dispositivo incorpora un sensor de imagen CMOS a color y herramientas embebidas que permiten configurar diferentes criterios de inspección y generar resultados de clasificación OK/NG [16].

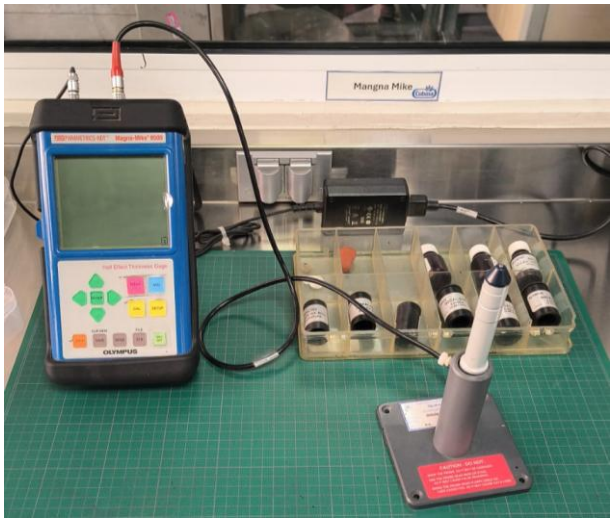


Figura 7. *Medidor magnético de espesores Magna Mike.*

La combinación de medición dimensional y visión artificial permitió establecer un esquema complementario de inspección, en el cual las características visuales y geométricas susceptibles de automatización fueron asignadas al sistema de visión.



Figura 8. *Sensor IV [16].*

3.3 Definición de variables críticas y puntos de inspección

Posteriormente se identificaron las características críticas de calidad y las zonas de interés de las piezas moldeadas. Se consideraron variables relacionadas con geometría, presencia de rebaba, deformaciones, integridad superficial, presencia o ausencia de características específicas y conformidad dimensional.

A partir de este análisis se determinaron las regiones prioritarias de inspección y se estableció qué características podían evaluarse mediante las herramientas disponibles en el sensor de visión. Esta etapa permitió relacionar cada defecto potencial con un criterio observable y establecer las condiciones necesarias para su posterior clasificación.

3.4 Definición de criterios de aceptación y rechazo

Con base en las características identificadas se establecieron criterios de aceptación y rechazo para la clasificación de las piezas inspeccionadas. Las condiciones de referencia correspondientes a una pieza conforme fueron utilizadas para configurar las herramientas de inspección y establecer los umbrales necesarios para diferenciar entre productos aceptables y no conformes.

El sistema se configuró para generar una clasificación OK cuando las características evaluadas se encontraban dentro de los criterios establecidos y NG cuando se detectaban desviaciones respecto de la condición de referencia. De esta manera, la decisión de inspección se realizó mediante criterios previamente configurados, reduciendo la dependencia de una evaluación exclusivamente visual por parte del operador.

3.5 Desarrollo de estación experimental

Con el propósito de evaluar el funcionamiento del sistema antes de una posible integración en una línea de producción, se diseñó una estación experimental mediante modelado tridimensional asistido por computadora utilizando SolidWorks®, como se muestra en la **Figura 9**.

El diseño consideró una base rígida para el posicionamiento de las piezas y un soporte destinado al montaje del sensor Keyence IV-500CA. La geometría de la estación permitió mantener controladas la orientación del sensor y la posición relativa entre el dispositivo de captura y la pieza inspeccionada, reduciendo las variaciones ocasionadas por el posicionamiento manual.

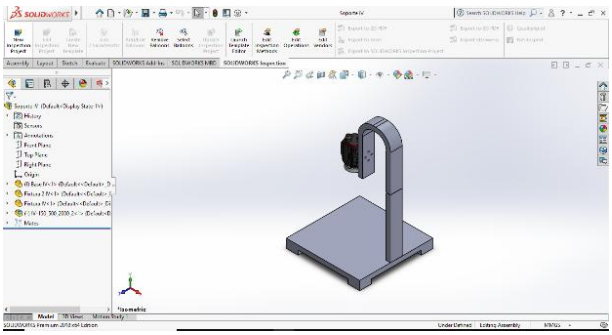


Figura 9. *Diseño CAD.*

La estructura propuesta consistió en una base rígida de soporte y un brazo de fijación destinado al montaje del sensor de visión industrial serie IV de Keyence®, permitiendo mantener una distancia controlada entre el sistema de captura y la pieza inspeccionada. La configuración geométrica fue diseñada para garantizar una correcta orientación del sensor respecto al área de inspección, favoreciendo condiciones repetibles de adquisición de imágenes y reduciendo variaciones asociadas al posicionamiento manual.

Esta estación permitió establecer un entorno controlado para la realización de pruebas preliminares de captura, detección de defectos y validación de criterios de aceptación y rechazo, previo a una integración potencial dentro de ambientes reales de manufactura. Asimismo, facilitó la simulación de escenarios de inspección y la evaluación conceptual de variables relacionadas con iluminación, campo

de visión, posicionamiento de pieza y repetibilidad del sistema, contribuyendo al fortalecimiento del esquema de aseguramiento de calidad propuesto.

3.6 Fabricación e integración de la estación de prueba

Una vez concluido el diseño CAD, se fabricaron mediante manufactura aditiva los componentes necesarios para integrar la estación experimental. Posteriormente se realizó el montaje del sensor y se verificó la estabilidad mecánica del conjunto.



Figura 10. *Estación de Pruebas.*

La estación construida mostrada en la **Figura 10** permitió realizar pruebas iniciales de captura, configuración del campo visual, evaluación de iluminación y verificación del desempeño del sistema de inspección frente a defectos presentes en piezas moldeadas por inyección. Asimismo, posibilitó validar la viabilidad de integrar criterios automatizados de aceptación y rechazo basados en reconocimiento de patrones, presencia/ausencia y evaluación geométrica de piezas inspeccionadas.

3.7 Configuración y validación

Una vez fabricada e integrada la estación experimental, se procedió a la configuración del sistema de visión artificial Keyence IV-500CA, con el propósito de establecer condiciones controladas y repetibles para la adquisición e inspección de las piezas. Inicialmente se realizaron pruebas de posicionamiento y captura para verificar el funcionamiento conjunto del sensor y la estación desarrollada, como se muestra en la **Figura 11**.

Durante esta etapa se definieron parámetros relacionados con el posicionamiento del sensor, distancia de trabajo, orientación del sistema de captura y área efectiva de inspección, buscando asegurar repetibilidad en la adquisición de imágenes y minimizar variaciones derivadas del acomodo manual de las piezas. Asimismo, se consideraron las condiciones de iluminación y enfoque con el objetivo de mejorar el contraste visual y favorecer la detección de características geométricas y superficiales presentes en las piezas moldeadas, como se muestra en la **Figura 12**, utilizando el software IV Navigator de Keyence®.

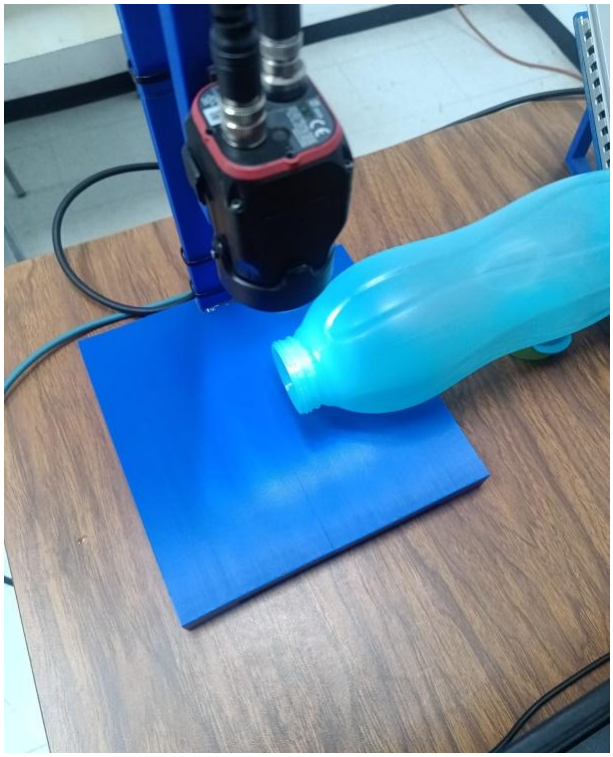


Figura 11. *Pruebas preliminares.*

Posteriormente, se configuraron las herramientas embebidas del sensor Keyence IV-500CA de acuerdo con las características de interés previamente definidas. Para cada inspección se estableció una condición de referencia y se ajustaron los criterios de evaluación necesarios para discriminar entre piezas conformes (OK) y no conformes (NG).

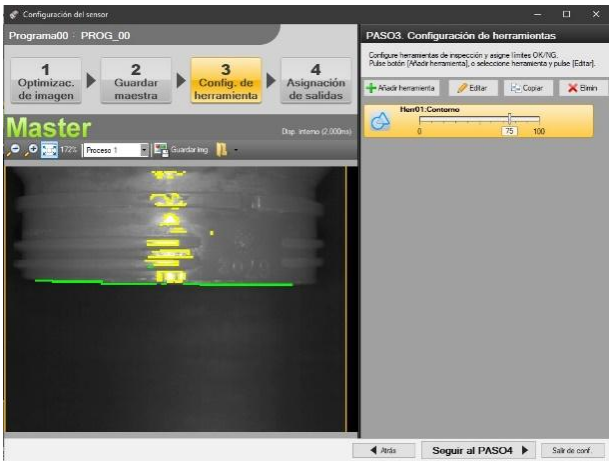


Figura 12. *Configuración del IV.*

Una vez configurado el sistema de visión artificial sobre la estación experimental, se llevaron a cabo pruebas preliminares de validación orientadas a verificar su funcionalidad antes de una posible implementación en un entorno productivo. La validación se enfocó en comprobar la estabilidad en la adquisición de imágenes, la repetibilidad del posicionamiento, la detección de características geométricas y la capacidad del sistema para discriminar condiciones de conformidad y no conformidad en piezas moldeadas por inyección, como se observa en la **Figura 13**.



Figura 13. *Área de implementación del sistema.*

Las piezas fueron sometidas a ciclos sucesivos de inspección bajo condiciones controladas con el propósito de verificar la consistencia de la clasificación OK/NG. Esta etapa permitió realizar una validación funcional de la arquitectura desarrollada y establecer las bases para la posterior evaluación cuantitativa del desempeño del sistema.

4. Resultados y discusión

4.1 Diseño y fabricación de la estación experimental

El diseño y fabricación de la estación experimental permitieron disponer de un entorno controlado para la adquisición de imágenes y evaluación de piezas moldeadas por inyección. La estructura desarrollada proporcionó estabilidad mecánica al sensor y permitió mantener una posición relativa definida entre el dispositivo de visión y la pieza inspeccionada, reduciendo variaciones asociadas con el posicionamiento manual.

La fabricación de los componentes mediante manufactura aditiva permitió materializar el diseño CAD propuesto y realizar los ajustes necesarios para el montaje del sensor Keyence IV-500CA. La estación obtenida fue utilizada posteriormente para las pruebas de configuración y validación preliminar mostradas en las **Figuras 10–13**.

4.2 Configuración del sistema de visión artificial

La integración del sensor industrial Keyence IV-500CA permitió implementar herramientas embebidas de inspección basadas en comparación de patrones, presencia/ausencia y evaluación geométrica. Estas herramientas fueron configuradas a partir de características previamente definidas como referencia para establecer criterios de aceptación y rechazo.

La configuración realizada permitió generar una respuesta de clasificación OK/NG de acuerdo con los umbrales establecidos para cada característica inspeccionada. De esta manera, el sistema proporcionó un criterio automatizado de apoyo para la identificación de desviaciones respecto de las condiciones definidas como conformes.

Tabla 1. Características técnicas del sensor de visión Keyence IV-500CA [16].

CARACTERÍSTICA	ESPECIFICACIÓN
MODELO	Keyence IV-500CA
TIPO DE SENSOR	Sensor de visión, modelo estándar, color
ELEMENTO DE IMAGEN	CMOS color de 1/3"
RESOLUCIÓN	752 × 480 píxeles
DISTANCIA DE TRABAJO	50–500 mm
CAMPO DE VISIÓN A 50 MM	25 × 18 mm
CAMPO DE VISIÓN A 300 MM	126 × 95 mm
CAMPO DE VISIÓN A 500 MM	210 × 157 mm
TIEMPO DE EXPOSICIÓN	1/10 a 1/50 000 s
ILUMINACIÓN	LED blanco integrado
FUNCIONAMIENTO DE ILUMINACIÓN	Iluminación continua o pulsada
HERRAMIENTAS DE DETECCIÓN	Hasta 16 herramientas
AJUSTE DE POSICIÓN	1 herramienta
PROGRAMAS CONFIGURABLES	32 programas
SALIDA DE EVALUACIÓN	Clasificación OK/NG
INFORMACIÓN ESTADÍSTICA DISPONIBLE	Número de OK, NG, disparos y errores; tiempo de procesamiento último, máximo, mínimo y promedio
ALMACENAMIENTO DE IMÁGENES	Posibilidad de almacenar imágenes de inspección, incluyendo resultados NG

Las características técnicas del sensor empleado y su capacidad de procesamiento integrado permiten realizar la adquisición, evaluación y clasificación dentro del propio dispositivo. Para caracterizar técnicamente el sistema de

visión utilizado en las pruebas, la **Tabla 1** presenta las principales especificaciones del sensor Keyence IV-500CA, incluyendo resolución, distancia de trabajo, campo de visión, iluminación y capacidades de inspección. Estos parámetros son relevantes para establecer las condiciones de operación y reproducibilidad del sistema experimental [16].

4.3 Detección preliminar de defectos y validación de criterios de aceptación y rechazo

Las pruebas realizadas permitieron verificar funcionalmente la capacidad del sistema para discriminar entre condiciones conformes y no conformes mediante criterios configurables de inspección. Entre las características consideradas se incluyeron presencia de rebabas, deformaciones, geometría general y presencia o ausencia de elementos específicos de las piezas moldeadas.

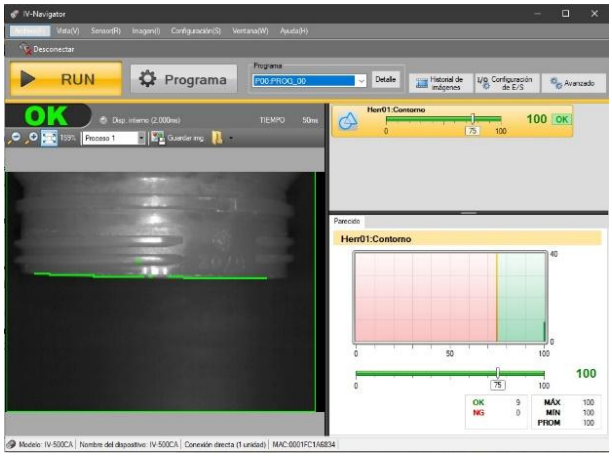


Figura 14. *Identificación de defectos por rebaba con visión artificail.*

En particular, la **Figura 14** muestra un ejemplo de la identificación de exceso de material o rebaba (flash) mediante el sistema de visión artificial. La región de interés y los criterios de evaluación configurados permitieron identificar desviaciones respecto de la condición utilizada como referencia y generar la correspondiente clasificación del producto.

Tabla 2. *Variables de inspección.*

VARIABLE INSPECCIONADA	EVALUACIÓN	CRITERIO
REBABA (*FLASH*)	PRESENCIA	OK / NG
DEFORMACIÓN	CONTORNO	OK / NG
GEOMETRÍA GENERAL	PATRÓN	OK / NG
PRESENCIA/AUSENCIA DE CARACTERÍSTICAS	PATRÓN	OK / NG
DIMENSIONALIDAD RELATIVA	PATRÓN	OK / NG

La **Tabla 2** resume las principales características consideradas durante las pruebas preliminares, así como el método utilizado para su evaluación y el criterio de clasificación establecido.

Durante los ciclos preliminares de inspección se observó consistencia en la adquisición de imágenes cuando se mantuvieron controladas las condiciones de posicionamiento e iluminación. Asimismo, el sistema permitió ejecutar repetidamente los criterios de evaluación configurados y proporcionar una salida de clasificación OK/NG, mostrando la viabilidad funcional de la arquitectura desarrollada para apoyar actividades de inspección y liberación de producto.

Estos resultados deben interpretarse como una validación preliminar de funcionamiento y no como una caracterización estadística definitiva del desempeño del sistema. Para determinar cuantitativamente parámetros como exactitud (accuracy), precisión (precision), sensibilidad (recall), especificidad y tasas de falsos positivos y falsos negativos, se requiere una campaña experimental con un conjunto de piezas previamente clasificadas mediante un método de referencia. Esta evaluación constituye una etapa posterior de validación del sistema.

4.4 Análisis comparativo del desempeño del proceso

Como complemento de la validación experimental, se analizaron registros históricos asociados con las no conformidades detectadas durante el proceso de fabricación. Este análisis tuvo como propósito contextualizar los principales defectos presentes en las piezas y establecer su comportamiento dentro del periodo evaluado. Los registros históricos se analizaron independientemente de las pruebas preliminares realizadas con el sistema Keyence IV-500CA, por lo que sus resultados no se consideran una demostración causal del desempeño del sistema de visión artificial.

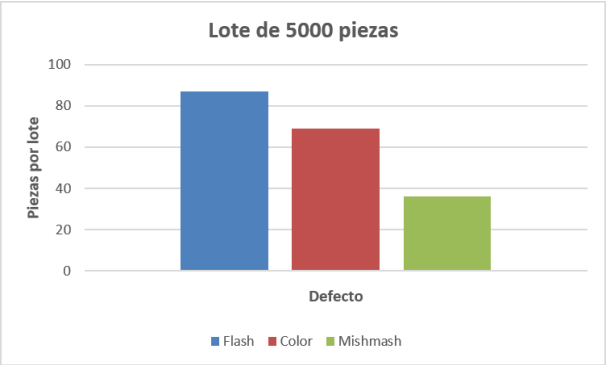


Figura 15. *Diagrama de Pareto antes de la implementación.*

La **Figura 15** presenta el diagrama de Pareto correspondiente al periodo previo considerado en el análisis. Los resultados permiten identificar los defectos con mayor frecuencia y establecer cuáles representan la mayor contribución al conjunto de no conformidades registradas.

La **Figura 16** presenta el diagrama de Pareto correspondiente al periodo posterior considerado. La comparación entre ambos diagramas permite observar cambios en la frecuencia y distribución de las diferentes categorías de defectos. No obstante, debido a que en el proceso intervienen múltiples variables de producción, estos cambios no pueden atribuirse exclusivamente a la incorporación del sistema de visión artificial.

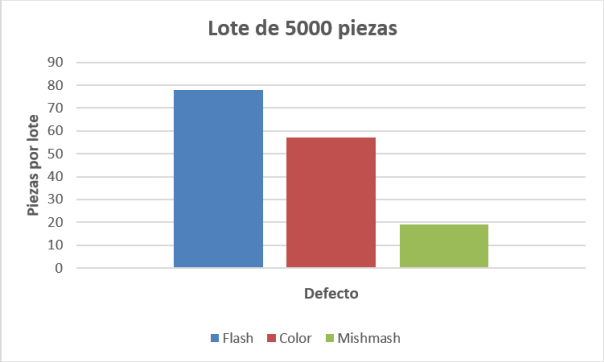


Figura 16. *Diagrama de Pareto después de la implementación.*

En conjunto, los diagramas de Pareto y la tendencia de defectos que se muestra en la **Figura 17** permiten contextualizar la problemática de calidad que motivó el desarrollo del sistema y evidenciar la importancia de contar con herramientas de inspección capaces de proporcionar criterios de evaluación repetibles. En este sentido, el sistema desarrollado representa una herramienta complementaria para apoyar la detección y clasificación de no conformidades, mientras que la determinación de su impacto cuantitativo sobre la reducción de defectos requerirá una evaluación experimental posterior bajo condiciones controladas.

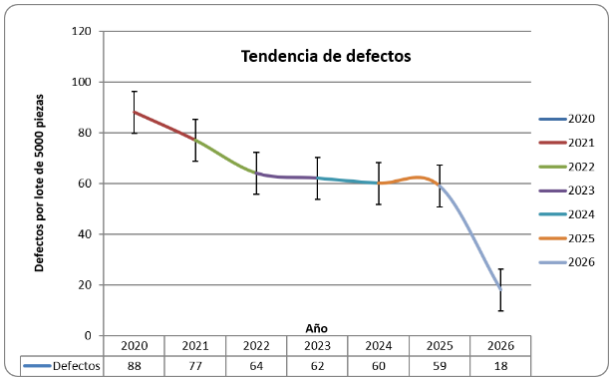


Figura 17. *Evolución del desempeño.*

La **Figura 18** presenta la evolución anual de las ventas asociadas al producto analizado. Este indicador se incluye únicamente como información complementaria para contextualizar el comportamiento productivo durante el periodo considerado y no como una medida directa del desempeño del sistema de visión artificial.

Aunque durante el periodo analizado se observa una variación en las ventas, su comportamiento puede estar relacionado con múltiples factores comerciales, productivos y de mercado. Por esta razón, con la información disponible no es posible establecer una relación causal entre la implementación del sistema de visión artificial, el comportamiento de las ventas y la satisfacción del cliente.

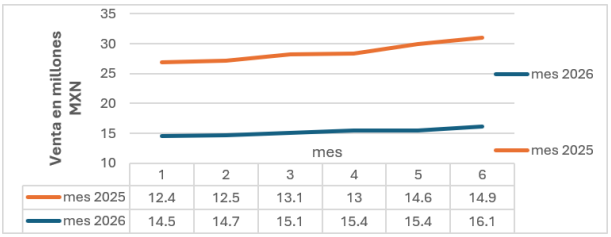


Figura 18. *Ventas anuales.*

El análisis de este indicador permite únicamente proporcionar contexto sobre la evolución del producto durante el periodo de estudio. Una evaluación del impacto económico atribuible específicamente al sistema de inspección requeriría considerar variables adicionales, tales como costos de no calidad, porcentaje de rechazo, reprocesos, desperdicio de material, reclamaciones y tiempos de inspección antes y después de su implementación.

5. Conclusiones

En este trabajo se implementó y realizó una validación preliminar de un sistema de visión artificial basado en un sensor industrial Keyence IV-500CA, orientado al fortalecimiento del aseguramiento de calidad y al apoyo de la liberación de piezas obtenidas mediante procesos de inyección de plásticos. El diseño y fabricación de una estación experimental permitió evaluar el sistema bajo condiciones controladas de posicionamiento, iluminación y adquisición de imágenes.

Las pruebas realizadas permitieron verificar funcionalmente la aplicación de criterios configurables de inspección para discriminar entre piezas conformes (OK) y no conformes (NG), mediante herramientas embebidas de comparación de patrones, presencia/ausencia y evaluación geométrica. La principal contribución del trabajo radica, por tanto, en la integración y validación funcional de una arquitectura de inspección industrial, más que en el desarrollo de un nuevo algoritmo de visión computacional.

El análisis histórico permitió contextualizar el comportamiento de las no conformidades; sin embargo, las variaciones observadas no pueden atribuirse exclusivamente al sistema de visión artificial debido a la intervención de otros factores productivos. Una validación posterior deberá incorporar un mayor número de piezas y métricas cuantitativas de clasificación y repetibilidad.

Finalmente, la arquitectura desarrollada presenta potencial para evolucionar hacia un sistema de inspección y control en

lazo cerrado, mediante la integración del sensor de visión con PLC y sistemas de supervisión industrial. Esta integración permitiría utilizar los resultados de inspección no solo para clasificar o rechazar piezas, sino también para generar alarmas, detener el proceso o modificar variables de operación ante la detección recurrente de no conformidades. De esta manera, el sistema podría constituir una base para futuras estrategias de manufactura inteligente e Industria 4.0 orientadas tanto a la inspección como a la toma automatizada de acciones correctivas.

6. Agradecimientos

Al área de Cómputo y al laboratorio LARSE del Centro Tecnológico Aragón de la FES Aragón – UNAM, por las facilidades y apoyo para el desarrollo de este proyecto.

A profesores y estudiantes Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec por el trabajo colaborativo.

Al Proyecto de investigación científica, humanística, de desarrollo tecnológico e innovación 2026 “Lógica difusa aplicada al control de contenido de agua en biofiltros de lecho escurrido para el tratamiento de emisiones gaseosas”.

7. Referencias

[1] N.-Y. Zhao, J.-Y. Lian, P.-F. Wang, and Z.-B. Xu, “Recent progress in minimizing the warpage and shrinkage deformations by the optimization of process parameters in plastic injection molding: A review,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 120, nos. 1–2, pp. 85–101, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-08859-0.

[2] A. Mourya, A. Nanda, K. Parashar, Sushant, and R. Kumar, “An explanatory study on defects in plastic molding parts caused by machine parameters in injection molding process,” Materials Today: Proceedings, vol. 78, pt. 3, pp. 656–661, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.12.070.

[3] R. Szeliski, Computer Vision: Algorithms and Applications, 2nd ed. Cham, Switzerland: Springer, 2022.

[4] C. Lee, Y. Kim, H. Noh, and H. Kim, “A real-time computer vision-based system for detecting defects in injection-molded products,” Innovative Journal of Applied Science, vol. 1, no. 1, 2024, doi: 10.70844/ijas.2024.1.10.

[5] R. Zhang, Y. Li, and Z. Guan, “Research on injection molded parts defect detection algorithm based on multiplicative feature fusion and improved attention mechanism,” Scientific Reports, vol. 14, Art. no. 30864, 2024.

[6] N. Hütten, M. Alves Gomes, F. Hölken, K. Andricevic, R. Meyes, and T. Meisen, “Deep learning for automated visual inspection in manufacturing and maintenance: A survey of open-access papers,” Applied System Innovation, vol. 7, no. 1, Art. no. 11, 2024, doi: 10.3390/asi7010011.

[7] A. M. C. T. Pereira et al., “A systematic review on deep learning with CNNs applied to surface defect detection,” Journal of Imaging, vol. 9, no. 10, Art. no. 193, 2023, doi: 10.3390/jimaging9100193.

[8] “A systematic review of deep learning approaches for surface defect detection in industrial applications,” Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2024, Art. no. 107717, doi: 10.1016/j.engappai.2023.107717.

[9] L. Zongyou, G. Chunyan, L. Xiaoling, and Z. Minglu, “A review of surface defect detection for metal materials based on deep learning,” Manufacturing Technology & Machine Tool, no. 6, pp. 61–67, 2023, doi: 10.19287/j.mtmt.1005-2402.2023.06.011.

[10] J. Han, G. Cui, Z. Li, and J. Zhao, “DBCW-YOLO: A modified YOLOv5 for the detection of steel surface defects,” Applied Sciences, vol. 14, no. 11, Art. no. 4594, 2024, doi: 10.3390/app14114594.

[11] L. Wang, G. Zhang, W. Wang, J. Chen, X. Jiang, H. Yuan, and Z. Huang, “A defect detection method for industrial aluminum sheet surface based on improved YOLOv8 algorithm,” Frontiers in Physics, vol. 12, Art. no. 1419998, 2024, doi: 10.3389/fphy.2024.1419998.

[12] V. Vasan, N. V. Sridharan, S. Vaithiyanathan, and M. Aghaei, “Detection and classification of surface defects on hot-rolled steel using vision transformers,” Heliyon, vol. 10, no. 19, Art. no. e38498, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e38498.

[13] F. Tayalati, I. Boukrouh, A. Azmani, and M. Azmani, “Integrating Canny filter and convolutional neural networks for quality defect detection in injection molding process,” in Proc. 10th World Congress on Electrical Engineering and Computer Systems and Sciences (EECSS 2024), Barcelona, Spain, 2024, doi: 10.11159/mvml24.120.

[14] Q. Jin and L. Chen, “A survey of surface defect detection of industrial products based on a small number of labeled data,” arXiv preprint arXiv:2203.05733, 2022.

15] J. Chen et al., “NHD-YOLO: Improved YOLOv8 using optimized neck and head for product surface defect detection with data augmentation,” IET Image Processing, 2024, doi: 10.1049/ipr2.13073.

[16] KEYENCE Corporation, IV Series Vision Sensor: Instruction Manual and Technical Specifications, Osaka, Japan, 2026.

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 26-31

ISSN: 2992-7315

Clasificación experimental de movimientos mediante IoT para el estudio del temblor asociado a la enfermedad de Parkinson

Experimental Classification of Movements Using IoT for the Study of Tremors Associated with Parkinson's Disease

Andrés Felipe Orduz-Pérez[a,*], Luis Ángel Lavado-Matias[a], Cesar Augusto Romero-Molano[a]

[a] *Ingeniería Electrónica, Universidad de los Llanos, 500001, Villavicencio, Meta, Colombia*

Resumen

La enfermedad de Parkinson es un trastorno neurodegenerativo progresivo que afecta principalmente el sistema motor y puede provocar síntomas como temblor, rigidez y dificultad para controlar los movimientos. En este contexto, se desarrolló un sistema basado en TinyML e IoT para monitorear y clasificar alteraciones motoras mediante un sensor MPU6050 y un sensor EMG, utilizando un microcontrolador ESP32. Las señales adquiridas fueron preprocesadas y organizadas en tres categorías: sin temblor, temblor suave y temblor fuerte. Se entrenaron y compararon diferentes modelos de aprendizaje automático, obteniendo Random Forest el mejor desempeño, con un accuracy, precisión, recall y F1-score del 96 %. Finalmente, el modelo fue implementado en el ESP32 para realizar la clasificación y el monitoreo en tiempo real, demostrando el potencial de una solución de bajo costo, baja latencia y escalable para el seguimiento de síntomas motores asociados a la enfermedad de Parkinson.

Palabras clave: Enfermedad del Parkinson, ESP32, IoT, Machine Learning.

Abstract

Parkinson's disease is a progressive neurodegenerative disorder that primarily affects the motor system, causing symptoms such as tremor, rigidity, and difficulty controlling movements. In this context, a TinyML- and IoT-based system was developed to monitor and classify motor symptoms using an MPU6050 sensor and an EMG sensor integrated into an ESP32 microcontroller. The acquired signals were preprocessed and categorized into three classes: no tremor, mild tremor, and severe tremor. Different machine learning models were trained and compared, with Random Forest achieving the best performance, obtaining 96% accuracy, precision, recall, and F1-score. Finally, the selected model was implemented on the ESP32 to perform real-time classification and monitoring, demonstrating the potential of a low-cost, low-latency, and scalable solution for monitoring motor symptoms associated with Parkinson's disease.

Keywords: ESP32, IoT, Parkinson's disease, Machine Learning.

1. Introducción

La Enfermedad de Parkinson (EP) es un trastorno neurodegenerativo del sistema nervioso central caracterizado principalmente por la presencia de síntomas motores. Entre los síntomas cardinales se encuentran el temblor, la rigidez, la bradicinesia o acinesia y la inestabilidad postural; sin embargo, el cuadro clínico también incluye manifestaciones no motoras. Entre los factores de riesgo asociados se destacan la edad, el sexo masculino y diversos factores ambientales (Balestrino y Schapira, 2020). El temblor constituye uno de los principales síntomas motores de la EP, presentándose en aproximadamente el 75% de los pacientes y, con frecuencia, en las etapas iniciales de la enfermedad. Este tipo de temblor se manifiesta típicamente en estado de reposo y presenta una frecuencia característica entre 4 y 6 Hz (Bloem et al., 2021; Ou et al., 2021). De acuerdo con (Gigante et al., 2017), el

*Autor para la correspondencia: andres.orduz@unillanos.edu.co
Correo electrónico: andres.orduz@unillanos.edu.co (Andrés Felipe Orduz-Pérez), lalavado@unillanos.edu.co (Luis Ángel Lavado-Matias), cesar.romero@unillanos.edu.co (Cesar Augusto Romero-Molano).

Historial del manuscrito: recibido el 09/09/2026, última versión-revisada recibida el 30/09/2026, aceptado el 01/10/2026, publicado el 06/10/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.23193092

temblor en reposo se reportó al inicio de la enfermedad en el 65,4% de los casos, incrementándose hasta un 74,4% en evaluaciones de seguimiento.

En Colombia, la Enfermedad de Parkinson representa un problema de salud pública creciente. Según datos del Ministerio de Salud y Protección Social, se estima que alrededor de 250.000 personas han sido diagnosticadas con esta enfermedad en el país, con una mayor prevalencia en adultos mayores y una tendencia creciente asociada al envejecimiento poblacional (Ministerio de Salud y Protección Social, 2023). Un estudio basado en registros oficiales del sistema de salud reportó una prevalencia cruda de 5,42 casos por cada mil personas mayores de 50 años, con una mayor afectación en hombres (6,65 por mil) en comparación con mujeres (4,42 por mil). Asimismo, se evidenció un incremento significativo de la prevalencia con la edad, lo que resalta la relación directa entre el envejecimiento poblacional y el aumento de casos de la enfermedad (Rincon-Montana et al., 2025).

El análisis de señales biomédicas ha cobrado una relevancia significativa en el estudio y monitoreo de trastornos neurológicos. El uso de sensores inerciales y electromiográficos permite capturar información detallada del movimiento y la actividad muscular, facilitando la caracterización de patrones asociados a la Enfermedad de Parkinson. En particular, dispositivos como el MPU6050 permiten medir aceleraciones y velocidades angulares, mientras que los sensores de electromiografía (EMG) registran la actividad eléctrica muscular, proporcionando información complementaria para el análisis de síntomas motores como el temblor (Bougea, 2025; Giannakopoulou et al., 2022; Kehnemouyi et al., 2024).

Actualmente, el desarrollo de sistemas de bajo costo para la clasificación de patrones a partir de señales biomédicas ha ganado interés en aplicaciones de salud digital. En este sentido, el uso de TinyML permite implementar modelos de aprendizaje automático directamente en microcontroladores, posibilitando la clasificación en tiempo real con baja latencia y reducido consumo energético. Sin embargo, la mayoría de los estudios se han enfocado en el uso de una sola fuente de datos, existiendo una brecha en la integración de señales multimodales, como la combinación de datos inerciales y electromiográficos, en sistemas embebidos de bajo costo (Weiss et al., 2014; Antonini et al., 2023).

Diversos estudios han explorado el uso de algoritmos de aprendizaje automático para la clasificación del temblor en la EP a partir de señales de sensores portátiles. Una revisión reciente sobre estrategias de ML para la clasificación del temblor parkinsoniano mediante datos de sensores wearables abarca desde métodos clásicos como SVM y Random Forest hasta arquitecturas de aprendizaje profundo como CNN y LSTM, evaluando técnicas de preprocesamiento y extracción de características en dominios temporal y frecuencial (Rasool et al., 2025; di Biase et al., 2024).

En cuanto a la integración multimodal, estudios que combinan señales de acelerómetro y EMG de superficie han alcanzado precisiones superiores al 97% en la clasificación entre temblor parkinsoniano y temblor esencial mediante redes de fusión con mecanismos de atención cruzada. Por su parte, trabajos recientes han implementado clasificadores para el monitoreo continuo del temblor en entornos de vida libre, demostrando que es posible entrenar modelos precisos incluso con conjuntos de datos de tamaño moderado y con distribuciones de clases desbalanceadas (Tang et al., 2024; Rodriguez et al., 2024). En el ámbito de los sistemas embebidos, se ha demostrado la viabilidad de implementar modelos TinyML en microcontroladores para la detección de déficits de marcha en pacientes con EP, señalando que la baja latencia y la independencia de la conectividad de red son las principales motivaciones para adoptar inferencia en el dispositivo frente a soluciones basadas en la nube (Gokul et al., 2020; Heydari y Mahmoud, 2025; Elhanashi et al., 2024).

En este contexto, el presente trabajo propone el diseño e implementación de un sistema para el monitoreo del temblor asociado a la Enfermedad de Parkinson, integrando señales inerciales capturadas mediante el sensor MPU6050 y señales electromiográficas obtenidas con un sensor EMG, implementados en un microcontrolador ESP32 con conectividad IoT. Se evaluaron y compararon distintos algoritmos de aprendizaje automático con el propósito de lograr alta precisión y baja latencia en la clasificación en tiempo real, contribuyendo así al desarrollo de soluciones de monitoreo accesibles, de bajo costo y escalables para el seguimiento de pacientes con la Enfermedad de Parkinson (EP).

2. Materiales y Método

Para el desarrollo del proyecto se empleó un enfoque cuantitativo, debido a que se analizaron señales provenientes de sensores y se utilizaron métricas estadísticas para identificar patrones y evaluar el desempeño de los modelos de aprendizaje automático. El desarrollo del sistema se estructuró en diferentes fases: adquisición de las señales, preprocesamiento y etiquetado de los datos, entrenamiento y comparación de los modelos de clasificación, implementación del modelo seleccionado en el microcontrolador ESP32 y transmisión de los resultados mediante una arquitectura de Internet de las Cosas. Las fases que conforman el desarrollo del proyecto se presentan en la Figura 1.

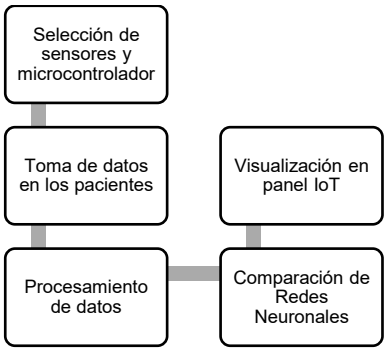


Figura 1: Diagrama de bloques de la metodología

Adquisición de los datos:

Para la adquisición de las señales se utilizó un sensor MPU6050 conectado a un ESP32. El sensor permitió obtener las componentes de aceleración en los ejes X, Y y Z (AX, AY y AZ), así como las componentes de velocidad angular en los

ejes X, Y y Z (GX, GY y GZ). El sensor fue ubicado sobre un guante en el dedo medio de la mano derecha, como se muestra en la Figura 3.

La comunicación entre el ESP32 y el MPU6050 se realizó mediante el protocolo I2C. En el programa utilizado para la adquisición se estableció un intervalo de 100 ms entre lecturas consecutivas, correspondiente a una tasa de adquisición aproximada de 10 muestras por segundo (10 Hz). Los datos obtenidos fueron registrados para posteriormente realizar su procesamiento y clasificación.

Se realizaron pruebas con cinco participantes, con edades entre 20 y 55 años, para las tres categorías definidas durante la adquisición: normal, suave y duro. Para cada categoría se obtuvieron 1500 registros, para un total de 4500 registros. La categoría normal correspondió a la condición de mano quieta, mientras que las categorías suave y duro correspondieron a las condiciones de movimiento establecidas durante la toma de datos.

Preprocesamiento y organización de los datos

Una vez adquiridas las señales, los datos fueron organizados y procesados mediante Python. Cada registro del MPU6050 estuvo compuesto por las seis variables correspondientes a los ejes del acelerómetro y del giroscopio: *AX, AY, AZ, GX, GY y GZ*. Estas variables fueron utilizadas directamente como entradas de los modelos de clasificación.

Para la evaluación de los modelos se tuvo en cuenta la separación de los registros por participante. Debido a que los datos fueron obtenidos de cinco participantes y almacenados en archivos CSV independientes, se planteó una evaluación por participante mediante validación cruzada dejando un participante fuera en cada iteración (Leave-One-Subject-Out, LOSO). En cada iteración, los registros de cuatro participantes fueron utilizados para el entrenamiento y los registros del participante restante para la prueba. Este procedimiento se repitió hasta utilizar a cada participante como conjunto de prueba, evitando que registros de una misma persona estuvieran simultáneamente en los conjuntos de entrenamiento y prueba.

Entrenamiento y comparación de los modelos

Con el propósito de identificar el método de clasificación con mejor desempeño para las condiciones del proyecto, se compararon cinco modelos de aprendizaje automático: Bosque Aleatorio (Random Forest, RF), Máquinas de Vectores de Soporte (Support Vector Machine, SVM), K-vecinos más cercanos (K-Nearest Neighbors, KNN), Árbol de Decisión (Decision Tree, DT) y Regresión Logística (Logistic Regression, LR).

Los modelos fueron entrenados utilizando como variables de entrada las mediciones AX, AY, AZ, GX, GY y GZ, y como variable objetivo la categoría correspondiente al nivel de temblor. El desempeño de cada modelo fue posteriormente comparado mediante las métricas de clasificación obtenidas sobre el conjunto de prueba.

Además de las variables utilizadas para la clasificación, las señales obtenidas mediante el sensor EMG permitieron observar la activación muscular de los participantes durante las pruebas, proporcionando información complementaria para el análisis del movimiento.

Implementación del modelo

Después de comparar los resultados obtenidos por los diferentes clasificadores, se seleccionó el modelo con el desempeño más adecuado para las condiciones establecidas. El modelo seleccionado fue posteriormente preparado para su implementación en el microcontrolador ESP32.

La implementación permitió realizar la clasificación utilizando las señales obtenidas directamente de los sensores, con el propósito de evaluar el funcionamiento del sistema en condiciones de operación similares a las de su aplicación final.

Arquitectura de Internet de las Cosas

Finalmente, se desarrolló una arquitectura de Internet de las Cosas para la transmisión de los resultados obtenidos. El ESP32 permitió enviar información relacionada con la clasificación del nivel de temblor y la activación muscular hacia una plataforma de monitoreo remoto, facilitando la visualización de los resultados y el seguimiento de las variables obtenidas durante las pruebas.

Aspectos éticos

La participación de las personas en el estudio fue voluntaria y previamente acordada, explicando el procedimiento de adquisición de las señales y el uso de los sensores durante las pruebas. Los participantes aceptaron la realización de las mediciones y el uso de los datos obtenidos con fines académicos y de investigación.

Durante el desarrollo del estudio se procuró mantener la confidencialidad de la información de los participantes y los datos obtenidos fueron utilizados únicamente para el desarrollo y evaluación del sistema propuesto.

3. Resultados

El sensor MPU6050 utilizado en el sistema corresponde a una unidad de medición inercial de seis grados de libertad, integrada por un acelerómetro y un giroscopio de tres ejes. El acelerómetro permite obtener mediciones en los ejes X, Y y Z, mientras que el giroscopio registra las variaciones de velocidad angular en dichos ejes (InvenSense Inc., 2013). Por su parte, el sensor de electromiografía (EMG) permitió registrar la actividad eléctrica asociada con la activación muscular durante las pruebas (Advancer Technologies, 2013).

El ESP-32 fue seleccionado como plataforma de procesamiento embebido dada su capacidad computacional para ejecutar modelos de aprendizaje automático en el dispositivo, su bajo costo, su reducido consumo energético y su conectividad inalámbrica WiFi/Bluetooth, que posibilita la transmisión de datos y resultados en el marco de una arquitectura IoT (Hercog et al., 2023).

El sensor MPU6050 fue ubicado en un guante sobre el dedo medio (Figura 2) debido a que esta región de la mano se encuentra estrechamente relacionada con la actividad motora fina y con músculos responsables de los movimientos de flexión y extensión de los dedos, como el flexor profundo de los dedos y el extensor común de los dedos. En pacientes con Enfermedad de Parkinson, el temblor suele manifestarse con mayor intensidad en las extremidades distales, especialmente en los dedos y manos, permitiendo que esta zona sea adecuada para la captura de micro oscilaciones

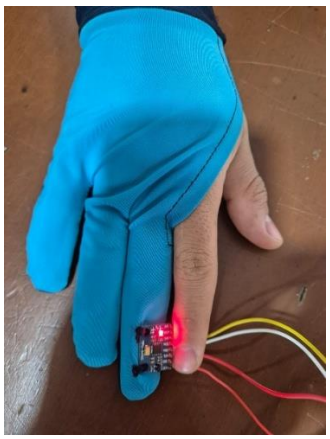
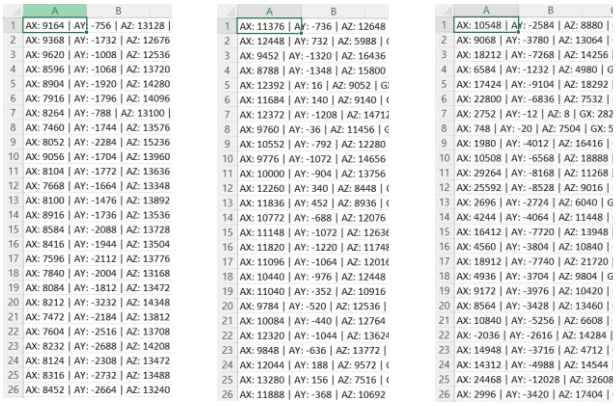


Figura 2: Guante con el sensor MPU6050 en el dedo medio de la mano derecha.

Para la adquisición de los datos se programó el ESP32 para realizar la lectura de las variables proporcionadas por el MPU6050. Los registros obtenidos fueron almacenados en archivos en formato CSV y organizados en tres categorías experimentales: sin movimiento, movimiento suave y movimiento fuerte. Para cada categoría se obtuvieron 1500 muestras, para un total de 4500 muestras.

La Figura 3 presenta ejemplos de los archivos utilizados para organizar los datos correspondientes a las tres categorías. Cada registro contiene las mediciones de los tres ejes del acelerómetro (AX, AY y AZ) y de los tres ejes del giroscopio (GX, GY y GZ).



	A	B
1	AX: 9164 | AY: -756 | AZ: 13128 |	
2	AX: 9368 | AY: -1732 | AZ: 12676	
3	AX: 9620 | AY: -1008 | AZ: 12536	
4	AX: 8596 | AY: -1068 | AZ: 13720	
5	AX: 8904 | AY: -1920 | AZ: 14280	
6	AX: 7916 | AY: -1796 | AZ: 14096	
7	AX: 8264 | AY: -788 | AZ: 13100 |	
8	AX: 7460 | AY: -1744 | AZ: 13576	
9	AX: 8052 | AY: -2284 | AZ: 15236	
10	AX: 9056 | AY: -1704 | AZ: 13960	
11	AX: 8104 | AY: -1772 | AZ: 13636	
12	AX: 7668 | AY: -1664 | AZ: 13348	
13	AX: 8100 | AY: -1476 | AZ: 13892	
14	AX: 8916 | AY: -1736 | AZ: 13536	
15	AX: 8584 | AY: -2088 | AZ: 13728	
16	AX: 8416 | AY: -1944 | AZ: 13504	
17	AX: 7596 | AY: -2112 | AZ: 13776	
18	AX: 7840 | AY: -2004 | AZ: 13168	
19	AX: 8084 | AY: -1812 | AZ: 13472	
20	AX: 8212 | AY: -3232 | AZ: 14348	
21	AX: 7472 | AY: -2184 | AZ: 13812	
22	AX: 7604 | AY: -2516 | AZ: 13708	
23	AX: 8232 | AY: -2688 | AZ: 14208	
24	AX: 8124 | AY: -2308 | AZ: 13472	
25	AX: 8316 | AY: -2732 | AZ: 13488	
26	AX: 8452 | AY: -2664 | AZ: 13240	

(a).csv sin movimiento

	A	B
1	AX: 11376 | AY: -736 | AZ: 12648	
2	AX: 12448 | AY: 732 | AZ: 5988 | (	
3	AX: 9452 | AY: -1320 | AZ: 16436	
4	AX: 8788 | AY: -1348 | AZ: 15800	
5	AX: 12392 | AY: 16 | AZ: 9052 | G	
6	AX: 11684 | AY: 140 | AZ: 9140 | (	
7	AX: 12372 | AY: -1208 | AZ: 14711	
8	AX: 9760 | AY: -36 | AZ: 11456 | (	
9	AX: 10552 | AY: -792 | AZ: 12280	
10	AX: 9776 | AY: -1072 | AZ: 14656	
11	AX: 10000 | AY: -904 | AZ: 13756	
12	AX: 12260 | AY: 340 | AZ: 8448 | (	
13	AX: 11836 | AY: 452 | AZ: 8936 | (	
14	AX: 10772 | AY: -688 | AZ: 12076	
15	AX: 11148 | AY: -1072 | AZ: 1263(	
16	AX: 11820 | AY: -1220 | AZ: 1174(	
17	AX: 11096 | AY: -1064 | AZ: 1201(	
18	AX: 10440 | AY: -976 | AZ: 12448	
19	AX: 11040 | AY: -352 | AZ: 10916	
20	AX: 9784 | AY: -520 | AZ: 12536 |	
21	AX: 10084 | AY: -440 | AZ: 12764	
22	AX: 12320 | AY: -1044 | AZ: 1362(	
23	AX: 9848 | AY: -636 | AZ: 13772 |	
24	AX: 12044 | AY: 188 | AZ: 9572 | (	
25	AX: 13280 | AY: 156 | AZ: 7516 | (	
26	AX: 11888 | AY: -368 | AZ: 10692	

(b).csv movimiento suave

	A	B
1	AX: 10548 | AY: -2584 | AZ: 8880 |	
2	AX: 9068 | AY: -3780 | AZ: 13064 |	
3	AX: 18212 | AY: -7268 | AZ: 14256	
4	AX: 6584 | AY: -1232 | AZ: 4980 | G	
5	AX: 17424 | AY: -9104 | AZ: 18292	
6	AX: 22800 | AY: -6836 | AZ: 7532 |	
7	AX: 2752 | AY: -12 | AZ: 8 | GX: 282	
8	AX: 748 | AY: -20 | AZ: 7504 | GX: 5	
9	AX: 1980 | AY: -4012 | AZ: 16416 |	
10	AX: 10508 | AY: -6568 | AZ: 18888	
11	AX: 29264 | AY: -8168 | AZ: 11268	
12	AX: 25592 | AY: -8528 | AZ: 9016 |	
13	AX: 2696 | AY: -2724 | AZ: 6040 | G	
14	AX: 4244 | AY: -4064 | AZ: 11448 |	
15	AX: 16412 | AY: -7720 | AZ: 13948	
16	AX: 4560 | AY: -3804 | AZ: 10840 |	
17	AX: 18912 | AY: -7740 | AZ: 21720	
18	AX: 4936 | AY: -3704 | AZ: 9804 | G	
19	AX: 9172 | AY: -3976 | AZ: 10420 |	
20	AX: 8564 | AY: -3428 | AZ: 13460 |	
21	AX: 10840 | AY: -5256 | AZ: 6608 |	
22	AX: -2036 | AY: -2616 | AZ: 14284 |	
23	AX: 14948 | AY: -3716 | AZ: 4712 |	
24	AX: 14312 | AY: -4988 | AZ: 14544	
25	AX: 24468 | AY: -12028 | AZ: 32608	
26	AX: 2996 | AY: -3420 | AZ: 17404 |	

(c).csv movimiento fuerte

Figura 3: En la imagen (a), (b) y (c) se detallan los archivos .csv donde se registran la aceleración y los ángulos de movimiento.

La Figura 4 presenta la evolución de las variables registradas para las tres categorías. Se observa una diferencia en el comportamiento de las señales a medida que aumenta la intensidad del movimiento. La condición sin movimiento presenta menores variaciones, mientras que las categorías de movimiento suave y movimiento fuerte presentan mayores fluctuaciones en las señales registradas.

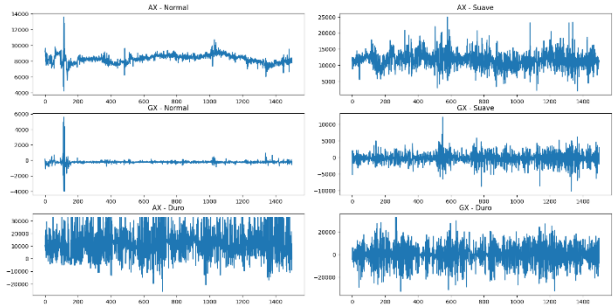


Figura 4: Gráfica de los 1500 datos para cada variable medida.

En la Figura 5 se comparan las señales correspondientes a los ejes del giroscopio. La condición sin movimiento presenta variaciones de menor magnitud, mientras que las condiciones de movimiento suave y movimiento fuerte muestran mayores cambios en las mediciones de velocidad angular.

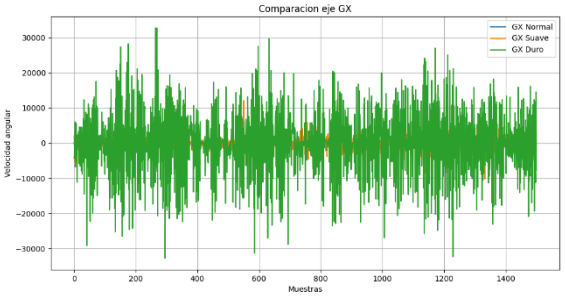


Figura 5: Comparación de los ejes G.

La Figura 6 presenta la comparación de las señales obtenidas mediante los ejes del acelerómetro. Se observa un incremento en las variaciones de las señales conforme aumenta la intensidad del movimiento, siendo más pronunciadas en la categoría de movimiento fuerte.

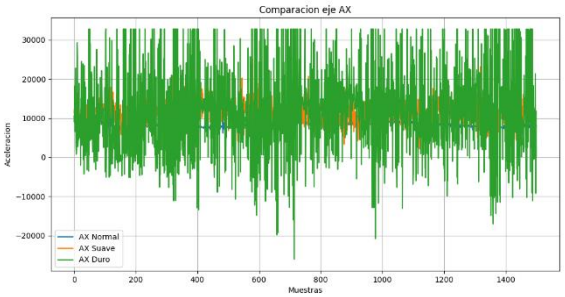


Figura 6: Comparación de los ejes A.

Para evaluar el comportamiento de los modelos de clasificación, se procesaron los 4500 registros mediante Python. Las variables AX, AY, AZ, GX, GY y GZ fueron utilizadas como entradas de los modelos, mientras que la categoría experimental correspondiente se utilizó como variable objetivo.

Para evaluar el comportamiento de los modelos de clasificación, se procesaron los 4500 registros mediante Python. Las variables AX, AY, AZ, GX, GY y GZ fueron utilizadas como entradas de los modelos, mientras que la categoría experimental correspondiente se utilizó como variable objetivo.

Debido a que los registros fueron almacenados en archivos CSV independientes para cada participante, la evaluación se realizó considerando la separación por participante. En cada iteración se utilizaron los registros de cuatro participantes para el entrenamiento y los registros del participante restante para la prueba, repitiendo el procedimiento hasta utilizar a cada participante como conjunto de prueba. De esta manera, los registros de un mismo participante no fueron utilizados simultáneamente para el entrenamiento y la prueba.

Los modelos evaluados fueron Bosque Aleatorio (Random Forest), Máquinas de Vectores de Soporte (SVM), K vecinos más cercanos (KNN), Árbol de Decisión (Decision Tree) y Regresión Logística.

Tabla 1

Modelo	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Random Forest	0,9622	0,9625	0,9622	0,9623
SVM	0,9500	0,9505	0,9500	0,9499
KNN	0,9433	0,9483	0,9433	0,9433
Decision Tree	0,9411	0,9411	0,9411	0,9411
Logistic Regression	0,8655	0,8109	0,8655	0,8633

Nota: Comparación de modelos

Los resultados presentados en la Tabla 1 muestran que para el modelo de Bosque Aleatorio, la exactitud obtenida fue de 96,22 %, con un intervalo de confianza del 95 % entre 94,77 % y 97,28 %. Este intervalo permite complementar la exactitud puntual obtenida durante la evaluación. Estos resultados corresponden a la evaluación realizada con la separación de los registros por participante. Debido a este comportamiento dentro de los modelos evaluados, el Bosque Aleatorio fue seleccionado para su implementación en el sistema embebido.

La matriz de confusión del modelo de Bosque Aleatorio se presenta en la Figura 7. De las 900 muestras correspondientes al conjunto de prueba, 866 fueron clasificadas correctamente y 34 presentaron errores de clasificación, lo que corresponde a una exactitud del 96,22 %.

Para la categoría de movimiento fuerte se obtuvieron 287 clasificaciones correctas y 13 muestras fueron clasificadas como movimiento suave. En la categoría sin movimiento se obtuvieron 294 clasificaciones correctas y 6 muestras fueron clasificadas como movimiento suave. Finalmente, en la categoría de movimiento suave se clasificaron correctamente 285 muestras, mientras que 14 fueron clasificadas como movimiento fuerte y 1 como sin movimiento.

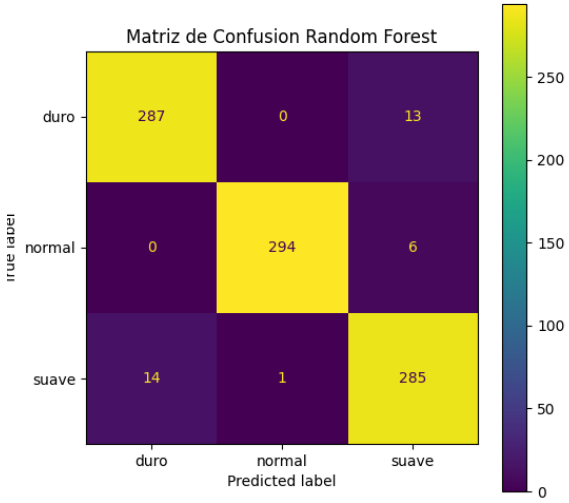


Figura 7: Matriz de confusión del modelo seleccionado

La Figura 8 presenta el espectro en frecuencia obtenido mediante la Transformada Rápida de Fourier aplicada a las señales registradas por el MPU6050 para las tres categorías experimentales.

Se observa una diferencia en la distribución de la magnitud espectral entre las categorías. La condición de movimiento fuerte presenta mayores componentes espectrales en comparación con las condiciones de movimiento suave y sin movimiento, mientras que esta última presenta menores variaciones y un comportamiento más estable.

La representación en frecuencia permite complementar el análisis temporal de las señales y observar diferencias en su contenido espectral. Durante la adquisición se estableció un intervalo aproximado de 100 ms entre lecturas, correspondiente a una tasa de adquisición aproximada de 10 muestras por segundo. Por tanto, el análisis frecuencial debe interpretarse considerando el límite de frecuencia establecido por dicha tasa de adquisición.

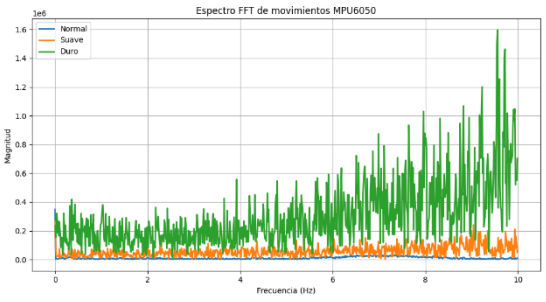


Figura 8: Espectro FFT para cada movimiento

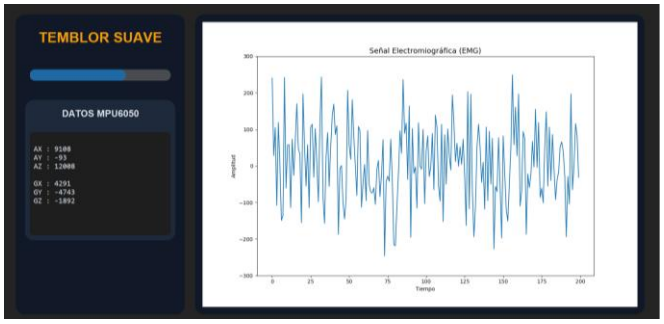


Figura 9: Panel IoT

Finalmente, el modelo seleccionado fue implementado en el ESP32. La Figura 9 presenta el panel de monitoreo desarrollado para la arquitectura de Internet de las Cosas, en el cual se visualiza la señal electromiográfica en tiempo real, la clasificación obtenida y los valores registrados mediante el MPU6050.

4. Discusión

Los resultados obtenidos muestran que el sensor MPU6050 permitió registrar variaciones en las señales de aceleración y velocidad angular asociadas con las diferentes condiciones de movimiento establecidas durante las pruebas. Su ubicación en el dedo medio permitió obtener información relacionada con los movimientos de la mano y facilitó la adquisición de las señales utilizadas posteriormente para la clasificación. Por su parte, el sensor de electromiografía proporcionó información complementaria sobre la actividad eléctrica muscular durante las pruebas.

En la comparación de los modelos de clasificación, el Bosque Aleatorio obtuvo los valores más altos de las métricas evaluadas, con una exactitud de 96,22 %, una precisión de 96,25 %, una sensibilidad de 96,22 % y una puntuación F1 de 96,23 %. Estos resultados fueron superiores a los obtenidos por Máquinas de Vectores de Soporte, K vecinos más cercanos, Árbol de Decisión y Regresión Logística dentro del conjunto de datos utilizado en este estudio. El comportamiento observado coincide con investigaciones que han explorado el uso de técnicas de aprendizaje automático junto con señales obtenidas mediante sensores para el análisis de alteraciones motoras asociadas con la enfermedad de Parkinson (Rasool et al., 2025; di Biase et al., 2024).

El análisis en frecuencia mediante la Transformada Rápida de Fourier permitió observar diferencias en el comportamiento espectral de las tres categorías experimentales. La categoría de movimiento fuerte presentó mayores magnitudes espectrales en comparación con las categorías de movimiento suave y sin movimiento. Sin embargo, debido a que no se dispone actualmente del valor documentado de la frecuencia de muestreo utilizada durante la adquisición, estos resultados deben interpretarse como una comparación del comportamiento espectral de las señales y no como una caracterización clínica definitiva de las frecuencias asociadas al temblor parkinsoniano.

La implementación del modelo en el ESP32 y su integración con la interfaz de monitoreo demostraron la viabilidad de realizar la clasificación directamente en el dispositivo y transmitir los resultados mediante la arquitectura de Internet de las Cosas. Esta implementación puede reducir la dependencia de un procesamiento externo para realizar la clasificación. No obstante, la evaluación realizada en este trabajo corresponde a una prueba experimental del sistema y no permite establecer por sí sola su desempeño en condiciones clínicas reales.

Una de las principales limitaciones del estudio corresponde al número de participantes, ya que el conjunto de datos fue construido a partir de cinco personas. Aunque se obtuvieron 4500 muestras, estas no representan 4500 participantes independientes, sino múltiples registros provenientes de un grupo reducido de personas. Adicionalmente, la división de los datos se realizó sobre el conjunto total de muestras, utilizando el 80 % para entrenamiento y el 20 % para prueba, por lo que pueden existir muestras del mismo participante en ambos conjuntos. Esta condición puede producir dependencia entre los datos de entrenamiento y prueba y debe considerarse al interpretar las métricas obtenidas.

Por esta razón, el porcentaje de exactitud obtenido debe interpretarse dentro de las condiciones experimentales utilizadas y no como una medida de desempeño clínico generalizable a la población con enfermedad de Parkinson. Para determinar la capacidad de generalización del sistema sería necesario realizar estudios posteriores con un número mayor de participantes, incorporar grupos de comparación y realizar una separación de los datos por participante, de manera que los sujetos utilizados para evaluar el modelo no estén presentes en el conjunto de entrenamiento.

Finalmente, aunque los resultados obtenidos muestran la viabilidad de utilizar las señales del MPU6050 para diferenciar las categorías de movimiento establecidas, se requieren evaluaciones adicionales para determinar la aplicabilidad del sistema al análisis del temblor asociado específicamente con la enfermedad de Parkinson. Estas evaluaciones deberían considerar variables clínicas, condiciones controladas de adquisición y una población de estudio mayor.

5. Limitaciones

Entre las principales limitaciones del estudio se encuentra el número reducido de participantes, correspondiente a cinco personas, por lo que los resultados deben interpretarse como una evaluación experimental y no como una validación clínica. Las categorías utilizadas corresponden a condiciones experimentales de movimiento y no constituyen una clasificación clínica del temblor asociado a la enfermedad de Parkinson.

La cantidad de participantes limita la posibilidad de generalizar los resultados a una población más amplia. Por esta razón, se requieren estudios posteriores con un mayor

número de participantes y con personas que cuenten con diagnóstico clínico de la enfermedad, además de un protocolo de evaluación establecido por profesionales del área de la salud.

La adquisición se realizó con un intervalo aproximado de 100 ms entre lecturas, correspondiente a una tasa de adquisición aproximada de 10 Hz. Esta frecuencia limita el rango de frecuencias que puede analizarse mediante la Transformada Rápida de Fourier, por lo que el análisis frecuencial presentado debe interpretarse como una comparación experimental de las señales obtenidas.

El prototipo no incluyó una caracterización de memoria, latencia y consumo energético. Estos parámetros se reconocen como limitaciones del estudio y se proponen como trabajo futuro para la validación técnica del sistema.

6. Conclusiones

Se logró desarrollar un sistema basado en IoT y aprendizaje automático para la clasificación de movimientos en las categorías normal, suave y duro, utilizando las señales obtenidas mediante el sensor MPU6050.

Entre los modelos evaluados, el algoritmo Bosque Aleatorio (Random Forest) presentó el mayor rendimiento, con una exactitud del 96,22 %, una precisión del 96,25 %, una sensibilidad del 96,22 % y una puntuación F1 del 96,23 %. Estos resultados muestran un buen comportamiento del modelo para las categorías de movimiento evaluadas en el conjunto de datos utilizado.

El análisis mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) permitió observar diferencias en el comportamiento frecuencial de las señales entre las categorías estudiadas. Este análisis permitió complementar la interpretación de las señales obtenidas durante las pruebas experimentales.

Asimismo, la implementación de la interfaz IoT permitió visualizar en tiempo real las señales y el estado del movimiento clasificado. Esto evidencia la viabilidad técnica de integrar el sistema de adquisición, clasificación y visualización mediante el ESP32. Sin embargo, para considerar su aplicación en el monitoreo del temblor asociado a la enfermedad de Parkinson, se requiere realizar estudios posteriores con un mayor número de participantes, validación clínica y una metodología de evaluación que permita separar los datos de entrenamiento y prueba por participante.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de los Llanos por el apoyo brindado y el uso de sus instalaciones.

8. Referencias

Advancer Technologies. (2013). Muscle Sensor v3 user's manual.

Antonini, A., et al. (2023). Toward objective monitoring of Parkinson's disease motor symptoms using a wearable device: wearability and performance evaluation of PDMonitor®. Frontiers in Neurology, 14, Article 1080752. https://doi.org/10.3389/fneur.2023.1080752

Balestrino, R., & Schapira, A. H. V. (2020). Parkinson disease. European Journal of Neurology, 27(1), 27–42. https://doi.org/10.1111/ene.14108

Bloem, B. R., Okun, M. S., & Klein, C. (2021). Parkinson's disease. The Lancet, 397(10291), 2284–2303. https://doi.org/10.1016/S0140-6736(21)00218-X

Bougea, A. (2025). Application of Wearable Sensors in Parkinson's Disease: State of the Art. Journal of Sensor and Actuator Networks, 14(2), Article 23. https://doi.org/10.3390/jsan14020023

di Biase, L., et al. (2024). Machine learning and wearable sensors for automated Parkinson's disease diagnosis aid: a systematic review. Journal of Neurology, 271, 6452–6470. https://doi.org/10.1007/s00415-024-12611-x

Elhanashi, A., Dini, P., Saponara, S., & Zheng, Q. (2024). Advancements in TinyML: Applications, Limitations, and Impact on IoT Devices. Electronics, 13(17), Article 3562. https://doi.org/10.3390/electronics13173562

Giannakopoulou, K. M., Roussaki, I., & Demestichas, K. (2022). Internet of Things Technologies and Machine Learning Methods for Parkinson's Disease Diagnosis, Monitoring and Management: A Systematic Review. Sensors, 22(5), Article 1799. https://doi.org/10.3390/s22051799

Gigante, A. F., et al. (2017). Rest tremor in Parkinson's disease: Body distribution and time of appearance. Journal of the Neurological Sciences, 375, 215–219. https://doi.org/10.1016/j.jns.2016.12.057

Gokul, H., Suresh, P., Hari Vignesh, B., Pravin Kumaar, R., & Vijayaraghavan, V. (2020). Gait Recovery System for Parkinson's Disease using Machine Learning on Embedded Platforms. In 2020 IEEE International Systems Conference (SysCon) (pp. 1–8). IEEE. https://doi.org/10.1109/SysCon47679.2020.9275930

Hercog, D., Lerher, T., Truntič, M., & Težak, O. (2023). Design and Implementation of ESP32-Based IoT Devices. Sensors, 23(15), Article 6739. https://doi.org/10.3390/s23156739

Heydari, S., & Mahmoud, Q. H. (2025). Tiny Machine Learning and On-Device Inference: A Survey of Applications, Challenges, and Future Directions. Sensors, 25(10), Article 3191. https://doi.org/10.3390/s25103191

InvenSense Inc. (2013). MPU-6000 and MPU-6050 register map and descriptions (Rev. 4.2). https://www.invensense.com

Kehnemouyi, Y. M., Coleman, T. P., & Tass, P. A. (2024). Emerging wearable technologies for multisystem monitoring and treatment of Parkinson's disease: a narrative review. Frontiers in Network Physiology, 4, Article 1354211. https://doi.org/10.3389/fnetp.2024.1354211

Ministerio de Salud y Protección Social. (2023). Gobierno de Colombia. https://www.minsalud.gov.co

Ou, R., et al. (2021). Facial tremor in patients with Parkinson's disease: prevalence, determinants and impacts on disease progression. BMC Neurology, 21(1), Article 86. https://doi.org/10.1186/s12883-021-02105-y

Rasool, M., Maqsood, S., & Azam, M. A. (2025). Machine Learning Strategies for Parkinson Tremor Classification Using Wearable Sensor Data (arXiv:2501.18671). arXiv. https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.18671

Rincon-Montana, A. G., Pantoja, C., Torres, J. F., Tamayo Torres, C. S., & Rosselli, D. (2025). Prevalence, demographic characteristics of Parkinson disease and associated comorbidities: An analysis of the Colombian Ministry of Health official registry. Acta Neurológica Colombiana, 41(1). https://doi.org/10.22379/anc.v41i1.1927

Rodriguez, F., et al. (2024). Continuous and Unconstrained Tremor Monitoring in Parkinson's Disease Using Supervised Machine Learning and Wearable Sensors. Parkinson's Disease, 2024, Article 5787563. https://doi.org/10.1155/2024/5787563

Tang, L., et al. (2024). A multimodal fusion network based on a cross-attention mechanism for the classification of Parkinsonian tremor and essential tremor. Scientific Reports, 14, Article 28050. https://doi.org/10.1038/s41598-024-79111-w

Weiss, A., Herman, T., Giladi, N., & Hausdorff, J. M. (2014). Objective Assessment of Fall Risk in Parkinson's Disease Using a Body-Fixed Sensor Worn for 3 Days. PLOS ONE, 9(5), Article e96675. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096675

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 32 – 42

ISSN: 2992-7315

Diseño, construcción y validación funcional de un deshidratador solar sustentable utilizando materiales recuperados

Design, Construction, and Functional Validation of a Sustainable Solar Dehydrator Using Recovered Materials

María de la Luz Delgadillo Torres [a], Mariana Bárcenas Castañeda [a], Blanca Gabriela Cuevas González [a], Arturo Aguilar Pérez [b]

[a] *Ingeniería Química y Bioquímica, TecNM/ Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.*
[b] *Centro Tecnológico Aragón, Facultad de Estudios Superiores Aragón, Universidad Nacional Autónoma de México, México.*

Resumen

El aprovechamiento de la energía solar representa una alternativa sustentable para la conservación de alimentos. El objetivo del presente trabajo fue diseñar, construir y validar funcionalmente un deshidratador solar sustentable utilizando materiales recuperados provenientes de remanentes industriales. Para el desarrollo del prototipo se empleó una metodología basada en un análisis FODA y en el modelado mediante el software AutoCAD 2023, herramientas que permitieron establecer los criterios de diseño y definir la configuración estructural del sistema antes de su construcción. Posteriormente, el prototipo fue ensamblado utilizando policarbonato, acero inoxidable y componentes metálicos recuperados, y su funcionamiento se verificó mediante pruebas experimentales bajo condiciones ambientales naturales, empleando rodajas de manzana como material de estudio. Los resultados demostraron que el sistema presentó estabilidad durante la operación, incremento de la temperatura interna respecto al ambiente y capacidad funcional para favorecer la reducción gradual del contenido de humedad aprovechando la circulación natural del aire. La metodología implementada permitió validar el diseño, la construcción y la funcionalidad del prototipo, demostrando la viabilidad del empleo de materiales recuperados para el desarrollo de deshidratadores solares sustentables.

Palabras clave: deshidratación solar, materiales recuperados, energía renovable, sustentabilidad, diseño tecnológico.

Abstract

The use of solar energy represents a sustainable alternative for food preservation. The objective of this study was to design, construct, and functionally validate a sustainable solar dehydrator using recovered materials from industrial remnants. The prototype was developed using a methodology based on SWOT analysis and modeling with AutoCAD 2023, which enabled the establishment of design criteria and the definition of the system's structural configuration prior to construction. Subsequently, the prototype was assembled using polycarbonate, stainless steel, and recovered metallic components, and its operation was verified through experimental tests conducted under natural environmental conditions using apple slices as the test material. The results demonstrated that the system remained stable during operation, achieved higher internal temperatures than the surrounding environment, and exhibited the functional capacity to promote a gradual reduction in moisture content through natural air circulation. The implemented methodology enabled the validation of the prototype's design, construction, and functionality, demonstrating the feasibility of using recovered materials for the development of sustainable solar dehydration systems.

Keywords: solar dehydration, recovered materials, renewable energy, sustainability, technological design.

1. Introducción

La conservación de alimentos mediante procesos de deshidratación ha sido utilizada históricamente como una de las principales estrategias para disminuir pérdidas postcosecha y prolongar la vida útil de productos agrícolas. La reducción del contenido de humedad permite limitar el crecimiento de microorganismos, disminuir reacciones químicas de deterioro y conservar durante mayor tiempo las

*Autor para la correspondencia: ldelgadillo@tese.edu.mx
Correo electrónico: ldelgadillo@tese.edu.mx (María de la Luz, Delgadillo Torres).

Historial del manuscrito: recibido el 22/08/2026, última versión-revisada recibida el 24/09/2026, aceptado el 01/10/2026, publicado el 06/10/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.23193599

propiedades físicas, químicas y organolépticas de diversos alimentos. Debido a ello, la deshidratación continúa siendo una técnica ampliamente utilizada en aplicaciones domésticas, artesanales e industriales (Medina, 2015).

El proceso de secado consiste en remover agua presente en los alimentos mediante transferencia simultánea de calor y masa. Este procedimiento reduce la actividad acuosa del producto y disminuye la proliferación bacteriana, permitiendo conservar alimentos durante periodos prolongados sin necesidad de refrigeración continua. Entre los productos comúnmente deshidratados se encuentran frutas, vegetales, semillas y plantas aromáticas, debido a que presentan altos contenidos de humedad susceptibles al deterioro microbiológico (Nnamchi et al., 2025).

Además de incrementar la vida útil de los alimentos, la deshidratación permite reducir peso y volumen de almacenamiento, facilitando transporte, conservación y comercialización. Estas ventajas han favorecido el desarrollo de diferentes tecnologías de secado enfocadas en mejorar eficiencia energética y disminuir costos operativos en aplicaciones agrícolas e industriales (García et al., 2012).

1.1. Energía solar y tecnologías sustentables

Actualmente, el incremento en el consumo energético y la necesidad de implementar tecnologías sustentables han impulsado el desarrollo de sistemas de secado que emplean fuentes de energía renovable, particularmente la energía solar. Este tipo de tecnologías permite reducir el uso de combustibles fósiles, disminuir emisiones contaminantes y minimizar el impacto ambiental asociado a procesos industriales convencionales (Santamarta, 2004).

La energía solar representa una de las fuentes renovables con mayor potencial debido a su disponibilidad, bajo impacto ambiental y capacidad de aplicación en diferentes procesos térmicos. Los sistemas de deshidratación solar aprovechan la radiación incidente para incrementar la temperatura del aire y favorecer la evaporación de humedad presente en los alimentos, reduciendo significativamente el consumo eléctrico requerido en métodos tradicionales de secado (Guillén, 2019; Nigro et al., 2026).

México posee condiciones climáticas favorables para el aprovechamiento de energía solar debido a sus elevados niveles de irradiación durante gran parte del año. Estas características permiten desarrollar tecnologías de secado accesibles y de bajo costo, especialmente para aplicaciones rurales, académicas y domésticas. En distintas regiones del país, los sistemas solares representan una alternativa viable para el aprovechamiento de recursos naturales y el fortalecimiento de estrategias sustentables relacionadas con conservación alimentaria y reducción del desperdicio agrícola (Santamarta, 2004).

1.2. Problemática ambiental y aprovechamiento de materiales recuperados

A pesar de las ventajas asociadas a la deshidratación solar, muchos equipos comerciales presentan costos elevados de fabricación y operación, además de requerir materiales especializados y consumo constante de energía eléctrica para ventilación o control térmico. Esta situación limita su implementación en pequeños productores, comunidades rurales e instituciones educativas que requieren alternativas accesibles para el aprovechamiento de energía renovable (García et al., 2012).

Paralelamente, diversos procesos industriales generan remanentes metálicos y materiales que, en numerosos casos, son desechados aun cuando conservan propiedades físicas y mecánicas adecuadas para aplicaciones tecnológicas y experimentales. Materiales como policarbonato, aluminio y acero inoxidable provenientes de sobrantes industriales pueden aprovecharse en la fabricación de equipos sustentables debido a su resistencia térmica, durabilidad y facilidad de adaptación estructural (Yucailla et al., 2020).

El aprovechamiento de materiales recuperados contribuye a disminuir la generación de residuos industriales y favorece estrategias relacionadas con sostenibilidad y economía circular orientadas al uso responsable de recursos materiales. Además, la incorporación de este tipo de materiales permite desarrollar tecnologías accesibles enfocadas en el aprovechamiento de energía renovable y aplicaciones experimentales sustentables (Yucailla et al., 2020).

1.3. Diseño y construcción de prototipos sustentables

El diseño y construcción de prototipos sustentables constituye una etapa fundamental en el desarrollo de tecnologías para el aprovechamiento de energías renovables, ya que permite integrar criterios de funcionalidad, eficiencia, disponibilidad de materiales y facilidad de fabricación desde las primeras etapas del proyecto. En el caso de los deshidratadores solares, las decisiones relacionadas con la geometría del equipo, la captación de radiación solar, la circulación natural del aire y la selección de materiales influyen directamente en el comportamiento térmico y en el desempeño del sistema durante su operación. Por ello, el proceso de diseño representa un elemento esencial para garantizar la funcionalidad del prototipo antes de su construcción y validación experimental (Abdulmajeed et al., 2026; Nigro et al., 2026).

El desarrollo de prototipos sustentables incorpora, además, estrategias orientadas al aprovechamiento de materiales recuperados provenientes de remanentes industriales, con el propósito de reducir el consumo de materias primas y favorecer el reúso de componentes con potencial de aplicación tecnológica. Asimismo, el empleo de herramientas de diseño asistido por computadora permite definir dimensiones, distribución de componentes y criterios constructivos antes de la fabricación física del equipo, disminuyendo errores de manufactura y optimizando el proceso de construcción (Guillén, 2019). Bajo este enfoque, el diseño no sólo busca

obtener un sistema funcional, sino también integrar principios de sustentabilidad y economía circular en el desarrollo del prototipo.

La implementación de tecnologías sustentables de bajo costo resulta especialmente relevante en instituciones educativas, debido a que permite desarrollar proyectos experimentales orientados a la innovación tecnológica y al aprovechamiento de recursos reutilizables. En este sentido, documentar el proceso de diseño, construcción y validación funcional de prototipos constituye una aportación de interés para facilitar su reproducción, adaptación y aplicación en actividades académicas, de investigación y de desarrollo tecnológico.

1.4. Cálculo de pérdida de humedad

La pérdida de humedad representa la cantidad de agua removida de las muestras durante el proceso de deshidratación y constituye uno de los principales indicadores para evaluar el comportamiento del secado. En el presente estudio, este parámetro fue estimado mediante un procedimiento gravimétrico a partir de la diferencia entre la masa inicial y final de las muestras, considerando que la disminución de masa registrada durante el proceso correspondió principalmente al agua eliminada (Onwude et al., 2016).

En procesos de deshidratación solar, la pérdida de humedad depende de diferentes variables operativas, como la temperatura interna del sistema, la radiación solar, la circulación de aire, el tiempo de exposición y las características físicas de las muestras alimentarias (Onwude et al., 2016; Doymaz, 2017; Hssaini et al., 2021).

Para determinar el porcentaje estimado de pérdida de humedad (%PH) respecto a la masa inicial de las muestras se utilizó la ecuación (1) (Seremet et al., 2015; Doymaz, 2017; Hssaini et al., 2021):

$$\%PH = \frac{m_i - m_f}{m_i} \times 100 \qquad (1)$$

Donde m_i corresponde a la masa inicial de la muestra antes del proceso de deshidratación (g) y m_f representa la masa final de la muestra después del proceso de secado (g) y *%PH* corresponde al porcentaje estimado de pérdida de humedad respecto a la masa inicial de la muestra.

2. Materiales y Método

El desarrollo del presente trabajo se realizó mediante una metodología enfocada en el diseño y construcción de un deshidratador solar sustentable utilizando materiales recuperados. El proceso metodológico comprendió las etapas de análisis de fortalezas, oportunidades, debilidades y amenazas (FODA), diseño conceptual, selección de materiales, modelado estructural, construcción del prototipo, ensamblaje del sistema y evaluación funcional del deshidratador solar, tal como se muestra en la Figura 1.

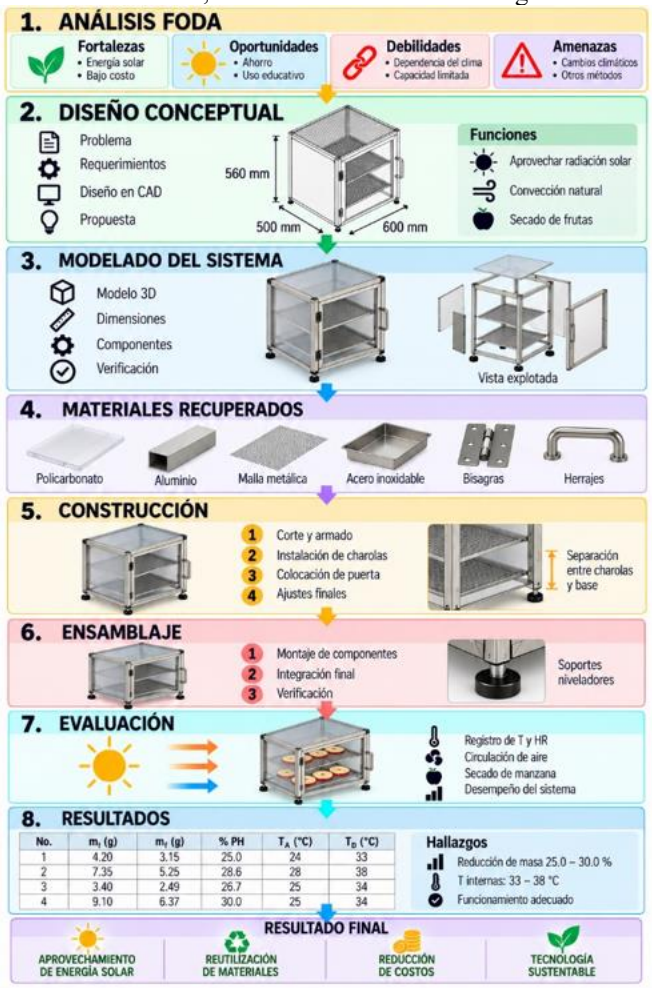


Figura 1: Procedimiento.

Inicialmente se efectuó una revisión de información relacionada con sistemas de deshidratación solar, aprovechamiento de energía renovable y aplicación de materiales recuperados en tecnologías sustentables. Posteriormente se establecieron las características generales del sistema considerando funcionalidad, estabilidad estructural, facilidad de ensamblaje y aprovechamiento de radiación solar.

El diseño conceptual del deshidratador se desarrolló mediante herramientas de diseño asistido por computadora utilizando el software AutoCAD 2023, permitiendo establecer la distribución general de los componentes y la configuración estructural del sistema antes de su fabricación.

Los materiales empleados para la construcción del prototipo fueron obtenidos a partir de remanentes generados durante procesos de fabricación de sistemas de refrigeración grado alimenticio. Entre los materiales recuperados se utilizaron policarbonato, acero inoxidable, aluminio y componentes metálicos destinados al ensamblaje estructural del deshidratador solar. Posteriormente, se realizó la selección de los materiales considerando su estado físico, resistencia

mecánica, durabilidad, disponibilidad, dimensiones, facilidad de adaptación y compatibilidad con las condiciones térmicas de operación del sistema.

Para la construcción del prototipo se empleó policarbonato recuperado y componentes mecánicos destinados al soporte estructural y funcionamiento general del equipo. El policarbonato, utilizado como cubierta translúcida, presenta una baja conductividad térmica, con valores reportados de 0.163 a 0.179 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ en el intervalo de 15 a 45 °C (McKinnon & Bellamy, 2024). Por su parte, el acero inoxidable AISI 304, comúnmente empleado en aplicaciones alimentarias, presenta valores de conductividad térmica del orden de 15–17 $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ (Ramos et al., 2021), considerablemente superiores a los del policarbonato. Los materiales utilizados en la fabricación del deshidratador solar se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1: Materiales utilizados para la construcción del deshidratador solar.

Material	Aplicación principal	Procedencia	Costo (MXN)
Policarbonato	Cubierta translúcida	Remanente industrial	0
Acero inoxidable	Estructura principal	Remanente industrial	0
Malla metálica	Charolas de secado	Remanente industrial	0
Perfil angular	Soporte estructural	Remanente industrial	0
Soleras metálicas	Refuerzo mecánico	Comercial	90
Bisagras	Sistema de apertura	Comercial	20
Jaladera metálica	Acceso frontal	Comercial	30
Patas niveladoras	Nivelación del sistema	Comercial	300
Total			440

El costo total de los materiales utilizados para la construcción del prototipo fue de $440 MXN, correspondiente únicamente a los componentes comerciales. El aprovechamiento de remanentes industriales permitió que los componentes recuperados no generaran costos de adquisición, reduciendo así el gasto asociado a la fabricación del deshidratador.

La construcción del sistema se llevó a cabo mediante procesos de adecuación y ensamblaje mecánico de los componentes seleccionados. Asimismo, se integraron bandejas metálicas y una cubierta translúcida para favorecer la circulación natural del aire y el aprovechamiento de radiación solar dentro del sistema.

Durante la fabricación se verificó la correcta integración de los componentes y la estabilidad estructural del prototipo. Finalmente, el deshidratador solar fue sometido a pruebas generales de funcionamiento con la finalidad de evaluar su operación y verificar el aprovechamiento de energía solar dentro del sistema.

El empleo de materiales recuperados permitió contribuir al aprovechamiento responsable de remanentes industriales con potencial de aplicación tecnológica, promoviendo estrategias orientadas a sostenibilidad y reutilización de recursos.

Resultados

3.1. Análisis FODA del deshidratador solar

Con la finalidad de evaluar la viabilidad técnica y sustentable del prototipo desarrollado, se realizó un análisis FODA considerando factores internos y externos relacionados con el diseño y construcción del deshidratador solar. Este análisis permitió identificar aspectos favorables y limitaciones asociadas al sistema construido.

Entre las principales fortalezas del prototipo destacan el aprovechamiento de energía solar y el empleo de materiales recuperados provenientes de remanentes industriales, lo que permitió desarrollar un sistema funcional orientado al aprovechamiento responsable de recursos con potencial de aplicación tecnológica. Asimismo, el prototipo presentó una estructura compacta y funcional adecuada para aplicaciones académicas y experimentales.

Respecto a las oportunidades, el deshidratador solar representa una alternativa viable para comunidades rurales y pequeños productores interesados en tecnologías sustentables orientadas a la conservación alimentaria mediante aprovechamiento de energía renovable. Además, el proyecto favorece estrategias relacionadas con sostenibilidad, aprovechamiento de materiales recuperados y aplicación de energías renovables en sistemas experimentales.

Por otra parte, se identificaron debilidades relacionadas principalmente con la dependencia de condiciones climáticas y la limitada capacidad térmica del sistema en comparación con equipos industriales. Asimismo, factores externos como variaciones climáticas y competencia con sistemas comerciales representan posibles amenazas para aplicaciones a mayor escala.

El análisis FODA (Figura 2) permitió establecer una visión general del comportamiento técnico y funcional del prototipo, así como identificar áreas de mejora relacionadas con optimización térmica y capacidad operativa del sistema.

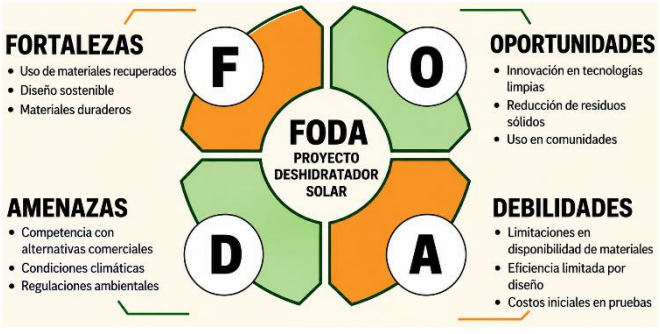


Figura 2: Análisis FODA, de forma sintetizada.

A partir de este análisis se identificaron las principales problemáticas asociadas al desarrollo del deshidratador solar, considerando criterios relacionados con fabricación, especialización técnica, tiempo de desarrollo y costo de implementación. Las problemáticas identificadas durante el desarrollo del prototipo se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2: Problemática identificada.

Problemática identificada	Retos	Impacto
Fabricación	El uso de materiales recuperados puede dificultar el ajuste y ensamblaje de componentes.	Posibles dificultades en la construcción y durabilidad del prototipo.
Especialización	Se requieren conocimientos básicos de diseño térmico y ensamblaje.	Un diseño inadecuado puede disminuir el desempeño del sistema.
Tiempo	La preparación y adecuación de materiales recuperados requiere mayor tiempo.	Retraso en la construcción e implementación del prototipo.
Costo	La adaptación de algunos materiales puede generar gastos adicionales.	Posible incremento en los costos de fabricación.

Con base en la problemática identificada, se realizó un análisis de prioridades con la finalidad de determinar el nivel de influencia de cada aspecto sobre el desarrollo del deshidratador solar. Para ello, se consideraron los criterios de fabricación, especialización técnica, tiempo de desarrollo y costo de implementación. Cada problemática fue valorada de acuerdo con su nivel de influencia sobre estos criterios mediante tres categorías: alta (A), media (M) y baja (B). A partir de la valoración conjunta de estos criterios se estableció el nivel de prioridad de cada problemática, empleando las mismas categorías de clasificación. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3: Establecimiento de prioridades.

Problemática	Criterios de evaluación				
	Fabricación	Especialización	Tiempo	Costo	Prioridad
Uso de materiales recuperados puede dificultar la estandarización y ensamblaje.	A	A	B	M	A
Requiere conocimientos avanzados en diseño térmico, soldadura y ensamblaje.	M	M	B	B	M
La recolección y preparación de materiales recuperados incrementa el tiempo necesario para el desarrollo.	M	M	M	B	M
Adaptar materiales recuperados puede generar gastos imprevistos.	B	M	B	M	M

Nota: A = Alta, M = Media y B = Baja. Estas categorías representan el nivel de influencia de cada problemática sobre los criterios evaluados y su prioridad correspondiente.

A partir de las prioridades establecidas en la Tabla 3, se definieron diferentes alternativas de solución orientadas a disminuir el impacto de las problemáticas identificadas durante el desarrollo del sistema. Las estrategias propuestas estuvieron enfocadas en mejorar el proceso de fabricación, optimizar el aprovechamiento de materiales recuperados, reducir tiempos de construcción y mejorar el funcionamiento general del prototipo. Las principales alternativas de solución implementadas se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Alternativas de solución.

Problemática identificada	Alternativas
Fabricación	Inspeccionar y clasificar los materiales recuperados para asegurar su calidad antes del proceso de fabricación.
Especialización	Incluir expertos en ingeniería térmica para guiar el diseño.
Tiempo	Diseñar un plan de trabajo con tiempos asignados a cada etapa. Utilizar materiales nuevos en las partes más críticas del diseño para reducir el tiempo.
Costo	Crear un presupuesto detallado con márgenes de contingencia. Reutilizar herramientas existentes y minimizar desperdicios.

Mediante el análisis FODA (Figura 2) y las Tablas 2, 3 y 4 se logró identificar y priorizar los aspectos relacionados con la fabricación, especialización, tiempo y costo, así como establecer las alternativas consideradas durante el desarrollo del prototipo. La participación de expertos en el área permitió orientar la toma de decisiones durante la etapa de diseño. Entre estas decisiones, las dimensiones generales del deshidratador se definieron a partir de la sección de acero inoxidable recuperado de mayor tamaño disponible, con la finalidad de aprovechar al máximo el material y reducir los cortes y desperdicios. La aplicación de las alternativas

permitió realizar de manera planificada la selección y aprovechamiento de los materiales, organizar las etapas de fabricación y utilizar los recursos disponibles de acuerdo con las necesidades del proyecto. Como resultado, el prototipo se construyó conforme a lo planeado, sin requerir modificaciones durante su desarrollo. Asimismo, los materiales recuperados fueron suficientes para su construcción y se contó con material excedente al finalizar el proceso.

Con base en este análisis se establecieron los criterios de diseño relacionados con la funcionalidad del sistema, la selección de materiales recuperados, la captación de radiación solar y la circulación natural del aire. A partir de estos criterios se desarrolló el diseño conceptual del deshidratador solar.

3.2. Diseño

El deshidratador solar fue modelado utilizando el software AutoCAD 2023, herramienta de diseño asistido por computadora que permitió desarrollar representaciones bidimensionales e isométricas del sistema antes de su construcción física. El modelado digital facilitó la visualización general del prototipo, la distribución de sus componentes y la verificación de su factibilidad constructiva, permitiendo identificar oportunamente posibles ajustes dimensionales y de ensamblaje durante la etapa de diseño.

Durante el proceso de diseño se priorizaron criterios orientados a garantizar la funcionalidad del prototipo bajo condiciones de operación mediante convección natural. Para ello, se consideraron aspectos relacionados con la estabilidad estructural, la integración de las bandejas metálicas, la ubicación de la cubierta translúcida, la captación de radiación solar, la circulación natural del aire y la selección de materiales recuperados. Asimismo, el modelado permitió establecer las dimensiones aproximadas del prototipo y verificar el ensamble de los componentes antes de su fabricación física.

La configuración seleccionada respondió a criterios de funcionalidad, facilidad de construcción y aprovechamiento de la energía solar. Se adoptó una geometría prismática debido a que facilita el ensamblaje de los componentes recuperados y proporciona una distribución uniforme del espacio interno para la colocación de las muestras. La incorporación de dos charolas metálicas permitió incrementar el área útil de secado sin interferir con la circulación natural del aire dentro de la cámara. De manera similar, la cubierta de policarbonato fue seleccionada por su capacidad para permitir el paso de la radiación solar hacia el interior del sistema. El policarbonato utilizado fue recuperado de remanentes generados en la fabricación de sistemas de refrigeración grado alimenticio y se empleó exclusivamente como cubierta translúcida, sin contacto directo con las muestras, las cuales fueron colocadas sobre charolas metálicas. Esta consideración resulta relevante debido a que la migración de compuestos desde materiales de policarbonato puede estar influenciada, entre otros factores, por la temperatura y las condiciones de contacto con el alimento (Park et al., 2018). Durante la validación del prototipo, la temperatura máxima registrada fue de 38 °C. Por otra parte, se seleccionó una estructura de acero inoxidable debido a su resistencia mecánica y durabilidad, características que favorecen la estabilidad estructural del prototipo durante su operación. Asimismo, la puerta frontal facilita el acceso a la cámara de secado para la colocación y retiro de las muestras sin alterar la configuración del sistema.

La configuración adoptada coincide con la tendencia reportada en prototipos de deshidratadores solares de convección natural, donde las geometrías prismáticas favorecen la fabricación mediante componentes planos y permiten una distribución uniforme de las bandejas de secado (Esper & Mühlbauer, 1998; Janjai & Bala, 2012). A diferencia de diseños que incorporan colectores solares independientes o sistemas de circulación forzada, el presente prototipo integra la captación solar y la cámara de secado en una sola estructura compacta, simplificando su construcción y operación.

Las Figuras 3, 4, 5, 6 y 7 presentan el modelo conceptual definitivo del deshidratador solar desarrollado mediante AutoCAD 2023, el cual refleja la geometría del sistema, la distribución de sus componentes y la selección de los materiales recuperados considerados para su construcción.

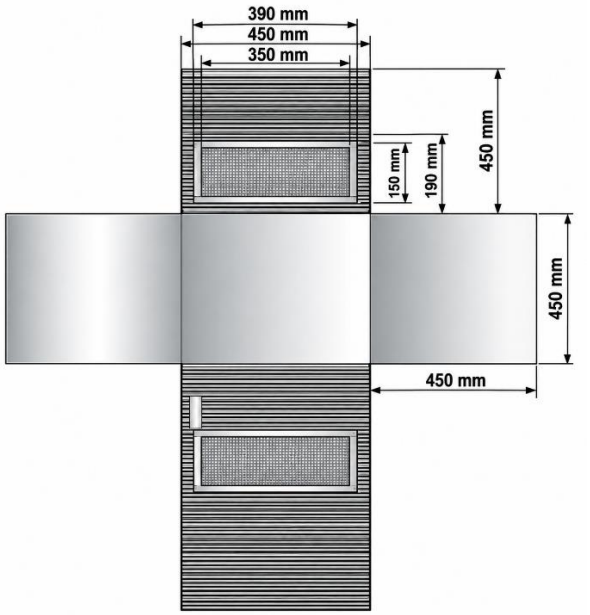


Figura 3: Dimensiones que conforman las paredes del deshidratador.

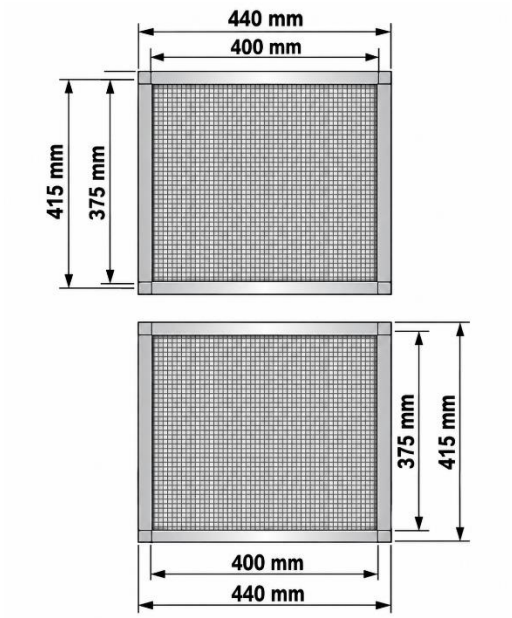


Figura 4: Dimensiones que conforman las charolas dentro del deshidratador.

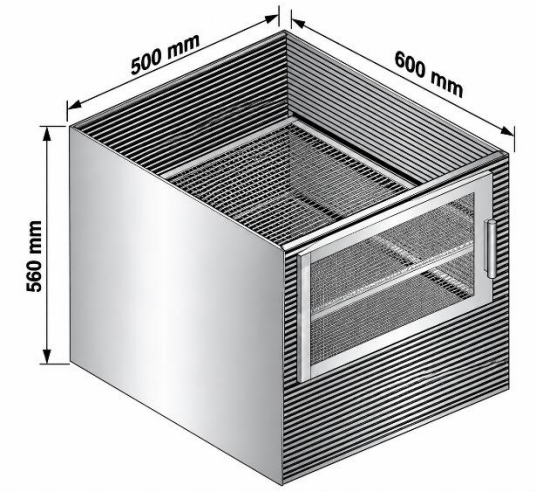


Figura 5: Vista isométrica lateral completa.

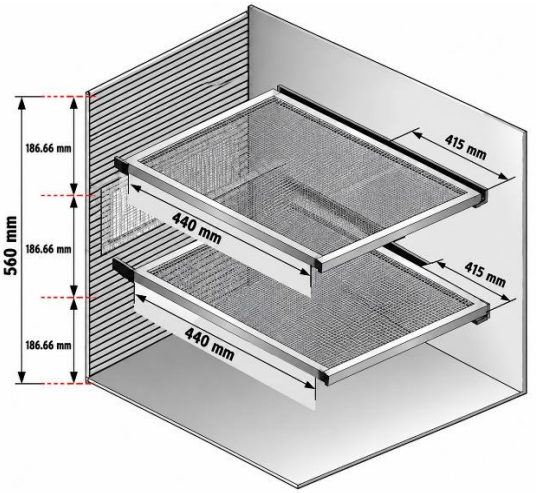


Figura 6: Vista isométrica interna.

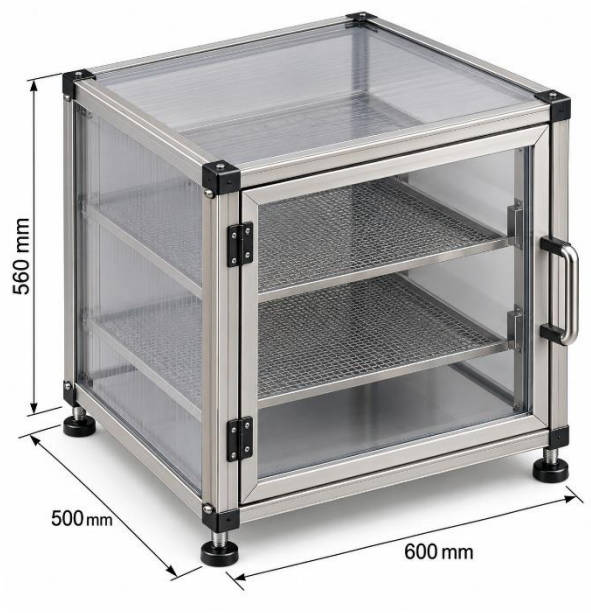


Figura 7: Prototipo de deshidratador.

El prototipo presentó dimensiones generales de aproximadamente 60 cm de ancho, 50 cm de profundidad y 56 cm de altura, mientras que las charolas de secado mostraron dimensiones externas de 44 × 41.5 cm y un área útil de secado de 40 × 37.5 cm (ver Tabla 5).

Como se observa en la Tabla 5, la mayor parte de los componentes estructurales del prototipo fueron obtenidos a partir de materiales recuperados provenientes de remanentes industriales, mientras que únicamente algunos elementos auxiliares de ensamble y operación correspondieron a componentes comerciales.

Tabla 5: Especificación de dimensiones.

Componente	Dimensiones	Función	Origen
Estructura principal	60 × 50 × 56 cm	Soporte estructural	Recuperado
Paneles de policarbonato	45 × 45 cm	Captación solar	Recuperado
Charolas	44 × 41.5 cm	Soporte de muestras	Recuperado
Perfil angular	3.66 m	Estructura de soporte	Recuperado
Soleras	38 mm	Refuerzo estructural	Comercial
Bisagras	9.6 cm	Apertura de puerta	Comercial
Jaladera	10 cm	Manipulación de puerta	Comercial
Patas	50 mm	Estabilidad del equipo	Comercial
Área útil de secado de las charolas	40 × 37.5 cm	Superficie de secado	No aplica

Las dimensiones del prototipo fueron definidas considerando criterios de funcionalidad, distribución

uniforme de las muestras y circulación natural del aire. La configuración seleccionada favorece el aprovechamiento de la radiación solar y permite una disposición adecuada de las charolas para facilitar el flujo natural del aire durante el proceso de deshidratación. Estas características sustentan las decisiones de diseño adoptadas y proporcionan una configuración adecuada para la construcción y la validación funcional del prototipo.

La utilización predominante de materiales recuperados diferencia al presente prototipo de otros diseños experimentales desarrollados con materiales comerciales o específicamente adquiridos para su fabricación (Guillén, 2019). Esta estrategia permitió conservar las características funcionales del sistema utilizando componentes provenientes de remanentes industriales, manteniendo el enfoque sustentable propuesto desde la etapa de diseño.

3.3. Construcción del deshidratador solar

Para la construcción del deshidratador solar se realizó los materiales presentados en la Tabla 5. La estructura principal fue elaborada empleando acero inoxidable y perfiles metálicos, proporcionando estabilidad mecánica y resistencia a condiciones ambientales y térmicas.

Posteriormente se integraron bandejas metálicas destinadas al proceso de deshidratación de alimentos, permitiendo favorecer la circulación natural del aire dentro del sistema. Asimismo, se instaló una cubierta translúcida de policarbonato con la finalidad de aprovechar la radiación solar mediante efecto invernadero y favorecer el incremento de temperatura interna del prototipo.

El ensamblaje del sistema se llevó a cabo mediante uniones mecánicas y adecuaciones estructurales sencillas, facilitando la integración de los componentes y permitiendo desarrollar un prototipo compacto y funcional. Durante la construcción se verificó la estabilidad estructural y la correcta integración de cada elemento del sistema, asegurando el adecuado funcionamiento del deshidratador solar (Figuras 8 y 9).

Diversos estudios han señalado que la selección de materiales constituye uno de los principales factores que influyen en la durabilidad y funcionalidad de los deshidratadores solares (Janjai & Bala, 2012; Hernández et al., 2017). En este trabajo se priorizó el empleo de acero inoxidable y policarbonato recuperados, materiales que ofrecieron la resistencia mecánica y las propiedades necesarias para la construcción del prototipo sin requerir modificaciones significativas en su configuración original.



Figura 8: Vista interna del prototipo.



Figura 9: Prototipo real de deshidratador.

El prototipo construido presentó una estructura resistente y funcional para aplicaciones básicas de conservación alimentaria mediante aprovechamiento de energía solar y empleo de materiales recuperados.

3.4. Prueba de validación del prototipo

Con la finalidad de evaluar el desempeño térmico y funcional del deshidratador solar construido, se realizó una prueba inicial de validación utilizando exclusivamente rodajas de manzana de aproximadamente 5 mm de espesor como material de estudio, debido a su elevado contenido de humedad y facilidad para evidenciar los cambios físicos asociados al proceso de deshidratación solar. La prueba tuvo como propósito verificar el funcionamiento del prototipo mediante el registro de la temperatura y la pérdida de masa, sin plantear una comparación entre diferentes alimentos o equipos comerciales. Las pruebas se efectuaron bajo condiciones ambientales naturales durante el mes de abril, aprovechando periodos de mayor incidencia de radiación solar característicos de la temporada, con un tiempo efectivo de exposición aproximado de ocho horas diarias durante cinco días consecutivos.

Las muestras fueron colocadas sobre las bandejas metálicas ubicadas en el interior del deshidratador,

procurando mantener una distribución uniforme para favorecer la circulación natural del aire caliente dentro del sistema, tal como se observa en la Figura 10. El proceso experimental consistió en cuatro repeticiones independientes realizadas bajo las mismas condiciones de operación. Durante la validación también se registraron la temperatura ambiente y la temperatura interna alcanzada dentro del deshidratador, con el propósito de verificar la capacidad del sistema para incrementar la temperatura mediante el aprovechamiento exclusivo de la radiación solar.



Figura 10: Prueba de validación.

Durante cada ensayo se registraron los valores de masa inicial total (m_i), masa final total (m_f), temperatura ambiente (T_A) y temperatura interna alcanzada dentro del deshidratador (T_D). Los resultados obtenidos durante las cuatro repeticiones independientes se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6: Resultados de la prueba de validación.

No.	m_i (g)	m_f (g)	% PH	T_A (°C)	T_D (°C)
1	4.20	3.15	25.0	24	33
2	7.35	5.25	28.6	28	38
3	3.40	2.49	26.7	25	34
4	9.10	6.37	30.0	25	34

Como se observa en la Tabla 6, el deshidratador solar alcanzó temperaturas internas comprendidas entre 33 y 38 °C, con un valor promedio de 34.6 °C, superiores a la temperatura ambiente promedio registrada durante las pruebas (26.0 °C). Al finalizar el periodo experimental, la temperatura ambiente fue de 28.5 °C, lo que evidencia que el sistema fue capaz de incrementar la temperatura interna mediante el aprovechamiento de la radiación solar y el efecto de confinamiento térmico generado por la cubierta translúcida de policarbonato. Este comportamiento coincide con el reportado para deshidratadores solares pasivos de convección natural, en los cuales el incremento térmico depende principalmente de la radiación solar incidente, las propiedades de la cubierta y la circulación natural del aire (Janjai & Bala, 2012; El-Mesery et al., 2022; Henriques et al., 2025). En consecuencia, el comportamiento térmico observado durante la validación confirma que la configuración geométrica y los materiales seleccionados favorecen el funcionamiento del prototipo bajo condiciones de convección natural.

Los resultados obtenidos evidencian una reducción de masa en las muestras de manzana, con porcentajes de pérdida entre 25.0 y 30.0 %. La reducción de masa observada es consistente con la eliminación de agua durante el proceso de deshidratación, favorecida por el incremento de temperatura alcanzado en el interior del prototipo y por la circulación natural del aire caliente. Este comportamiento es consistente con lo reportado para sistemas de deshidratación solar pasivos, en los cuales la eliminación de agua depende de las condiciones ambientales y de las características del producto sometido al proceso (Doymaz, 2017; Hernández et al., 2017).

Asimismo, durante el proceso experimental se observaron cambios físicos característicos del secado por convección natural, principalmente reducción de volumen, ligera contracción superficial y modificación de la textura de las muestras. Paralelamente, el prototipo mantuvo un comportamiento estructural estable durante toda la operación, sin presentar deformaciones visibles, pérdida de rigidez o desplazamiento de las bandejas, lo que confirma el adecuado desempeño de los materiales recuperados empleados en su construcción y la funcionalidad de la configuración propuesta.

A diferencia de sistemas industriales o deshidratadores solares con circulación forzada, el prototipo desarrollado operó exclusivamente mediante convección natural, presentando un proceso gradual de deshidratación asociado a las temperaturas moderadas alcanzadas durante la operación. Este comportamiento coincide con lo reportado para sistemas solares pasivos, donde la eficiencia del proceso depende principalmente de la radiación solar disponible, las condiciones ambientales y las características constructivas del equipo (Janjai & Bala, 2012; Henriques et al., 2025; Unar et al., 2026).

Tabla 7: Comparación de las condiciones y tiempos de secado de manzana en diferentes sistemas solares.

Sistema	Convección	Espesor de manzana (mm)	Temperatura de secado (C)	Tiempo/ periodo experimental	Referencia
Secador solar pasivo de bandejas	Natural	5	40	40 % menor vs. secado al sol	Aboud (2013)
Secador solar pasivo indirecto, dos charolas	Natural	≈5	43–71	3 días (≈12 h acumulada)	Muciaccia et al. (2024)
Secador solar portátil	Forzada	3.6	47–55	10–10.5 h	Ngueagni & Mawire (2025)
Prototipo desarrollado	Natural	5	33–38	5 días (≈40 h de exposición solar)	Presente estudio

La comparación con los estudios reportados en la literatura (Tabla 7) muestra que la duración del proceso varía de acuerdo con las características del sistema y las condiciones de operación. Muciaccia et al. (2024), utilizando un secador solar pasivo de convección natural y rodajas de manzana de aproximadamente 5 mm, realizaron el proceso durante tres días consecutivos, mientras que en el presente estudio las muestras permanecieron durante cinco días, con aproximadamente 8 h diarias de exposición solar. Esta diferencia puede asociarse, entre otros factores, con las mayores temperaturas alcanzadas en el sistema reportado por dichos autores. Por su parte, Ngueagni y Mawire (2025) reportaron tiempos de 10–10.5 h utilizando circulación forzada del aire. Sin embargo, estos periodos no representan condiciones equivalentes de secado ni un mismo contenido final de humedad, por lo que su comparación debe interpretarse considerando el tipo de circulación de aire, la temperatura alcanzada y las condiciones particulares de operación de cada estudio.

Tabla 8. Comparación del costo de fabricación del prototipo con deshidratadores solares comerciales disponibles en México.

Sistema	Número de charolas	Dimensiones (cm)	Costo (MXN)
Prototipo desarrollado	2	60 × 50 × 56	$440
Deshidratador solar Camelia	4	26 × 40 × 46	$1,700
Deshidratador solar comercial	1	58 × 46.5 × 18	$1,800
Deshidratador solar comercial	4	No especificadas	$3,300

Nota: Precios comerciales consultados en Mercado Libre México en septiembre de 2026.

El costo de los materiales empleados para la fabricación del prototipo fue de $440 MXN, valor inferior a los precios de los deshidratadores solares comerciales considerados en la comparación (Tabla 8). Esta diferencia se relaciona principalmente con el aprovechamiento de materiales recuperados, cuyo costo de adquisición fue nulo en el presente estudio. Sin embargo, la comparación es únicamente económica, debido a las diferencias existentes entre los equipos en cuanto a dimensiones, número de charolas y características constructivas.

Los resultados obtenidos demuestran que el prototipo construido cumple satisfactoriamente con los requerimientos funcionales establecidos durante la etapa de diseño, constituyendo una alternativa sustentable para aplicaciones académicas, de investigación y de pequeña escala relacionadas con la deshidratación solar.

4. Conclusiones

El proceso de diseño permitió desarrollar un deshidratador solar de convección natural considerando criterios de funcionalidad, aprovechamiento de la radiación solar y empleo de materiales recuperados provenientes de remanentes industriales. La integración del análisis FODA, el modelado mediante AutoCAD (2023) y la selección de componentes facilitó la construcción de un prototipo con características estructurales adecuadas para aplicaciones de deshidratación solar a pequeña escala.

La construcción del equipo demostró que es posible fabricar un deshidratador solar funcional mediante el aprovechamiento de materiales recuperados, principalmente policarbonato y acero inoxidable, reduciendo el uso de materiales nuevos sin comprometer la estabilidad mecánica ni la operación del sistema. Esta estrategia representa una alternativa viable para el desarrollo de tecnologías sustentables orientadas al aprovechamiento de recursos disponibles.

La validación funcional confirmó el correcto desempeño del prototipo bajo condiciones ambientales naturales, permitiendo la deshidratación de las muestras mediante convección natural. Los resultados obtenidos mostraron un funcionamiento estable del sistema durante las pruebas realizadas.

La metodología empleada para el diseño, construcción y validación funcional demostró ser una alternativa técnicamente viable para el desarrollo de deshidratadores solares sustentables destinados a actividades académicas, de investigación y aplicaciones de pequeña escala.

Como perspectiva futura, se propone ampliar la evaluación experimental del prototipo mediante el estudio de diferentes productos alimenticios y condiciones de operación, así como analizar la influencia de variables como la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del aire sobre el proceso de deshidratación. Asimismo, se plantea evaluar alternativas de mejora en la circulación del aire y realizar estudios de eficiencia térmica y energética que permitan optimizar el desempeño del sistema.

5. Referencias

Abdulmajeed, A. E. A., Tuncer, A. D., & Gungor, A. (2026). Design and performance investigation of a mixed-mode solar dryer for efficient drying of different agricultural products: CFD simulations and experimental analysis. Solar Energy, 307, 114330. https://doi.org/10.1016/j.solener.2026.114330

Aboud, A. (2013). Drying characteristic of apple slices undertaken the effect of passive shelf solar dryer and open sun drying. Pakistan Journal of Nutrition, 12(3), 250–254. https://doi.org/10.3923/pjn.2013.250.254

Doymaz, İ. (2017). Drying kinetics, rehydration and colour characteristics of convective hot-air drying of carrot slices. *Heat and Mass Transfer*, 53(1), 25–35. https://doi.org/10.1007/s00231-016-1791-8

El-Mesery, H. S., El-Seesy, A. I., Hu, Z., & Li, Y. (2022). Recent developments in solar drying technology of food and agricultural products: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 157, 112070. https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.112070

Esper, A., & Mühlbauer, W. (1998). Solar drying. An effective means of food preservation. *Renewable Energy*, 15(1–4), 95–100. https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00143-8

García, L. E., Mejía, M. F., Mejía, D. J., & Valencia, C. A. (2012). Diseño y construcción de un deshidratador solar de frutos tropicales. AVANCES Investigación en Ingeniería, 9(2), 09-19.

Guillén, M. A. (2019). *Diseño, construcción y evaluación de un deshidratador solar para tomate* [Trabajo de graduación para optar al grado de Licenciado en Ingeniería Mecánica Industrial, Universidad del Valle de Guatemala].

Henriques, B. R., Moummi, M. B., Romannazzi, G., Bourvellec, C., Cardoso, S. M., & Wessel, D. E. (2025). A comparative study of traditional sun drying and hybrid solar drying on quality, safety, and bioactive compounds in Pingo de Mel fig. Antioxidants, 14(3), Article 362. https://doi.org/10.3390/antiox14030362

Hernández, G. V., Olvera, G. O., Guzmán, T. P., & Morrillón, D. G. (2017). Secado de frutas y verduras con energía solar. *Revista de Sistemas Experimentales, 4*(11), 22–33.

Hssaini, L., Ouaabou, R., Hanine, H., Razouk, R., & Idlimam, A. (2021). Kinetics, energy efficiency and mathematical modeling of thin layer solar drying of figs (Ficus carica L.). *Scientific Reports*, 11, 21266. https://doi.org/10.1038/s41598-021-00690-z

Janjai, S., & Bala, B. K. (2012). Solar drying technology. *Food Engineering Reviews*, **4**(1), 16–54. https://doi.org/10.1007/s12393-011-9044-6

McKinnon, M. B., & Bellamy, G. T. (2024). Fire Safety Research Institute Materials and Products database-A resource to support fire modeling. *Journal of Fire Sciences*, 42(3), 175–216. https://doi.org/10.1177/07349041241235566

Medina, J. C. (2015). Estudio del proceso de deshidratación de alimentos frutihortícolas: Empleo de microondas y energía solar (Tesis doctoral, Universidad Nacional de La Plata). Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de La Plata.

Muciaccia, P. F., Nigro, A., Aquilanti, A., Tomassetti, S., Muccioli, M., & Di Nicola, G. (2024). A preliminary experimental and numerical analysis of a novel solar dryer. Energies, 17(23), 6059. https://doi.org/10.3390/en17236059

Nigro, A., Tomassetti, S., Demissie, T. N., & Di Nicola, G. (2026). Design, experimental characterization and numerical analysis of a compact nearly spherical solar dryer. Solar Energy, 316, 114910. https://doi.org/10.1016/j.solener.2026.114910

Ngueagni, P. T., & Mawire, A. (2025). Experimental investigation of a portable solar dryer for apple drying. Scientific African, 28, e03012. https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2025.e03012

Nnamchi, O., Tom, C., Akpan, G., Umunna, M., Ubong, D., Ibeh, M., Linus-Chibuezeh, A., Akuwueke, L., Nnamchi, S., Ben, A., & Ndukwu, M. (2025). Solar dryers: A review of mechanism, methods and critical analysis of transport models applicable in solar drying of product. Green Energy and Resources, 3(2), 100118. https://doi.org/10.1016/j.gerr.2025.100118

Onwude, D. I., Hashim, N., Janius, R. B., Nawi, N. M., & Abdan, K. (2016). Modeling the thin-layer drying of fruits and vegetables: A review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 15*(3), 599–618. https://doi.org/10.1111/1541-4337.12196

Park, S. R., Park, S. J., Jeong, M. J., Choi, J. C., Kim, M. K., & Lee, K. G. (2018). Fast and simple determination and exposure assessment of bisphenol A, phenol, p-tert-butylphenol, and diphenylcarbonate transferred from polycarbonate food-contact materials to food simulants. *Chemosphere*, 203, 300–306. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.185

Ramos, N. P., Antunes, M. M., & Lima e Silva, S. M. M. (2021). An experimental and straightforward approach to simultaneously estimate temperature-dependent thermophysical properties of metallic materials. *International Journal of Thermal Sciences*, 166, 106960. https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2021.106960

Santamarta, J. (2004). Las energías renovables son el futuro. World Watch, 22(3440.16).

Seremet (Ceclu), L., Botez, E., Nistor, O. V., Andronoiu, D. G., & Mocanu, G.-D. (2015). Effect of different drying methods on moisture ratio and rehydration of pumpkin slices. *Food Chemistry, 174*, 104–110. https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.03.125

Unar, S. G., Khatri, S. A., Mirjat, N. H., Shaikh, P. H., Zaidi, S. A. R. A., & Arain, M. F. (2026). Solar drying technologies: A review of design, efficiency and environmental impacts. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 226, 116339. https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116339

Yucailla, E. D. C., Martínez, M. P. P., & Lara, G. F. R. (2020). El reciclaje de madera: Una herramienta para emprender y cuidar el planeta. *INNOVA Research Journal, 5*(1), 150–165.

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 43 – 62

ISSN: 2992-7315

Gestión digital de olimpiadas académicas: experiencia piloto en educación preuniversitaria

Digital Management of Academic Olympiads: Pilot Experience in Pre-University Education

Alexander Uceta Lantigua [a]

Universidad Abierta para Adultos (UAPA), Departamento de Posgrado, Santo Domingo Oriental

Resumen

La gestión manual de olimpiadas académicas en el sistema preuniversitario dominicano presenta limitaciones de eficiencia, trazabilidad y objetividad evaluativa. Este artículo analiza la implementación de un sistema digital integrado de gestión de olimpiadas académicas en la Dirección Regional de Educación No. 15 (Santo Domingo III), construido como módulo de SIGACOM (Sistema de Información y Gestión de Acompañamiento Docente). Se adopta un enfoque de métodos mixtos e investigación aplicada orientada a la innovación (I+D+I), con diseño de estudio de caso institucional. La unidad de análisis fue la primera edición de la Olimpiada de Lengua Española 2026, con 96 estudiantes de cuatro categorías, seis distritos y 89 centros educativos. Los resultados evidencian una reducción del tiempo operativo, de una jornada completa a menos de medio día en la aplicación y de varios días a menos de 24 horas en los resultados, integrando en un solo flujo la calificación automática, la evaluación de producciones abiertas y la entrevista oral con rúbrica digital, con trazabilidad completa. La experiencia aporta evidencia sobre la viabilidad de la innovación evaluativa en infraestructura pública limitada.

Palabras clave: olimpiadas académicas, evaluación digital, gestión educativa, innovación tecnológica, República Dominicana

Abstract

The manual management of academic olympiads in the Dominican pre-university system presents limitations in efficiency, traceability, and evaluative objectivity. This article documents and analyzes the design, development, and implementation of an integrated digital system for managing academic olympiads at Regional Education Directorate No. 15 (Santo Domingo III), built as a module of SIGACOM (Teaching Accompaniment Information and Management System). The study follows an applied research approach oriented toward technological development and innovation (R&D&I), using mixed methods and an institutional case study design. The unit of analysis was the first edition of the 2026 Spanish Language Olympiad, with 96 students across four categories, six districts, and 89 schools. Results show a reduction in operational time, from a full day to less than half a day for application and from several days to under 24 hours for results availability, integrating automatic scoring, assessment of open-ended productions, and oral interviews with digital rubrics in a single workflow with complete traceability. The experience provides evidence on the feasibility of evaluative innovation under limited public infrastructure conditions.

Keywords: academic olympiads, digital assessment, educational management, technological innovation, Dominican Republic

1. Introducción

La gestión de eventos académicos competitivos en el sistema educativo preuniversitario ha dependido históricamente de procesos manuales que, si bien han cumplido su función, presentan limitaciones estructurales en términos de eficiencia, trazabilidad y objetividad. La aplicación de pruebas en papel, la calificación artesanal por parte de jurados, la consolidación manual de resultados y la resolución discrecional de empates constituyen condiciones que restringen la escalabilidad de estos eventos y exponen el proceso a inconsistencias difíciles de auditar. Frente a este escenario, la incorporación de tecnología digital en la gestión evaluativa representa una

Autor para la correspondencia: alexanderuceta@f.uapa.edu.do. Correo electrónico: alexanderuceta@f.uapa.edu.do (Alexander Uceta Lantigua).
Historial del manuscrito: recibido el 07/07/2026, última versión-revisada recibida el 08/08/2026, aceptado el 13/08/2026, publicado el 09/10/2026.
DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.23264360

oportunidad concreta de transformación institucional con impacto directo en la calidad y la equidad del proceso.

La transformación digital en el ámbito educativo alcanza tanto los procesos de enseñanza y aprendizaje como el desempeño de los gestores institucionales, al facilitar el acceso a recursos digitales y fomentar una cultura organizacional orientada a la innovación (García-Estrella, Delgado-Bardales y Contreras-Julián, 2025). En el caso de la gestión de eventos evaluativos de alta complejidad, como las olimpiadas académicas, esta transformación exige el desarrollo de soluciones que articulen la inscripción de participantes, la aplicación digital de pruebas, la calificación automática de ítems cerrados, la evaluación asistida de producciones abiertas y la publicación transparente de resultados, todo dentro de un flujo operativo integrado.

El crecimiento sostenido del uso de tecnología digital en evaluaciones nacionales e internacionales, que casi triplicó el número de países con sistemas digitalizados entre 2015 y 2023, refleja un reconocimiento extendido de las ventajas operativas y pedagógicas de estos entornos (OECD, 2023). Sin embargo, la mayoría de estas experiencias documentadas corresponden a sistemas nacionales de gran escala con recursos especializados. Las iniciativas de desarrollo tecnológico institucional a nivel regional o distrital, construidas desde y para las condiciones reales de los sistemas educativos públicos latinoamericanos, siguen siendo escasas en la literatura científica.

La Dirección Regional de Educación No. 15 (Santo Domingo III), a través de su Unidad Regional para la Sistematización de Procesos Técnicos Docentes (URSATED), desarrolló e implementó el módulo de gestión de olimpiadas académicas integrado en SIGACOM (Sistema de Información y Gestión de Acompañamiento Docente), plataforma desarrollada y escalada a nivel regional, que atiende a más de 1,200 usuarios en los seis distritos de la jurisdicción. La primera edición de la Olimpiada de Lengua Española 2026 constituyó el escenario de implementación de este módulo, con la participación de 96 estudiantes de nivel primario y secundario provenientes de 89 centros educativos de los seis distritos de la regional.

Las olimpiadas académicas tienen como objetivos comunes, independientemente de la disciplina, la difusión de la importancia del conocimiento científico en la sociedad y el estímulo del interés y la excelencia académica entre el estudiantado preuniversitario (López y Luque, 2025). En el caso dominicano, el MINERD ha impulsado históricamente competencias de lectura y expresión oral y escrita a nivel nacional, con el propósito de desarrollar la comprensión lectora, la producción textual y el pensamiento crítico-creativo entre los estudiantes. La gestión de estas competencias a nivel regional, sin embargo, había permanecido circunscrita a procesos manuales con las limitaciones ya señaladas.

Este artículo documenta y analiza la experiencia de diseño, desarrollo e implementación de un sistema digital integrado de gestión de olimpiadas académicas, pionero en el contexto de la Regional 15 y escasamente documentado en el ámbito preuniversitario latinoamericano, con el propósito de contribuir al cuerpo de conocimiento sobre innovación tecnológica aplicada a la gestión evaluativa en contextos educativos públicos latinoamericanos. La pregunta que orienta el estudio es: ¿qué transformaciones operativas, evaluativas e institucionales genera la implementación de un sistema digital integrado para la gestión de olimpiadas académicas en una dirección regional de educación del sistema preuniversitario dominicano?

2. Revisión de la literatura

2.1 La evaluación digital en los sistemas educativos contemporáneos

La transición de la evaluación en papel hacia formatos digitales ha ganado tracción sostenida en la última década. Entre 2015 y 2023, el número de países que utilizan tecnología digital en sus evaluaciones nacionales al menos en un nivel educativo casi se triplicó, pasando de 8 a 21, con una aceleración notable en los últimos cinco años, entre ellos Canadá y Francia desde 2019, y Hungría y Corea desde 2022 (OECD, 2023). Este fenómeno no se limita a pruebas estandarizadas de gran escala; Letonia implementó un sistema de supervisión digital basado en inteligencia artificial para monitorear a estudiantes que participan en olimpiadas escolares por asignatura, competencias de carácter evaluativo y bajo riesgo en las que los participantes se conectan desde cualquier lugar y en cualquier momento, lo que ilustra la amplitud de las aplicaciones digitales en contextos competitivos de naturaleza académica.

La literatura especializada ha identificado múltiples dimensiones del valor de estas transiciones. La intersección entre lo digital y la evaluación ha sido examinada desde los conceptos de e-assessment, evaluación en línea y evaluación remota, términos que con frecuencia se usan de manera intercambiable sin distinción clara de sus alcances y experiencias de usuario (Viberg et al., 2024). Más allá de la terminología, lo que la evidencia subraya es la capacidad de estos sistemas para ofrecer eficiencia temporal, mayor adaptabilidad y retroalimentación inmediata tanto para docentes como para estudiantes (Gorgani y Shabani, 2021, citados en Viberg et al., 2024).

2.2 Sistemas de gestión de información educativa en países en desarrollo

El desarrollo de sistemas de información propios, en contraste con la adopción de plataformas comerciales genéricas, constituye una línea de trabajo creciente en los sistemas educativos del Sur Global. Heeks (2017) advierte que las tecnologías concebidas en contextos centralizados o ajenos a la realidad local tienden a amplificar las lógicas institucionales existentes en lugar de transformarlas, y que los sistemas importados sin adaptación contextual ni diseño

participativo pueden marginar las voces locales y no responder a las necesidades reales del entorno (Heeks, 2017). Esta perspectiva resulta pertinente para el caso que nos ocupa; un sistema desarrollado institucionalmente, desde y para el contexto del sistema preuniversitario dominicano, como respuesta directa a necesidades operativas concretas identificadas en la propia jurisdicción.

El Banco Mundial ha señalado la necesidad de fortalecer la capacidad de los sistemas de gestión de información educativa (EMIS) en países en desarrollo, destacando que la gobernanza de datos y la interoperabilidad en estos sistemas constituyen desafíos persistentes (World Bank, 2022; Lee y Kim, 2023). Frente a esas limitaciones estructurales, la experiencia acumulada en iniciativas de desarrollo tecnológico ad-hoc diseñadas para resolver problemas concretos de gestión ofrece evidencia valiosa sobre las condiciones que hacen viable la innovación institucional en contextos de recursos limitados.

2.3 Evaluación híbrida: automatización y juicio humano

Un rasgo definitorio de los sistemas de evaluación digital maduros es la combinación de calificación automática para ítems de respuesta cerrada con evaluación humana para producciones abiertas. La combinación de evaluadores humanos y calificación automatizada se utiliza en pruebas de gran escala como el MCAS de Massachusetts para ensayos de lengua y literatura; los ensayos primero son calificados por humanos entrenados, cuyos resultados alimentan al sistema automatizado, que es validado con muestras adicionales antes de operar de forma autónoma (DESE, 2024). Esta arquitectura que separa lo que el sistema puede resolver con precisión de lo que requiere juicio experto es precisamente la que estructura el modelo evaluativo del módulo estudiado.

Una revisión de alcance sobre tecnologías digitales en evaluación universitaria identifica herramientas de rúbrica digital, plataformas de videoconferencia y sistemas de supervisión en línea como componentes frecuentes de los entornos evaluativos contemporáneos, abordados desde tres niveles: percepciones, patrones de uso y resultados de aprendizaje empíricos (Núñez-Solís et al., 2026). La integración de rúbricas digitales en la evaluación oral, como la implementada en el evento analizado en este estudio, responde a esta tendencia, añadiendo al proceso la ventaja de la trazabilidad y la estandarización del criterio evaluativo.

2.4 Transformación digital de la evaluación en América Latina

América Latina presenta un panorama heterogéneo en materia de digitalización evaluativa. A pesar de las mejoras en conectividad y equipamiento digital, persisten desigualdades de acceso, uso de herramientas y competencias que impiden que todos los estudiantes puedan beneficiarse de las oportunidades de la era digital (CEPAL, 2024). Estas disparidades afectan de manera diferencial la viabilidad de implementar sistemas de evaluación digital en entornos escolares públicos, donde las condiciones de infraestructura tecnológica son variables.

Sin embargo, existen experiencias concretas de modernización en la región. El Instituto Colombiano para la Evaluación de la Educación (Icfes) avanza desde 2022 en un proceso de modernización tecnológica que incorpora inteligencia artificial y analítica de datos, con el propósito de hacer más eficientes las pruebas de Estado y fortalecer la toma de decisiones con información actualizada y confiable para todos los actores del sistema educativo (MEN Colombia, 2025). En el caso dominicano, las Pruebas Nacionales de 2024 registraron un promedio de 56.61 puntos en Lengua Española para la modalidad Académica (MINERD, 2024), dato que sirve como referencia del desempeño general en la asignatura y permite situar comparativamente los resultados obtenidos en el evento estudiado.

2.5 Las olimpiadas académicas como estrategia de excelencia educativa

Las olimpiadas académicas constituyen una estrategia reconocida para estimular el desempeño de alto rendimiento y fomentar competencias disciplinares en el estudiantado preuniversitario. El MINERD ha organizado históricamente competencias de lectura y ortografía a nivel nacional; estas competencias tienen por objetivo desarrollar en el estudiantado la comprensión y producción oral y escrita, así como el pensamiento crítico-creativo (MINERD, 2017). La gestión de estos eventos, sin embargo, ha descansado tradicionalmente en procesos manuales que limitan su escalabilidad, su trazabilidad y la objetividad en la resolución de empates.

La digitalización de la gestión de olimpiadas académicas representa un territorio escasamente explorado en la literatura latinoamericana. La mayoría de las iniciativas documentadas se concentran en olimpiadas de ciencias o matemáticas con apoyo logístico digital, pero sin sistemas integrados que cubran desde la inscripción hasta la publicación de resultados, pasando por la calificación automática y la evaluación oral asistida por rúbrica digital. Este vacío justifica el desarrollo y análisis de experiencias como la que documenta el presente artículo.

Con el fin de situar la contribución del sistema analizado dentro del panorama descrito, la Tabla 1 sintetiza un análisis funcional comparado entre las experiencias de evaluación digital documentadas en la literatura y el módulo objeto de este estudio. La comparación se organiza en torno a la cobertura funcional del flujo evaluativo, desde la inscripción hasta la publicación de resultados, y al contexto de recursos en que cada experiencia opera. El contraste permite precisar el sentido en que el módulo constituye una propuesta pionera en su ámbito. Sus componentes individuales están documentados por separado en la literatura; su aporte diferenciador reside en la integración de todos ellos en un flujo único aplicado a la gestión de olimpiadas académicas en un contexto público de recursos limitados.

Tabla 1.

Análisis funcional comparado de experiencias de evaluación digital

Experiencia (fuente)	***Ámbito y escala***	***Cobertura del flujo evaluativo***	***Evaluación oral con rúbrica integrada***	***Contexto de recursos***
Sistemas nacionales de evaluación digital (OECD, 2023)	Evaluación estandarizada nacional; gran escala	Parcial: aplicación y calificación; sin gestión integral del evento	No reportada	Especializado
Calificación híbrida MCAS (DESE, 2024)	Evaluación estandarizada; gran escala	Parcial: centrada en la calificación de ensayos	No	Especializado
Modernización Icfes (MEN Colombia, 2025)	Pruebas de Estado; nacional	Parcial: analítica e IA sobre pruebas de Estado	No	Especializado
Supervisión digital de olimpiadas, Letonia (OECD, 2023)	Olimpiadas escolares remotas	Parcial: centrada en la supervisión	No	Especializado
Herramientas de evaluación universitaria (Núñez-Solís et al., 2026)	Educación superior; revisión de alcance	Componentes frecuentes pero separados	Documentada por separado	Heterogéneo
Módulo SIGACOM-Olimpiadas (este estudio)	**Olimpiadas académicas preuniversitarias; regional**	**Integral: inscripción, prueba, calificación automática y manual, resultados y empates**	**Sí, integrada en el mismo flujo**	**Infraestructura pública limitada**

Nota. Elaboración propia.

3. Métodos

3.1 Tipo y diseño de investigación

El presente estudio se enmarca en el paradigma de la investigación aplicada con orientación al desarrollo tecnológico e innovación (I+D+I). La investigación aplicada parte de un problema existente cuya solución es inexistente o poco efectiva, y utiliza los conocimientos disponibles para inventar o mejorar una respuesta concreta; el desarrollo experimental, a su vez, complementa ese proceso tomando como base los conocimientos generados en la etapa de investigación para producir nuevos sistemas, dispositivos, procedimientos o servicios (Castro et al., 2023). Este itinerario describe con precisión el proceso que origina el objeto de estudio; la identificación de las limitaciones de la gestión manual de olimpiadas académicas condujo al desarrollo de un módulo digital integrado, cuya primera implementación a escala regional constituye el fenómeno analizado.

El estudio adopta un enfoque de métodos mixtos. Esta aproximación permite combinar las fortalezas de los enfoques cualitativo y cuantitativo, capturar la naturaleza multifacética de fenómenos complejos y generar conocimiento aplicable a situaciones del mundo real (Creswell & Plano Clark, 2018, citados en Adhikari & Timsina, 2024). En investigaciones de aplicabilidad tecnológica, el paradigma mixto resulta

especialmente pertinente, pues permite articular la dimensión cuantitativa de los resultados con la comprensión cualitativa de los procesos involucrados (Creswell y Plano Clark, 2018). El componente cuantitativo abarca las métricas de participación, rendimiento académico por categoría y funcionamiento del sistema; el componente cualitativo recoge la caracterización del proceso operativo, las incidencias registradas y el contraste con la gestión previa al sistema.

El diseño corresponde al estudio de caso institucional de tipo descriptivo. Se documenta y analiza una experiencia singular, desarrollada en condiciones reales, tomando como unidad de análisis la primera edición de la Olimpiada de Lengua Española 2026 de la Dirección Regional de Educación No. 15. Este diseño resulta pertinente cuando el objeto de estudio es un fenómeno contemporáneo situado en su contexto natural, sin separación artificial entre el sistema analizado y las condiciones en que opera (Yin, 2018).

3.2 Fases del proceso I+D+I

El proceso que condujo a la implementación analizada se desarrolló en tres fases articuladas:

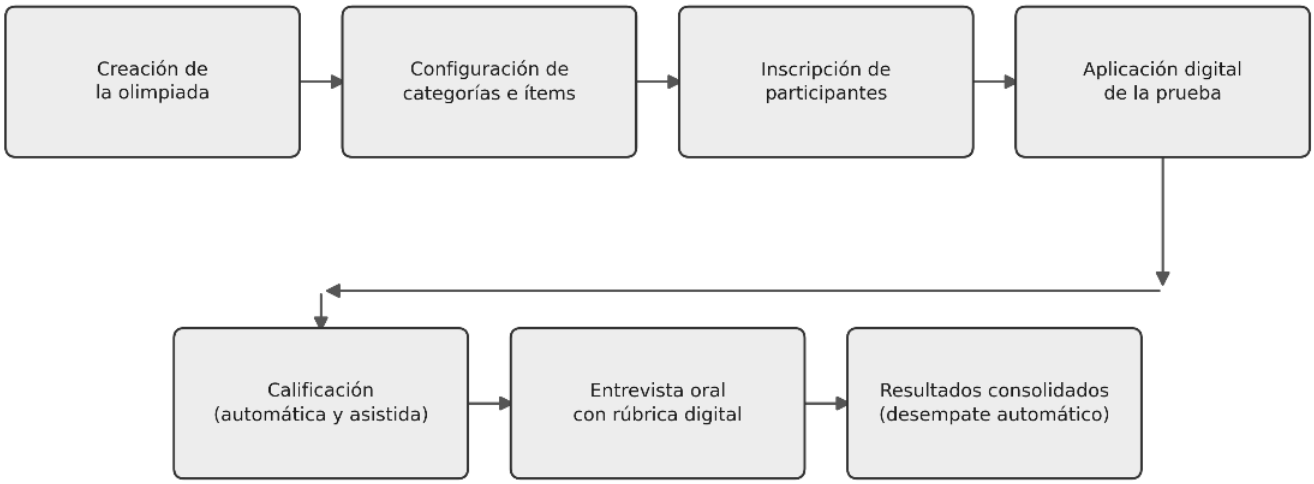
Fase I. Investigación; con el diagnóstico de la gestión manual de olimpiadas académicas en la Regional 15, realizado mediante consultas con el equipo coordinador del área de Lengua Española y con los técnicos distritales responsables del evento. Este proceso permitió identificar las limitaciones operativas del modelo anterior, entre ellas la extensión de la jornada de aplicación, la calificación artesanal por parte de los jurados, la ausencia de trazabilidad en los resultados y la resolución engorrosa de empates, y definir los requerimientos funcionales del sistema a desarrollar.

Fase II. Desarrollo; diseño y construcción del módulo de gestión de olimpiadas integrado en SIGACOM (Sistema de Información y Gestión de Acompañamiento Docente), plataforma desarrollada por el autor, con origen en un piloto distrital y alcance regional en la actualidad. El módulo contempla 16 archivos funcionales y un archivo de documentación (README), 13 tablas de base de datos y seis tipos de ítems evaluativos, con capacidad para gestionar inscripciones, aplicar pruebas digitales, calificar automáticamente ítems cerrados, asistir la evaluación oral mediante rúbrica digital y publicar resultados con resolución automática de empates.

La Figura 1 presenta de forma esquemática el flujo operativo del módulo, desde la creación de la olimpiada hasta la generación de resultados consolidados.

Figura 1.

Flujo operativo del módulo de gestión de olimpiadas académicas - SIGACOM



Nota. Elaboración propia. El diagrama representa el diseño funcional del módulo, no una captura del sistema.

Fase III. Innovación; primera implementación del módulo a escala regional, con cobertura de los seis distritos educativos de la jurisdicción, 89 centros educativos participantes y 96 estudiantes distribuidos en cuatro categorías y dos niveles académicos. La innovación tecnológica se produce cuando la atención a una demanda concreta del entorno genera un impacto positivo de tipo social o institucional, aun cuando el proceso de desarrollo que la origina responde a necesidades prácticas más que a proyectos de I+D formalizados (Galicia, 2015, citado en Zapata Ancajima, 2023).

3.2.1 Arquitectura del sistema, modelo de datos y disponibilidad de recursos

El módulo de gestión de olimpiadas fue desarrollado en PHP y JavaScript, con tecnologías web asociadas, siguiendo un patrón de arquitectura modular autocontenida que aísla la lógica, las vistas y los recursos del módulo respecto del resto de la plataforma SIGACOM. Esta organización facilita el mantenimiento, la portabilidad del módulo y su extensión a otras áreas disciplinares sin afectar los componentes ya en operación.

La arquitectura funcional se distribuye en cinco capas de responsabilidad: (a) administración y configuración de la olimpiada, sus pruebas por categoría y el banco de ítems y textos base; (b) aplicación de la prueba digital, con control de sesión mediante código de acceso único, temporizador con cierre automático y aleatorización de ítems y opciones; (c) calificación, que combina el procesamiento automático de los ítems cerrados con la calificación manual asistida de las producciones abiertas y la evaluación oral con rúbrica, con un mecanismo de bloqueo de jurado que evita conflictos de concurrencia; (d) publicación de resultados, con generación de rankings individuales y distritales, resolución automática de empates y actas de trazabilidad por participante; y (e) auditoría, mediante un registro inmutable de operaciones. Estas capas se materializan en 17 archivos funcionales.

El banco de ítems admite seis tipos evaluativos, codificados en el sistema como Falso/Verdadero (FV), Espacio en blanco (EB) y Selección única (SU), de calificación automática, y Abierta corta (AC), Redacción (RE) y Oral/Entrevista (OR), de calificación humana. Esta distinción operacional es la base del modelo híbrido de evaluación descrito en la sección 4.6.2.

El modelo de datos se compone de 13 tablas relacionales con el prefijo sigacom_ol_, organizadas según las capas descritas. La Tabla 2 resume su estructura y función, la Figura 2 presenta el modelo entidad-relación del módulo y la Figura 3 su diagrama de capas. Las relaciones entre entidades se establecen por integridad referencial a nivel de aplicación, mediante claves foráneas lógicas (por ejemplo, id_olimpiada, id_prueba, id_participante).

Con el propósito de garantizar la reproducibilidad de la solución y la transferencia tecnológica exigida para los desarrollos de software, se pone a disposición la documentación técnica del módulo: el modelo de datos (Tabla 2 y Figura 2) y la arquitectura funcional (Figura 3). El código fuente del módulo se encuentra disponible para consulta bajo solicitud. Los esquemas detallados de la arquitectura, el modelo de datos y la organización del código se documentan en las figuras y tablas incluidas en este artículo.

Tabla 2

Estructura de datos del módulo de gestión de olimpiadas

Capa	***Tabla***	***Función***
Configuración	sigacom_ol_olimpiadas	Ediciones de olimpiada por área y etapa
Configuración	sigacom_ol_pruebas	Examen por combinación de olimpiada y categoría (A-D)
Configuración	sigacom_ol_textos_base	Pasajes de lectura e imágenes asociables a pruebas
Configuración	sigacom_ol_secciones	Secciones que agrupan ítems dentro de una prueba
Configuración	sigacom_ol_items	Banco de ítems; seis tipos evaluativos (FV, EB, SU, AC, RE, OR)
Configuración	sigacom_ol_opciones	Opciones de respuesta de ítems auto-calificables
Configuración	sigacom_ol_criterios	Criterios de rúbrica para ítems de calificación manual
Aplicación	sigacom_ol_participantes	Registro de estudiantes, reutilizable entre olimpiadas
Aplicación	sigacom_ol_inscripciones	Código de acceso único por estudiante y prueba
Aplicación	sigacom_ol_sesiones	Ciclo de vida de la sesión de examen; bloqueo de jurado
Aplicación	sigacom_ol_respuestas	Respuestas inmutables y puntaje automático
Evaluación	sigacom_ol_calificaciones	Historial de calificaciones manuales por criterio
Auditoría	sigacom_ol_audit_log	Registro inmutable de operaciones del módulo

Nota. Elaboración propia. Todas las tablas emplean el prefijo sigacom_ol_. La integridad referencial se gestiona a nivel de aplicación.

Figura 2

Modelo entidad-relación del módulo de gestión de olimpiadas (SIGACOM).

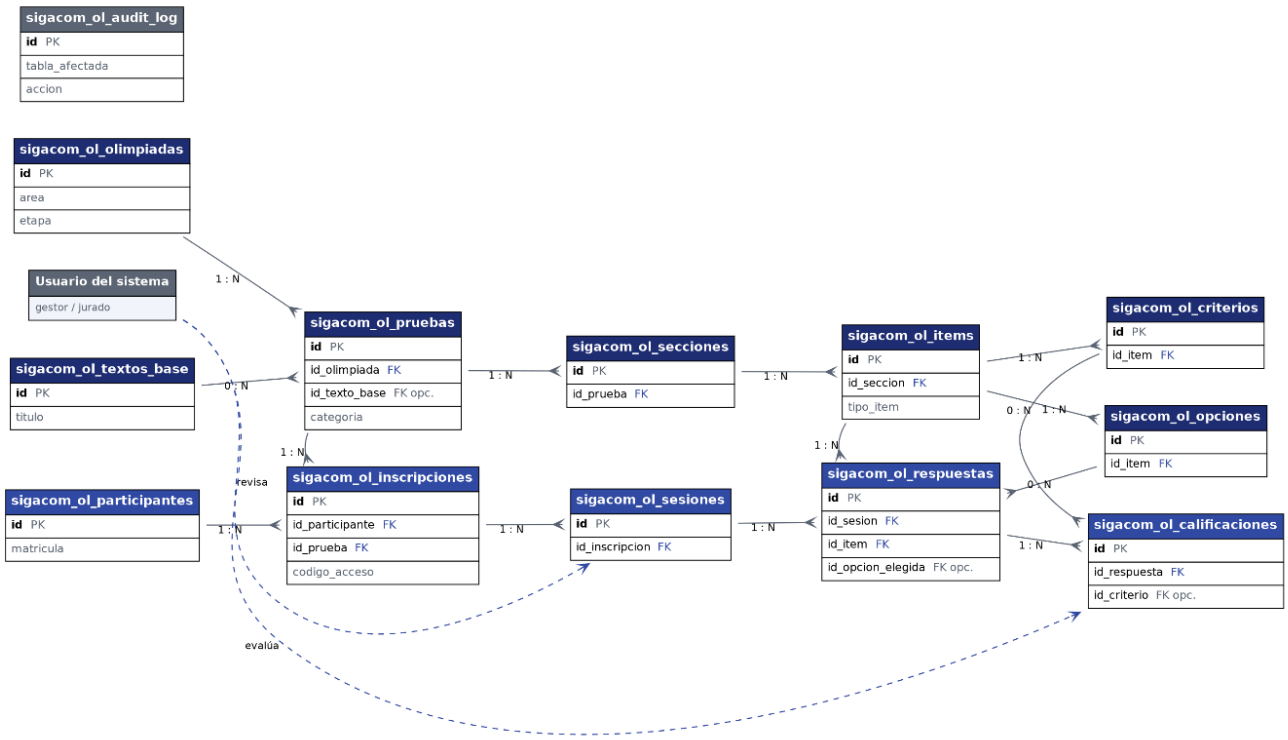
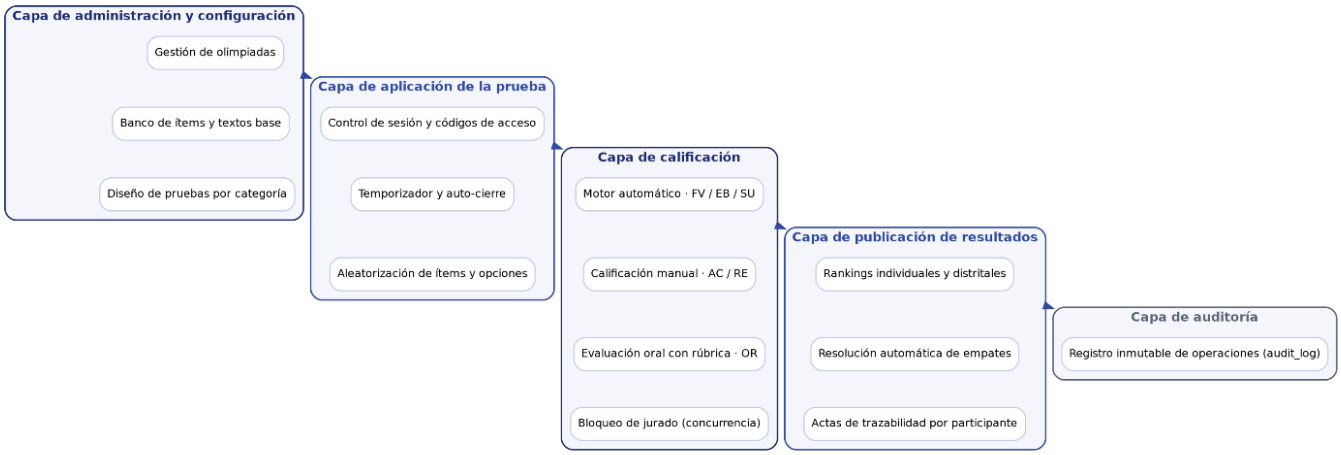


Figura 3

Arquitectura funcional del módulo en cinco capas de responsabilidad



Nota. Elaboración propia.

3.3 Población y muestra

La población del evento estuvo conformada por el estudiantado que superó las etapas local y distrital de selección en los seis distritos educativos de la Dirección Regional de Educación No. 15 (Santo Domingo III), y que accedió en consecuencia a la etapa regional de la Olimpiada de Lengua Española 2026. El proceso de selección operó en tres niveles sucesivos: identificación en el centro educativo, competencia distrital y clasificación a la etapa regional. Dado que se trabajó con la totalidad de los participantes clasificados, 96 estudiantes distribuidos en 24 por cada una de las cuatro categorías establecidas según nivel académico, la muestra es de tipo censal.

Tabla 3.

Distribución de la muestra

Categoría	*Nivel*	*Grado*	*Participantes*
A	Primario	5to y 6to	24

B	Secundario	1ro y 2do	24
C	Secundario	3ro y 4to	24
D	Secundario	5to y 6to	24
Total			**96**

Nota. Elaboración propia.

El equipo evaluador estuvo integrado por 14 jurados, seleccionados entre técnicos y técnicas de la Regional y de los distritos educativos especializados en el área de Lengua Española, con experiencia previa en eventos de olimpiadas escolares. Su función fue doble: calificación de producciones escritas abiertas (respuestas cortas y respuestas extensas) y evaluación oral mediante entrevista asistida por rúbrica digital integrada en el sistema.

Para la fase diagnóstica previa al desarrollo del módulo, se contó con la participación del equipo de coordinación del área de Lengua Española de la Regional y los técnicos distritales responsables del evento, quienes aportaron información sobre las limitaciones del proceso de gestión manual y los requerimientos operativos que debía atender el sistema

3.4 Instrumentos y procedimientos de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante tres procedimientos complementarios. El primero fue la revisión documental de los registros generados por el sistema durante el evento, incluyendo las métricas del dashboard de coordinación, los datos de participación y completación por categoría, los puntajes automáticos y manuales por participante, y los registros del audit log del módulo. El segundo fue la observación directa del evento por parte del equipo técnico de URSATED, que permitió documentar las incidencias operativas, los tiempos reales del proceso y la dinámica de participación de los actores involucrados. El tercero fue el análisis comparativo entre el proceso de gestión anterior al sistema y el implementado en la edición 2026, a partir de la experiencia institucional acumulada en ediciones previas gestionadas de forma manual.

Adicionalmente, al concluir el evento se recogieron percepciones de una submuestra de estudiantes seleccionados al azar, mediante conversaciones informales que indagaron sobre su experiencia con la interfaz del sistema, la navegabilidad entre bloques de ítems y la utilidad del indicador de tiempo restante visible durante la prueba.

3.5 Análisis de datos

El componente cuantitativo se analizó mediante estadística descriptiva; promedios, rangos, tasas de completación y distribución de puntajes por categoría y por distrito. El componente cualitativo se procesó mediante análisis de contenido sobre los registros operativos del evento, la documentación de incidencias, las consultas con el equipo coordinador durante la fase diagnóstica, las percepciones recogidas de una submuestra de estudiantes al cierre del evento y el contraste sistemático entre los procedimientos anteriores y los implementados con el sistema. En los diseños de métodos mixtos, la integración de ambos componentes puede realizarse mediante la conexión de datos, en la que los resultados cuantitativos informan e iluminan la interpretación cualitativa, o mediante la fusión de ambos conjuntos en una presentación conjunta (Creswell & Plano Clark, 2018). En este estudio se adopta el primer mecanismo; los datos cuantitativos de rendimiento y funcionamiento del sistema contextualizan y sustentan las valoraciones cualitativas del proceso de implementación.

El análisis de contenido se organizó en torno a categorías definidas a partir de los objetivos del estudio: (a) eficiencia operativa del proceso; (b) funcionamiento técnico del sistema y control de concurrencia; (c) incidencias y su gestión en campo; (d) calidad de los insumos curriculares; y (e) experiencia de los participantes. Los registros operativos, la documentación de incidencias, las consultas con el equipo coordinador y las percepciones de los estudiantes se codificaron de forma manual bajo estas categorías por parte del equipo técnico de URSATED. La integración de los hallazgos cualitativos con los indicadores cuantitativos se realizó mediante triangulación, contrastando las métricas del sistema con la observación directa del evento y las valoraciones recogidas, con el fin de fortalecer la validez de las interpretaciones.

4. Resultados

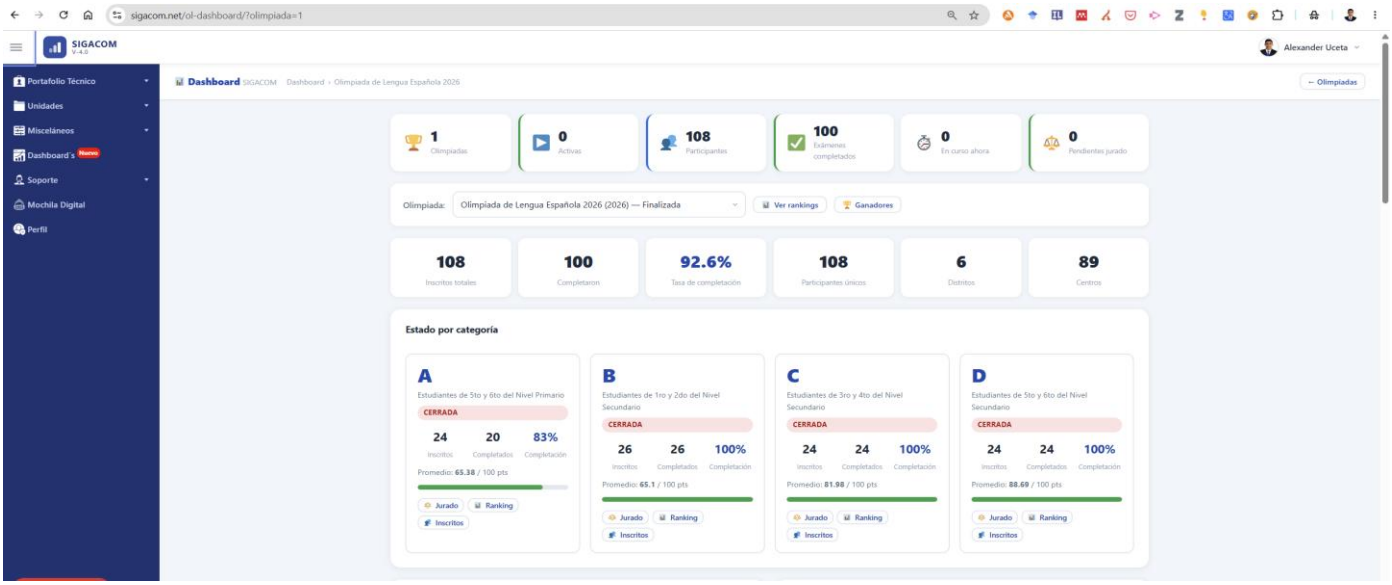
4.1 Participación y cobertura territorial

La Olimpiada de Lengua Española 2026 de la Dirección Regional de Educación No. 15 registró la participación de 96 estudiantes distribuidos en cuatro categorías, con representación de los seis distritos educativos de la jurisdicción y 89 centros educativos. La tasa de completación del proceso evaluativo, que incluyó tanto la prueba digital como la entrevista oral, alcanzó el 100% sobre los participantes inscritos por categoría. Este resultado adquiere particular relevancia considerando que el evento se desarrolló en condiciones de infraestructura tecnológica compartida, utilizando los dos laboratorios de cómputos del Colegio Santo Domingo, con equipos de tipo MultiPoint.

La Figura 4 muestra la vista del dashboard de coordinación al cierre del evento.

Figura 4.

Dashboard general de la Olimpiada de Lengua Española 2026 - SIGACOM



Nota. Elaboración propia. Vista del módulo de gestión de olimpiadas de SIGACOM al cierre del evento.

4.2 Rendimiento académico por categoría

Los puntajes obtenidos por los participantes revelan un patrón de incremento del rendimiento promedio conforme avanza el nivel académico.

Tabla 4.

Rendimiento promedio por categoría - Olimpiada de Lengua Española 2026

Categoría	*Nivel*	*Participantes*	*Promedio*	*Puntaje máximo*	*Puntaje mínimo*
A	Primario (5to-6to)	24	65.38	95.00	44.50
B	Secundario (1ro-2do)	24	65.10	93.00	61.00
C	Secundario (3ro-4to)	24	81.98	97.00	75.00
D	Secundario (5to-6to)	24	88.69	97.50	83.50

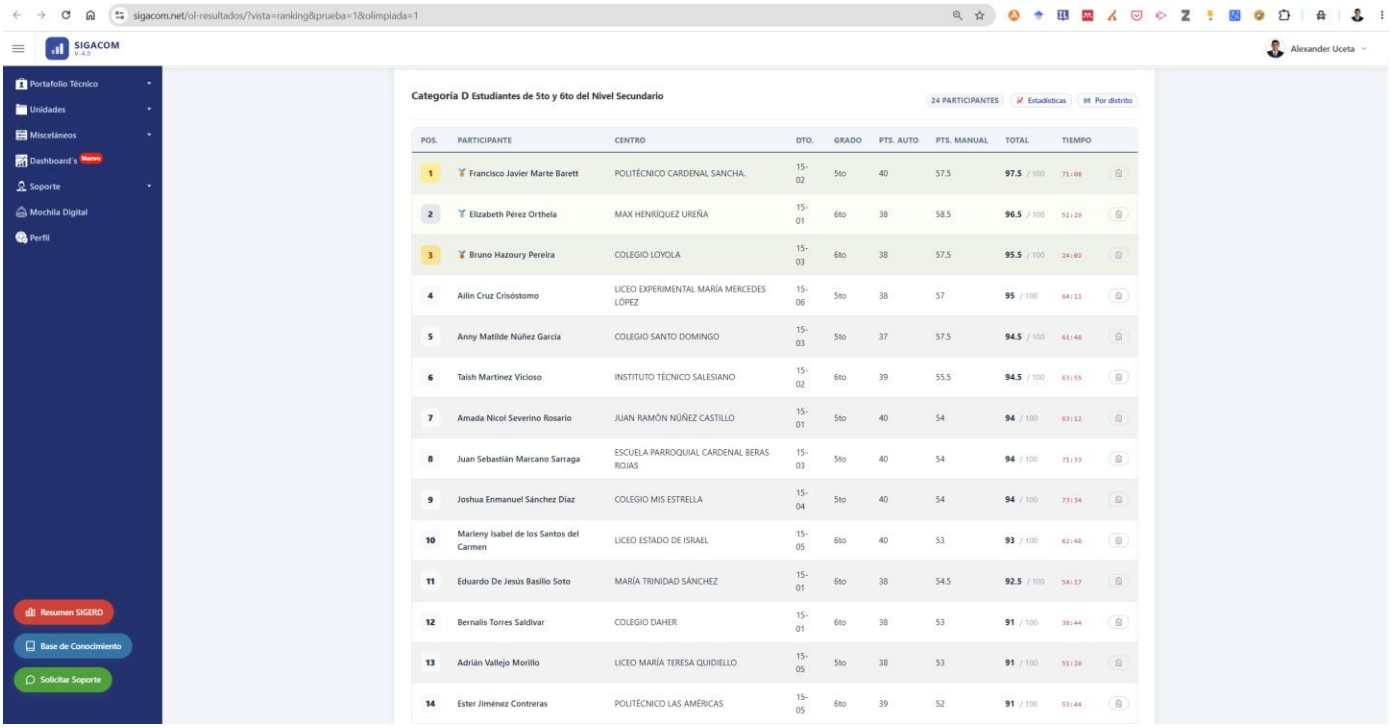
La Categoría D registró tanto el promedio más alto (88.69 puntos) como el puntaje máximo absoluto del evento (97.5 puntos), y la menor dispersión entre los primeros 20 lugares, con 14 participantes por encima de los 91 puntos. La Categoría C presentó el segundo puntaje máximo más alto (97 puntos), con los primeros cuatro lugares concentrados entre 92.5 y 97 puntos. Las Categorías A y B mostraron promedios similares (65.38 y 65.10 respectivamente), con patrones de distribución distintos: la Categoría A presentó mayor dispersión (rango de 50.5 puntos entre el primero y el vigésimo lugar), mientras que la Categoría B mostró mayor densidad en el segmento medio.

A modo de referencia, las Pruebas Nacionales 2024 del MINERD registraron un promedio de 56.61 puntos en Lengua Española para estudiantes de la modalidad Académica del nivel Secundario (MINERD, 2024).

El detalle de este ranking se presenta en la Figura 5.

Figura 5.

Ranking de la Categoría D - Olimpiada de Lengua Española 2026 - SIGACOM



Nota. Elaboración propia. Vista del módulo de resultados de SIGACOM mostrando puntajes automáticos y manuales diferenciados por participante.

4.3 Representación distrital en el segmento de alto rendimiento

El análisis por distrito revela patrones de rendimiento diferenciados entre categorías, con una distribución que el sistema permite documentar con precisión para cada uno de los seis distritos participantes. Los distritos 15-02 y 15-03 concentraron los primeros lugares en todas las categorías: 15-03 lideró en las Categorías A y C con promedios distritales de 73.83 y 89.38 respectivamente, mientras que 15-02 lideró en las Categorías B y D con promedios de 81.13 y 92.63.

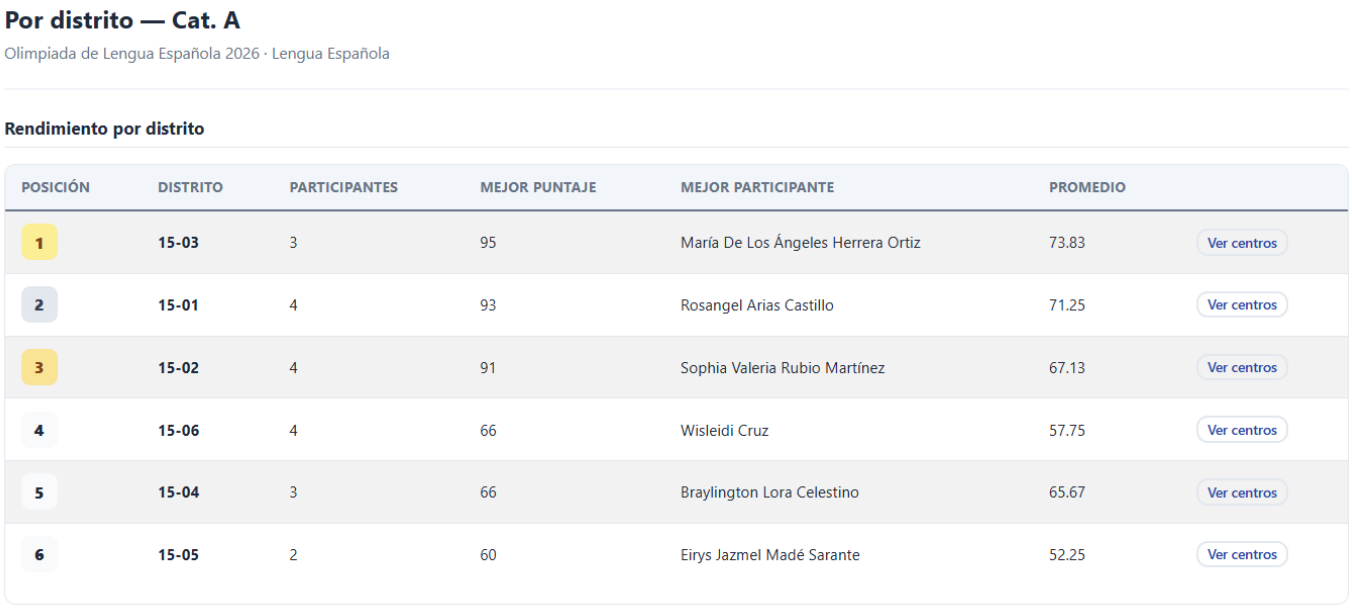
El Distrito 15-01 presentó un comportamiento destacable en la Categoría D, donde alcanzó el promedio distrital más alto del evento en esa categoría (93.50), por encima incluso del distrito que aportó el mejor puntaje individual. Los distritos 15-05 y 15-06 mostraron rendimientos variables según la categoría, con 15-06 alcanzando la segunda posición distrital en Categoría B. El Distrito 15-04 se ubicó consistentemente en las posiciones inferiores del ranking distrital en tres de las cuatro categorías, dato que el sistema permite identificar con precisión y que podría orientar estrategias de fortalecimiento académico diferenciado en ediciones futuras.

La capacidad del sistema para generar esta vista analítica por distrito, de forma automática al cierre del evento, constituye en sí misma un aporte institucional relevante, dado que en el modelo manual anterior este nivel de desagregación territorial de los resultados era prácticamente inviable en el corto plazo.

La distribución completa por categoría y distrito se ilustra en las Figuras 6 a 9.

Figura 6.

Rendimiento por distrito - Categoría A - Olimpiada de Lengua Española 2026 - SIGACOM



Por distrito — Cat. A

Olimpiada de Lengua Española 2026 · Lengua Española

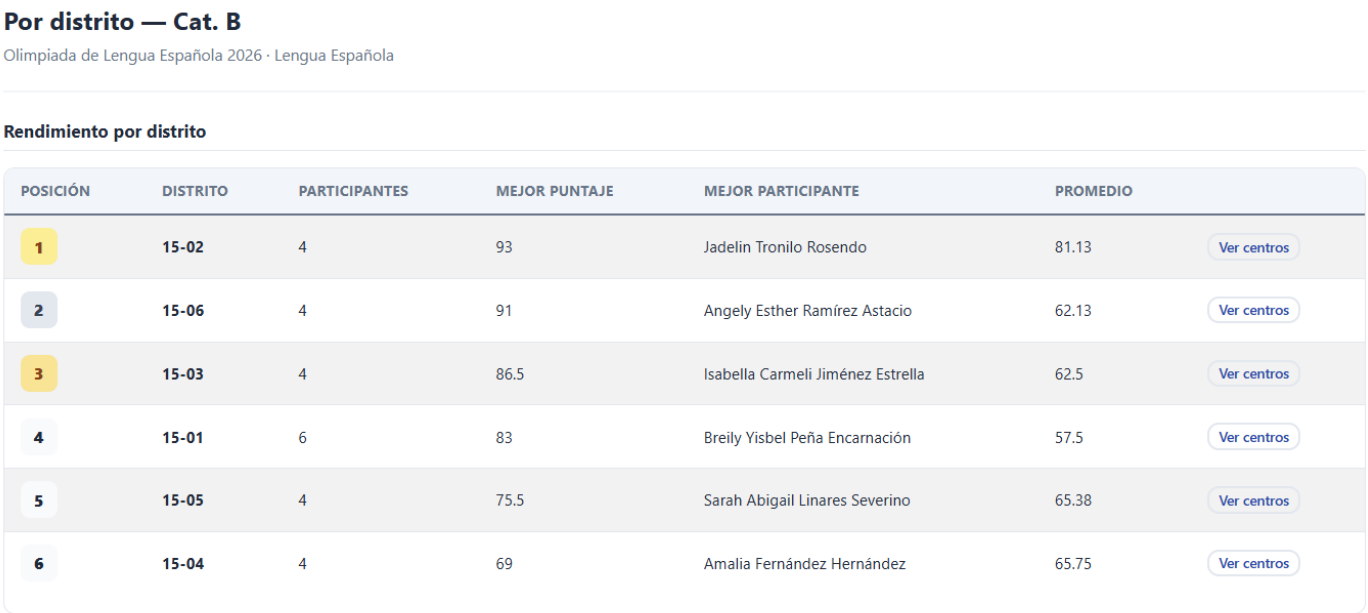
Rendimiento por distrito

POSICIÓN	DISTRITO	PARTICIPANTES	MEJOR PUNTAJE	MEJOR PARTICIPANTE	PROMEDIO	
1	15-03	3	95	María De Los Ángeles Herrera Ortiz	73.83	Ver centros
2	15-01	4	93	Rosangel Arias Castillo	71.25	Ver centros
3	15-02	4	91	Sophia Valeria Rubio Martínez	67.13	Ver centros
4	15-06	4	66	Wisleidi Cruz	57.75	Ver centros
5	15-04	3	66	Braylington Lora Celestino	65.67	Ver centros
6	15-05	2	60	Eirys Jazmel Madé Sarante	52.25	Ver centros

Nota. Elaboración propia. Vista del módulo de resultados de SIGACOM mostrando clasificación distrital por mejor puntaje y promedio.

Figura 7.

Rendimiento por distrito - Categoría B - Olimpiada de Lengua Española 2026 - SIGACOM



Por distrito — Cat. B

Olimpiada de Lengua Española 2026 · Lengua Española

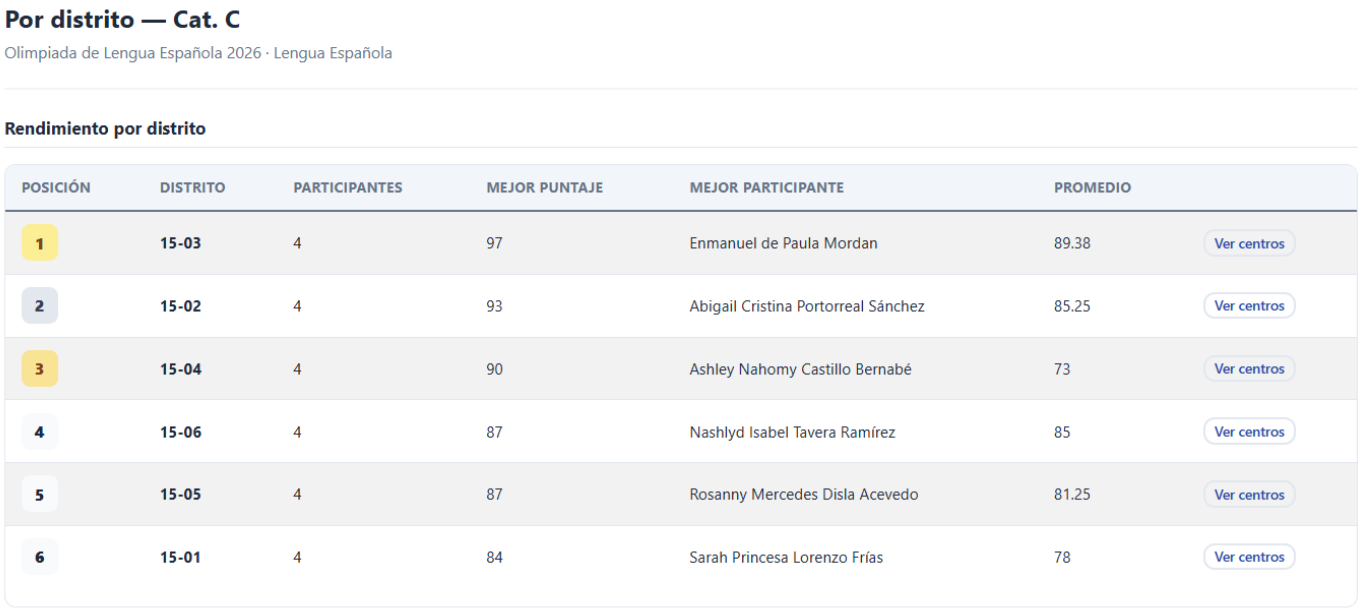
Rendimiento por distrito

POSICIÓN	DISTRITO	PARTICIPANTES	MEJOR PUNTAJE	MEJOR PARTICIPANTE	PROMEDIO	
1	15-02	4	93	Jadelin Tronilo Rosendo	81.13	Ver centros
2	15-06	4	91	Angely Esther Ramírez Astacio	62.13	Ver centros
3	15-03	4	86.5	Isabella Carmeli Jiménez Estrella	62.5	Ver centros
4	15-01	6	83	Breily Yisbel Peña Encarnación	57.5	Ver centros
5	15-05	4	75.5	Sarah Abigail Linares Severino	65.38	Ver centros
6	15-04	4	69	Amalia Fernández Hernández	65.75	Ver centros

Nota. Elaboración propia.

Figura 8.

Rendimiento por distrito - Categoría C - Olimpiada de Lengua Española 2026 - SIGACOM



Por distrito — Cat. C

Olimpiada de Lengua Española 2026 · Lengua Española

Rendimiento por distrito

POSICIÓN	DISTRITO	PARTICIPANTES	MEJOR PUNTAJE	MEJOR PARTICIPANTE	PROMEDIO	
1	15-03	4	97	Enmanuel de Paula Mordan	89.38	Ver centros
2	15-02	4	93	Abigail Cristina Portorreal Sánchez	85.25	Ver centros
3	15-04	4	90	Ashley Nahomy Castillo Bernabé	73	Ver centros
4	15-06	4	87	Nashlyd Isabel Tavera Ramírez	85	Ver centros
5	15-05	4	87	Rosanny Mercedes Disla Acevedo	81.25	Ver centros
6	15-01	4	84	Sarah Princesa Lorenzo Frías	78	Ver centros

Nota. Elaboración propia.

Figura 9.

Rendimiento por distrito - Categoría D - Olimpiada de Lengua Española 2026 - SIGACOM



Por distrito — Cat. D

Olimpiada de Lengua Española 2026 · Lengua Española

Rendimiento por distrito

POSICIÓN	DISTRITO	PARTICIPANTES	MEJOR PUNTAJE	MEJOR PARTICIPANTE	PROMEDIO	
1	15-02	4	97.5	Francisco Javier Marte Barett	92.63	Ver centros
2	15-01	4	96.5	Elizabeth Pérez Orthela	93.5	Ver centros
3	15-03	4	95.5	Bruno Hazoury Pereira	93.25	Ver centros
4	15-06	4	95	Ailin Cruz Crisóstomo	86.13	Ver centros
5	15-04	4	94	Joshua Enmanuel Sánchez Diaz	77.25	Ver centros
6	15-05	4	93	Marleny Isabel de los Santos del Carmen	89.38	Ver centros

Nota. Elaboración propia.

4.4 Eficiencia operativa del proceso

El indicador de eficiencia más significativo del evento fue la reducción sustancial del tiempo operativo total. En ediciones previas gestionadas de forma manual, el proceso de aplicación de la prueba escrita ocupaba desde las primeras horas de la mañana hasta la tarde, sin incluir la evaluación oral ni la fase de calificación. En la edición 2026, con el sistema digital, la totalidad de los 96 participantes completó tanto la prueba en computadora como la entrevista oral antes de la 1:30 PM del mismo día. Los resultados finales estuvieron disponibles a las 10:00 AM de la jornada siguiente, frente a los varios días que habitualmente requería el proceso de calificación manual y consolidación de resultados en ediciones anteriores.

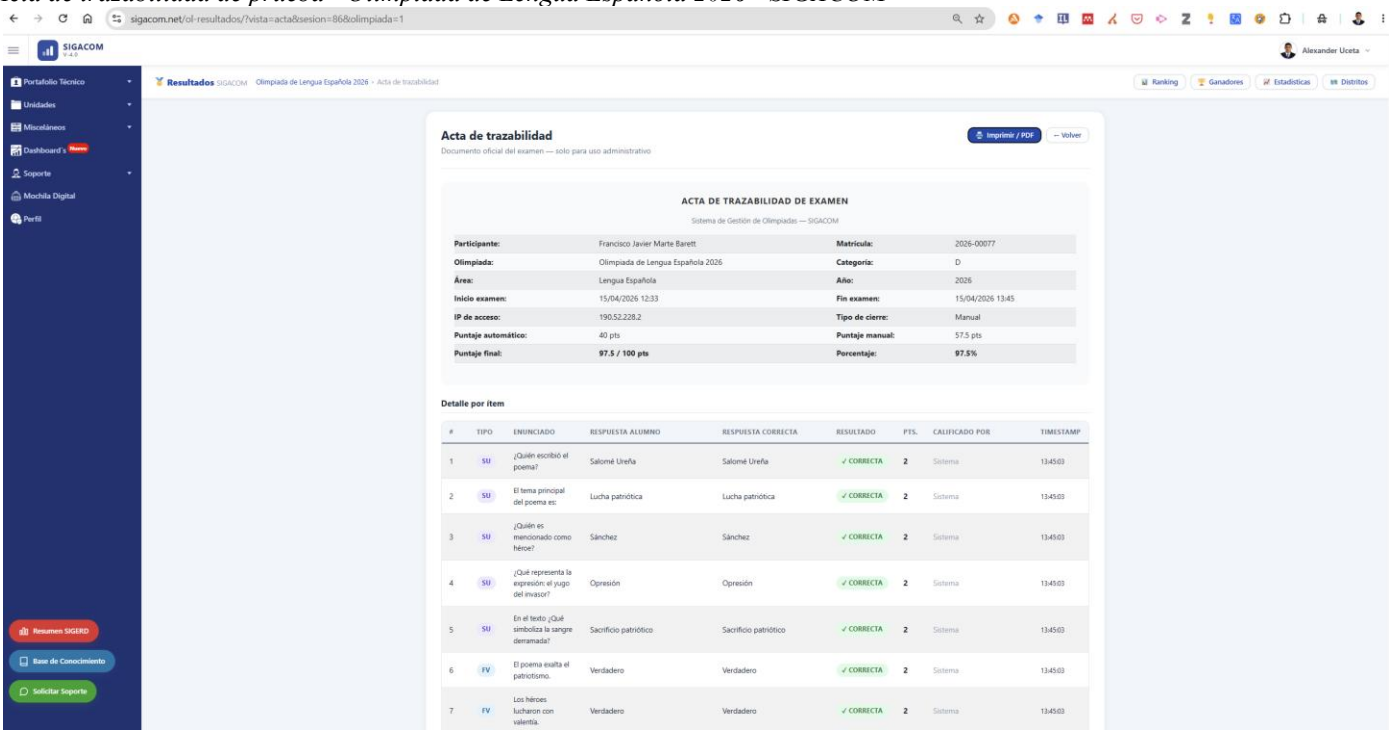
Esta diferencia se explica en parte porque la calificación automática de los ítems cerrados se procesó en tiempo real durante el evento, mientras que la calificación de los ítems de producción escrita fue completada por los jurados en horas nocturnas desde sus equipos personales, dado que tanto los equipos del laboratorio del Colegio Santo Domingo como los suministrados por la Regional para el evento no estaban disponibles fuera del horario de la jornada.

La calificación automática operó sin interrupciones para todos los ítems de tipo cerrado. El sistema de bloqueo de jurado funcionó de manera efectiva durante la calificación simultánea por parte de los 14 evaluadores, sin registrarse conflictos de concurrencia en la asignación de participantes.

La Figura 10 ejemplifica el acta de trazabilidad individual generada por el sistema, documento que consolida el registro completo del proceso evaluativo por participante.

Figura 10a.

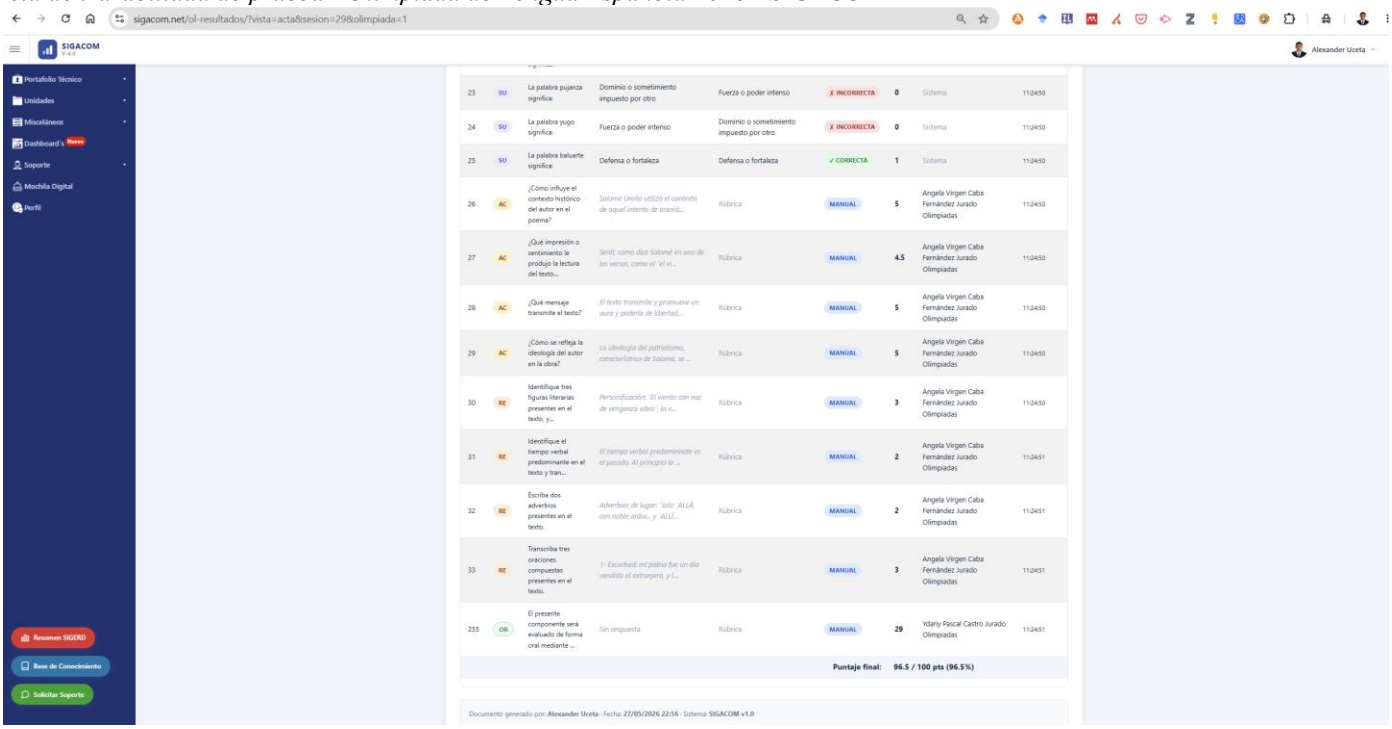
Acta de trazabilidad de prueba - Olimpiada de Lengua Española 2026 - SIGACOM



Nota. Elaboración propia. Primera sección del acta de trazabilidad individual generada por SIGACOM, mostrando datos del participante e ítems de respuesta cerrada con calificación automática.

Figura 10b.

Acta de trazabilidad de prueba - Olimpiada de Lengua Española 2026 - SIGACOM



Nota. Elaboración propia. Segunda sección del acta de trazabilidad individual generada por SIGACOM, mostrando ítems de producción escrita con calificación manual del jurado y evaluación oral con rúbrica digital.

4.5 Incidencias del proceso y gestión en campo

El desarrollo del evento enfrentó un conjunto de situaciones que, gestionadas en tiempo real, no impidieron la culminación exitosa del proceso. Su documentación tiene valor para el fortalecimiento de futuras ediciones.

La principal incidencia técnica estuvo asociada a la capacidad de conectividad de los laboratorios del Colegio Santo Domingo, que operaban con equipos de tipo Multipoint. La demanda simultánea de accesos al sistema generó intermitencias en algunas sesiones, y el servidor del laboratorio bloqueó en un momento la URL de acceso a la prueba por mecanismos de seguridad propios de la red. Ambas situaciones fueron resueltas en campo con la asistencia del personal técnico del laboratorio. Como consecuencia, un número reducido de participantes experimentó tiempos de espera superiores al estimado para completar su prueba, y en muy pocos casos el sistema registró cierre de sesión por tiempo agotado (límite de 75 minutos). Para los casos en que una sesión quedó inaccesible, se generó una nueva inscripción con código de acceso distinto, lo que explica la diferencia entre los 96 participantes reales y los 108 registros que aparecen en el dashboard del sistema.

En el plano logístico, se identificaron tres áreas de oportunidad para ediciones futuras. La primera concierne a la calidad y coherencia de los documentos de prueba suministrados al sistema, que requirieron revisión técnica adicional antes de la carga, lo que apunta a la necesidad de establecer un protocolo de validación previa de los insumos por parte de los equipos curriculares. La segunda corresponde a la comunicación de los textos base incluidos en las pruebas, que no llegó a todos los participantes con la debida antelación, aspecto que forma parte de la logística de preparación que debe coordinarse entre los niveles distrital y regional antes del evento. La tercera agrupa dos situaciones puntuales: algunos datos de inscripción llegaron con inconsistencias menores (apellidos o grados incorrectos), atribuibles a la cadena de recopilación desde los distritos, y un número reducido de credenciales de acceso no estuvo disponible en formato de gafete el día del evento, situación resuelta con los listados de respaldo en PDF disponibles en el sistema.

Las percepciones recogidas de una submuestra de estudiantes al cierre del evento fueron favorables. Los participantes destacaron la novedad del formato digital, la facilidad de navegación entre los bloques de ítems y la utilidad del indicador de tiempo restante visible en todo momento durante la prueba, elementos que contribuyeron a una experiencia evaluativa ordenada y transparente.

4.6. Discusión de los resultados

4.6.1 La digitalización de la gestión evaluativa como salto cualitativo institucional

Los resultados obtenidos confirman que la implementación de un sistema digital integrado para la gestión de olimpiadas académicas genera una transformación operativa de naturaleza cualitativa, que trasciende la mera transición del soporte físico al digital. La reducción del tiempo total del

proceso, de una jornada completa a menos de medio día para la fase de aplicación, y de varios días a menos de 24 horas para la disponibilidad de resultados, representa un cambio sustancial en la capacidad institucional de gestión evaluativa. La literatura sobre evaluación digital identifica la eficiencia temporal, la mayor adaptabilidad y la provisión de retroalimentación inmediata como ventajas centrales de los entornos de evaluación mediados por tecnología (Viberg et al., 2024), y los datos de esta experiencia ofrecen evidencia empírica concreta de esas ventajas en un contexto preuniversitario latinoamericano.

Este hallazgo cobra mayor peso cuando se considera que la experiencia se desarrolló en condiciones de infraestructura no especializada: laboratorios escolares con equipos MultiPoint, conectividad compartida y recursos logísticos propios de una institución pública. Las desigualdades de acceso, uso de herramientas y competencias digitales en América Latina siguen siendo un obstáculo para que todos los actores educativos puedan beneficiarse de las oportunidades de la era digital (CEPAL, 2024), lo que hace que una implementación exitosa en estas condiciones resulte especialmente significativa desde el punto de vista de la viabilidad y la replicabilidad del modelo.

A diferencia de las experiencias de digitalización evaluativa documentadas en la literatura, concentradas mayoritariamente en sistemas nacionales de gran escala con recursos especializados (OECD, 2023; MEN Colombia, 2025), la experiencia aquí analizada muestra que una transformación operativa de esta magnitud es alcanzable a escala regional y con infraestructura no especializada, lo que amplía el rango de contextos en los que estos hallazgos resultan aplicables.

4.6.2 El modelo híbrido de evaluación: automatización y juicio experto

Uno de los aportes más relevantes del sistema analizado es la integración en una sola plataforma de tres modalidades evaluativas: calificación automática de ítems cerrados, calificación manual asistida de producciones escritas abiertas y evaluación oral con rúbrica digital. La combinación de evaluadores humanos y calificación automatizada, en la que los ítems que admiten respuesta única son procesados por el sistema mientras que las producciones abiertas son valoradas por evaluadores entrenados, permite aprovechar la eficiencia de la automatización sin sacrificar la validez del juicio experto en las dimensiones que lo requieren (DESE, 2024). La literatura especializada reconoce este principio como una característica definitoria de los sistemas de evaluación digital maduros, y los resultados de esta experiencia ofrecen evidencia de su viabilidad en un contexto de recursos limitados.

Mientras que los modelos híbridos documentados se han aplicado principalmente a la calificación de ensayos dentro de pruebas estandarizadas (DESE, 2024), el módulo analizado extiende ese principio a un evento competitivo completo e incorpora, además, la evaluación oral con rúbrica digital dentro del mismo flujo, una integración escasamente reportada en los sistemas revisados (Núñez-Solís et al., 2026).

La incorporación de la entrevista oral con rúbrica digital dentro del mismo flujo evaluativo representa un elemento diferenciador respecto a la mayoría de los sistemas documentados en la literatura, que tienden a circunscribirse a la evaluación escrita. Las herramientas de rúbrica digital, los entornos de videoconferencia y los sistemas de supervisión en línea aparecen como componentes frecuentes, pero generalmente separados en los entornos evaluativos contemporáneos (Núñez-Solís et al., 2026); su integración en un módulo unificado, con control de concurrencia entre evaluadores y trazabilidad completa, constituye una contribución práctica al campo.

4.6.3 Las incidencias como insumo para la mejora institucional

Las situaciones identificadas durante el evento ofrecen información valiosa para el fortalecimiento del proceso en ediciones futuras, y su documentación sistemática forma parte del valor científico de esta experiencia. Tres de ellas merecen análisis particular.

La primera concierne a la calidad de los insumos curriculares cargados al sistema. La necesidad de revisar y ajustar los documentos de prueba antes de su carga evidencia que la adopción de un sistema digital de evaluación exige, como condición previa, el establecimiento de protocolos de validación de contenido por parte de los equipos técnicos responsables del área. Los sistemas de evaluación digital dependen tanto de la robustez tecnológica como de la calidad y consistencia de los insumos que los alimentan, aspecto que determina en gran medida la experiencia del evaluado durante la aplicación (Chamba y Chikusvura-Matiza, 2025). Este hallazgo apunta a la necesidad de incorporar una fase formal de revisión técnico-curricular como parte del flujo de trabajo previo a cada edición.

La segunda incidencia, relacionada con la comunicación de los textos base a los participantes, pone de relieve que la implementación tecnológica no agota los requerimientos logísticos del evento. La gestión de una olimpiada digital implica una cadena de responsabilidades que abarca desde el nivel distrital hasta el aula, y que requiere coordinación explícita en cada eslabón. La gobernanza de los datos y la coordinación entre actores del sistema constituyen desafíos recurrentes en la implementación de sistemas de información educativa, particularmente cuando la cadena de recopilación y validación involucra múltiples niveles institucionales (Lee y Kim, 2023, citados en Rahmatullah y Chamidi, 2025). La inconsistencia en algunos datos de inscripción responde a ese mismo patrón: la información viajó desde los centros educativos, pasó por los técnicos distritales y llegó al sistema sin una instancia de verificación intermedia.

La tercera, referida a los gafetes faltantes, ilustra algo que los estudios de implementación tecnológica en educación señalan con frecuencia: los sistemas digitales reducen la dependencia

de procesos manuales, aunque en las primeras ediciones esa dependencia persiste en aspectos logísticos periféricos. La disponibilidad de listados generados por el sistema, con código único incluido de respaldo y en PDF permitió resolver la situación en campo sin afectar el desarrollo del evento, lo que refleja la previsión del equipo técnico ante escenarios de contingencia.

4.6.4 Rendimiento académico y lectura territorial

El incremento progresivo del promedio por categoría (65.38 en A, 65.10 en B, 81.98 en C y 88.69 en D) guarda coherencia con el desarrollo acumulativo de competencias en lengua: los estudiantes de niveles superiores han tenido mayor exposición a textos complejos, mayor práctica escritural y mayor desarrollo de capacidad argumentativa. La similitud entre los promedios de las Categorías A y B merece atención en futuras ediciones, pues podría señalar tanto una curva de dificultad de las pruebas como características particulares de los participantes seleccionados en esos niveles, o bien la influencia de las incidencias de conectividad que afectaron principalmente a los participantes de menor edad.

El análisis distrital revela que los distritos 15-02 y 15-03 concentraron los primeros lugares en todas las categorías, mientras que los demás distritos mostraron rendimientos variables según la categoría. Este patrón tiene dos lecturas complementarias. Por un lado, confirma que el proceso de selección distrital identificó talento genuinamente distribuido en el territorio, con todos los distritos aportando participantes competitivos en al menos una categoría. Por otro, el sistema genera por primera vez una base de datos territorial que permite identificar con precisión qué distritos requieren mayor acompañamiento académico en el área de Lengua Española, información que en el modelo manual anterior era prácticamente inaccesible en el corto plazo. Ambas lecturas son posibles gracias a la trazabilidad que el sistema provee de forma automática al cierre del evento.

Este hallazgo dialoga con la advertencia de Heeks (2017) sobre el riesgo de que las tecnologías ajenas al contexto amplifiquen las lógicas institucionales existentes en lugar de transformarlas; la capacidad del sistema para desagregar el rendimiento por distrito, construida desde y para la realidad de la jurisdicción, ilustra cómo un desarrollo contextualizado convierte un dato antes inaccesible en un insumo para la equidad territorial.

4.6.5 Condiciones de replicabilidad del modelo

La experiencia analizada aporta evidencia concreta sobre las condiciones que hacen viable la extensión del modelo a otras áreas del conocimiento y a otras jurisdicciones educativas. La innovación tecnológica orientada a resolver necesidades concretas del entorno institucional genera impacto positivo cuando las soluciones desarrolladas son pertinentes al contexto en el que se aplican (Galicia, 2015, citado en Zapata Ancajima, 2023). El módulo documentado en este artículo fue construido sobre una plataforma ya en uso por más de 1,200 usuarios en seis distritos educativos, lo que reduce las barreras de adopción para su extensión a otras disciplinas y niveles del sistema preuniversitario.

Tres condiciones se identifican como determinantes para la replicabilidad; la disponibilidad de infraestructura tecnológica básica en los centros educativos sede, la formación previa de los jurados en el uso del sistema, y el establecimiento de protocolos de validación de insumos curriculares antes de cada edición. Los aprendizajes operativos de esta primera edición, sistematizados en este artículo, constituyen el insumo principal para el diseño del protocolo de implementación de ediciones futuras, tanto en Lengua Española como en otras áreas disciplinares de la Regional 15.

4.6.6 Limitaciones del estudio

Este estudio presenta limitaciones que conviene explicitar. En primer lugar, la valoración de la experiencia de los participantes se obtuvo mediante percepciones recogidas de una submuestra al cierre del evento, con carácter exploratorio, sin la aplicación de un instrumento validado de aceptación o usabilidad del sistema. En segundo lugar, el componente cuantitativo se circunscribe a estadística descriptiva, coherente con el alcance de un estudio de caso de primera edición, sin análisis inferencial. En tercer lugar, al tratarse de una experiencia situada en una jurisdicción específica, la generalización de los resultados requiere prudencia. Estas limitaciones definen líneas de trabajo para ediciones futuras: la incorporación de un instrumento validado de aceptación tecnológica aplicado a estudiantes y jurados, la ampliación del análisis cuantitativo y la réplica del modelo en otras áreas disciplinares y jurisdicciones, que permitirían robustecer la evidencia aquí presentada.

4.7 Repercusión institucional y social

La actividad tuvo cobertura en medios de comunicación de circulación nacional y regional, lo que constituye una evidencia adicional del alcance institucional del evento más allá de los indicadores operativos y evaluativos ya documentados. La difusión periodística del proceso, iniciativa poco frecuente en experiencias de digitalización educativa a nivel distrital o regional, refleja el reconocimiento social del carácter innovador de la propuesta y su pertinencia dentro del contexto institucional de la Regional 15.

Las Figuras 11 y 12 documentan esta cobertura mediática.

Figura 11.

Cobertura periodística de la Olimpiada de Lengua Española 2026 en el periódico Nuevo Diario



Nota. Tomado de "Regional 15 de Educación realiza Olimpiada de Lectura y Escritura en formato digital," por *Nuevo Diario*, 15 de abril de 2026 (https://elnuevodiario.com.do/regional-15-de-educacion-realiza-olimpiada-de-lectura-y-escritura-en-formato-digital/).

Figura 12. *Cobertura periodística de la Olimpiada de Lengua Española 2026 en el periódico RC Noticias*



Nota. Tomado de "Regional 15 de Educación realiza con éxito Olimpiada de Lectura y Escritura en formato digital," por RC Noticias, 15 de abril de 2026 (https://robertocavada.com/regional-15-de-educacion-realiza-con-exito-olimpiada-de-lectura-y-escritura-en-formato-digital/**).**

5. Conclusiones

La primera edición de la Olimpiada de Lengua Española 2026 de la Dirección Regional de Educación No. 15 demostró que es viable implementar un sistema digital integrado de gestión de eventos académicos competitivos en condiciones de infraestructura pública limitada, con resultados operativos, evaluativos e institucionales significativos.

Desde el punto de vista operativo, la reducción del tiempo total del proceso, de una jornada completa a menos de medio día para la fase de aplicación, y de varios días a menos de 24 horas para la disponibilidad de resultados, constituye la transformación más tangible generada por el sistema. Esta eficiencia se logró sin sacrificar la complejidad evaluativa del evento, que integró en una sola jornada la prueba escrita digital, la calificación automática de ítems cerrados, la evaluación de producciones escritas abiertas y la entrevista oral con rúbrica digital.

Desde el punto de vista evaluativo, el modelo híbrido implementado, que combina automatización y juicio experto en un flujo unificado con trazabilidad completa, ofrece una arquitectura replicable para otros eventos de evaluación de alto rendimiento en el sistema preuniversitario dominicano. La generación automática de rankings individuales y distritales al cierre del evento abre una dimensión analítica que el modelo manual anterior no podía proveer en el corto plazo.

Desde el punto de vista institucional, la experiencia evidenció que la adopción de un sistema digital de esta naturaleza exige, como condición paralela al desarrollo tecnológico, el fortalecimiento de los protocolos logísticos y curriculares que alimentan el sistema. Las áreas de oportunidad identificadas, relativas a la validación de insumos, la comunicación previa con los participantes y la consistencia de los datos de inscripción, constituyen aprendizajes concretos para el diseño de ediciones futuras.

La percepción favorable de los participantes, expresada en valoraciones espontáneas sobre la interfaz, la navegabilidad y la transparencia del proceso, sugiere que el sistema responde adecuadamente a las expectativas de los estudiantes del sistema preuniversitario dominicano en cuanto a experiencias evaluativas digitales.

Finalmente, la experiencia documentada en este artículo aporta evidencia empírica desde un contexto latinoamericano poco representado en la literatura sobre innovación tecnológica aplicada a la gestión evaluativa. Su valor reside tanto en los resultados obtenidos como en la sistematización del proceso, los errores enfrentados y las soluciones implementadas, elementos que combinados configuran un modelo de referencia para otras jurisdicciones educativas con condiciones similares.

6. Referencias bibliográficas

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. Recuperado de https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/19171

CEPAL. (2024). Educación y desarrollo de competencias digitales en América Latina y el Caribe. Comisión Económica para América Latina y el Caribe. Recuperado de https://www.cepal.org/es/publicaciones/81377-educacion-desarrollo-competencias-digitales-america-latina-caribe

Chamba, L., y Chikusvura-Matiza, T. (2025). Tech-driven high-stakes examinations: Will digital exams deliver on quality education? Current Research Journal of Social Sciences and Humanities, 8(1), 37-48. doi:10.12944/CRJSSH.8.1.04

Creswell, J. W., y Plano Clark, V. L. (2018). Designing and conducting mixed methods research (3ra ed.). SAGE Publications.

DESE. (2024). Scoring student answers to constructed-response questions and essays. Massachusetts Department of Elementary and Secondary Education. Recuperado de https://www.doe.mass.edu/mcas/student/2024/scoring.html

García-Estrella, C., Delgado-Bardales, J., y Contreras-Julián, R. (2025). Digital Governance Model for Peruvian University Academic Management. Journal of Management World, 2025(1), 291-311. doi:10.53935/jomw.v2024i4.665

Heeks, R. (2017). Information and communication technology for development (ICT4D). Routledge.

López, A. M., y Luque, E. (2025). La olimpiada de economía en el contexto de las olimpiadas científicas españolas. Encuentros Multidisciplinares, 79. Recuperado de http://www.encuentros-multidisciplinares.org/revista-79/ana-lopez-y-eugenio-luque.pdf

Ministerio de Educación de la República Dominicana. (2017). Ministerio de Educación celebra Olimpiada de Lectura y Concurso Nacional de Ortografía. MINERD. Recuperado de https://ministeriodeeducacion.gob.do/comunicaciones/noticias/ministerio-de-educacion-celebra-olimpiada-de-lectura-y-concurso-nacional-de-ortografia

Ministerio de Educación de la República Dominicana. (2024). MINERD da a conocer resultados de segunda convocatoria de las Pruebas Nacionales 2024. MINERD. Recuperado de https://www.ministeriodeeducacion.gob.do/comunicaciones/noticias/minerd-da-a-conocer-resultados-de-segunda-convocatoria-de-las-pruebas-nacionales-2024

Ministerio de Educación Nacional de Colombia. (2025). Icfes impulsa la transformación tecnológica del sistema de evaluación del país. MEN Colombia. Recuperado de https://www.mineducacion.gov.co/portal/salaprensa/Comunicados/425635

Nuevo Diario. (2026, 15 de abril). Regional 15 de Educación realiza Olimpiada de Lectura y Escritura en formato digital. Recuperado de https://elnuevodiario.com.do/regional-15-de-educacion-realiza-olimpiada-de-lectura-y-escritura-en-formato-digital/

Núñez-Solís, M., Garrido-Miranda, J. M., Chávez-Castillo, Y., López-Jiménez, T., Espinoza-Navarrete, C., y Sanhueza-Campos, C. (2026). Digital technologies in university assessment: a scoping review. Frontiers in Education, 11, 1744310. doi:10.3389/feduc.2026.1744310

OECD. (2023). OECD Digital Education Outlook 2023: Digital assessment. Organisation for Economic Co-operation and Development. Recuperado de https://www.oecd.org/en/publications/oecd-digital-education-outlook-2023_c74f03de-en/full-report/digital-assessment_a102e604.html

Rahmatullah, y Chamidi, A. S. (2025). The urgency of education management information system in managing educational institution data. International Journal of Management, Innovation, and Education, 3(1), 13-17. doi:10.33751/ijmie.v3i1.1273

RC Noticias. (2026, 15 de abril). Regional 15 de Educación realiza con éxito Olimpiada de Lectura y Escritura en formato digital. Recuperado de https://robertocavada.com/regional-15-de-educacion-realiza-con-exito-olimpiada-de-lectura-y-escritura-en-formato-digital/

Viberg, O., et al. (2024). Exploring teachers' (future) digital assessment practices in higher education: Instrument and model development. British Journal of Educational Technology, 55(3). doi:10.1111/bjet.13462

Yin, R. K. (2018). Case study research and applications: Design and methods (6ta ed.). SAGE Publications.

Zapata Ancajima, W. (2023). La investigación científica o tecnológica y la innovación en los Institutos Superiores Tecnológicos: un debate conceptual. Revista Cubana de Educación Superior, 42(4). Recuperado de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1990-86442023000400021

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 7 (2026) P. 63-71

ISSN: 2992-7315

Análisis comparativo de algoritmos de árboles de decisión para la predicción de tratamientos en lesiones óseas de muñeca
Comparative Analysis of Decision Tree Algorithms for Treatment Prediction in Wrist Bone Injuries

Edgar Corona Organiche[a], Brandon Moya Bucio[b], Abraham Jorge Jiménez Alfaro[c], Griselda Cortés Griselda[d], Norma Karen Valencia Vázquez[e]

[a ,c, d]*Laboratorio Nacional CONAHCYT en Inteligencia Artificial y Ciencia de Datos (LNC-IACD)-ISC, Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec, 55210, Ecatepec de Morelos, Estado de México, México.*
[b]*Secretaria Anticorrupcion y Buen Gobierno, Av. de los Insurgentes Sur 1735, Col. Guadalupe Inn, Alcaldía Álvaro Obregón, C.P. 01020, Ciudad de México.*
[e]*Tecnológico Nacional de México, Tecnológico de Estudios Superiores de Chimalhuacán, C. Ópalo 18, Sta Maria Nativitas, 56335 Chimalhuacán, Méx.*

Resumen

Las lesiones óseas de muñeca, en particular las fracturas de radio distal y las artralgias asociadas a trauma, generan alta demanda asistencial y requieren decisiones terapéuticas oportunas. Este estudio adapta y fortalece un modelo comparativo de árboles de decisión para recomendar tratamientos en pacientes adultos con lesiones de muñeca, empleando registros clínicos retrospectivos de 3,360 pacientes atendidos entre 2023 y 2024. La metodología integra el proceso KDD, depuración de expedientes, codificación de variables clínicas, validación cruzada y evaluación con matrices de confusión, métricas de clasificación y curvas ROC. Se compararon los algoritmos ID3 y C4.5/J48 por su interpretabilidad y su utilidad para sistemas de apoyo a la decisión clínica. Los resultados muestran desempeño superior de C4.5, con precisión de 92.50%, tasa de error de 7.50%, F1-score de 91.36% y AUC-ROC de 0.94, frente a 70.00%, 30.00%, 68.29% y 0.88 obtenidos por ID3. El árbol C4.5 identificó la gravedad de la lesión como nodo raíz, seguido por tipo de molestia y edad, generando reglas clínicas comprensibles para recomendar reposo, fisioterapia, medicamentos o cirugía. Se concluye que C4.5 constituye una alternativa robusta e interpretable para apoyar la recomendación terapéutica personalizada.

Palabras clave: minería de datos, árboles de decisión, C4.5, ID3, lesiones de muñeca, sistemas de apoyo a la decisión clínica

Abstract

Wrist bone injuries, particularly distal radius fractures and trauma-associated arthralgias, generate high care demand and require timely therapeutic decisions. This study adapts and strengthens a comparative model of decision trees to recommend treatments in adult patients with wrist injuries, using retrospective clinical records of 3,360 patients treated between 2023 and 2024. The methodology integrates the KDD process, record cleaning, coding of clinical variables, cross-validation, and evaluation with confusion matrices, classification metrics, and ROC curves. ID3 and C4.5/J48 algorithms were compared for their interpretability and usefulness for clinical decision support systems. Results show superior performance of C4.5, with accuracy of 92.50%, error rate of 7.50%, F1-score of 91.36%, and AUC-ROC of 0.94, versus 70.00%, 30.00%, 68.29%, and 0.88 obtained by ID3. The C4.5 tree identified injury severity as the root node, followed by type of complaint and age, generating comprehensible clinical rules to recommend rest, physiotherapy, medication, or surgery. It is concluded that C4.5 constitutes a robust and interpretable alternative to support personalized therapeutic recommendation.

Keywords: data mining, decision trees, C4.5, ID3, wrist injuries, clinical decision support systems

*Autor para la correspondencia: josejuan@dominio1.edu.mx
Correo electrónico: josejuan@dominio1.edu.mx (José-Juan Sotelo-Ibarra), gabysanchez@dominio2.edu.mx (Gabriela Sánchez-Manríquez), Esta área se llena cuando el manuscrito se aceptado con los nombres completos y correos de todos los autores.

Historial del manuscrito: recibido el DD/MM/AAAA, última versión-revisada recibida el DD/MM/AAAA, aceptado el DD/MM/AAAA, en línea (postprint) desde el DD/MM/AAAA, publicado el DD/MM/AAAA. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.23929595

1. Introducción

Las lesiones óseas de muñeca, en particular las fracturas de radio distal y las artralgias asociadas a trauma, representan una de las causas más frecuentes de consulta en servicios de urgencias y ortopedia a nivel mundial (Arroyo-Berezowsky et al., 2021; Nellans et al., 2012). Estas lesiones generan una alta demanda asistencial y requieren decisiones terapéuticas oportunas que consideren variables como el mecanismo de lesión, comorbilidades y contexto de atención (Arroyo-Berezowsky et al., 2021; Nellans et al., 2012).

La selección del tratamiento suele apoyarse en la valoración médica, estudios auxiliares, estabilidad de la lesión, dolor, funcionalidad y presencia de factores de riesgo. No obstante, la variabilidad clínica puede generar diferencias en la recomendación terapéutica cuando no existe un soporte cuantitativo sistematizado. En esta línea, los modelos predictivos permiten integrar datos históricos y variables clínicas para producir estimaciones reproducibles que apoyen la toma de decisiones, sin desplazar el juicio profesional ni los protocolos institucionales (Collins et al., 2015; Steyerberg, 2019).

1.2. Planteamiento del problema

A pesar de los avances en informática médica y sistemas de apoyo a la decisión clínica, persiste una brecha significativa en la implementación de modelos predictivos interpretables que asistan la selección de tratamientos para lesiones óseas de muñeca en entornos clínicos reales. Los sistemas existentes tienden a priorizar la exactitud estadística sobre la interpretabilidad, lo que dificulta su adopción por parte del personal médico, quien requiere comprender la lógica subyacente a cada recomendación para validarla contra su conocimiento clínico y los hallazgos de la exploración física (Caruana et al., 2015; Rajkomar et al., 2019).

Adicionalmente, la literatura reporta que los algoritmos de árboles de decisión como ID3 y C4.5 presentan diferencias sustanciales en su desempeño cuando se aplican a datos clínicos mixtos, con variables continuas y categóricas, como los que caracterizan a las lesiones de muñeca. Sin embargo, no existe consenso sobre cuál algoritmo ofrece el mejor equilibrio entre precisión predictiva, estabilidad y utilidad clínica para esta aplicación específica (Batra & Agrawal, 2018; Quinlan, 1993; Witten et al., 2016). Esta falta de evidencia comparativa limita la capacidad de las instituciones de salud para seleccionar la herramienta más adecuada para sus sistemas de apoyo a la decisión.

1.3. Pregunta de investigación

¿Cuál de los algoritmos de árboles de decisión, ID3 o C4.5, ofrece un mejor desempeño en términos de precisión, estabilidad e interpretabilidad para predecir tratamientos en pacientes adultos con lesiones óseas de muñeca, y qué reglas clínicas comprensibles puede derivarse de dicho modelo?

1.4. Justificación

La relevancia de este estudio radica en tres aspectos fundamentales. Primero, la creciente demanda de sistemas de apoyo a la decisión clínica que sean precisos y a la vez transparentes para el personal médico. Segundo, la necesidad de aprovechar los registros clínicos digitales disponibles en instituciones de salud para generar conocimiento útil que mejore la estandarización de decisiones terapéuticas. Tercero, la oportunidad de contribuir a la literatura sobre la comparación de algoritmos de árboles de decisión en aplicaciones clínicas específicas, donde las diferencias en el desempeño pueden tener implicaciones directas en la calidad de la atención.

La minería de datos y el aprendizaje automático han adquirido relevancia en informática médica porque transforman registros clínicos en patrones útiles para predicción, clasificación y estratificación de riesgo (Fayyad et al., 1996; Sidey-Gibbons & Sidey-Gibbons, 2019). Dentro de estas técnicas, los árboles de decisión destacan por su interpretabilidad: cada predicción se puede explicar mediante rutas, nodos y reglas que conectan variables clínicas con una salida terapéutica. Esta transparencia es especialmente valiosa en salud, donde la confianza del usuario y la auditabilidad del modelo resultan tan importantes como la exactitud estadística (Caruana et al., 2015; Quinlan, 1986).

1.5. Objetivo

El objetivo de este estudio es adaptar y robustecer un análisis comparativo de ID3 y C4.5 para la predicción de tratamientos en lesiones óseas de muñeca.

2. Materiales y Método

2.2. Diseño del estudio y fuente de datos

El estudio se planteó como un análisis retrospectivo de minería de datos, orientado a construir y evaluar modelos de clasificación para recomendar tratamientos en pacientes adultos con lesiones óseas o molestias de muñeca. La fuente de información correspondió a expedientes clínicos digitales de la Clínica Integral Universitaria, con registros comprendidos entre 2023 y 2024.

La población analizada incluyó 3,360 pacientes de 27 a 59 años con diagnóstico de artralgias o fracturas de muñeca. El criterio de inclusión fue la disponibilidad de las variables clínicas mínimas requeridas para el modelado. Los registros con más del 5% de valores faltantes en variables predictoras clave se excluyeron para preservar consistencia y reducir sesgos en la fase de entrenamiento.

2.3. Variables del modelo

La variable objetivo fue el tratamiento recomendado, representado por cuatro clases: reposo, fisioterapia,

medicamentos antiinflamatorios no esteroideos (AINEs) y cirugía. Las variables predictoras integraron características demográficas, clínicas y de valoración médica:

• X1: edad del paciente, variable numérica continua dentro del intervalo 27-59 años.

• X2: género, variable categórica registrada como masculino o femenino.

• X3: enfermedad crónica degenerativa, variable categórica que permite identificar comorbilidades relevantes.

• X4: tipo de molestia, variable categórica asociada con presentación aguda o crónica.

• X5: gravedad de la lesión, variable numérica en escala 0-10.

• X6: método de valoración, variable categórica que resume el mecanismo clínico de evaluación.

• X7: estudios auxiliares, variable categórica vinculada con radiografía, ultrasonido u otros estudios disponibles.

La incorporación conjunta de variables clínicas y demográficas permite que el árbol construya rutas de decisión comprensibles. Este aspecto es fundamental en aplicaciones médicas, donde la explicabilidad facilita la revisión clínica de las reglas y la detección de recomendaciones potencialmente inconsistentes (Caruana et al., 2015; Rajkomar et al., 2019).

2.4. Proceso KDD y preprocesamiento

El flujo metodológico siguió el proceso KDD, que organiza el descubrimiento de conocimiento en selección, preprocesamiento, transformación, minería de datos e interpretación de resultados (Fayyad et al., 1996). En la selección se integraron expedientes con información suficiente; en el preprocesamiento se revisó completitud, coherencia de categorías y consistencia de rangos; y en la transformación se codificaron variables categóricas mediante representaciones binarias o discretas compatibles con los algoritmos implementados.

Para las variables numéricas se revisaron valores extremos mediante el rango intercuartílico. En lugar de eliminar todos los posibles valores atípicos, se aplicó una estrategia conservadora de winsorización cuando el registro era clínicamente plausible, con el fin de reducir el impacto de extremos sin perder información. Finalmente, el conjunto se aleatorizó y dividió de forma estratificada en entrenamiento y prueba, manteniendo la proporción de la variable objetivo en ambos subconjuntos. El conjunto total de 3,360 pacientes se dividió en 80% para entrenamiento (2,688 casos) y 20% para prueba (672 casos). Las métricas reportadas se calculan sobre el conjunto de datos para prueba, es decir, sobre los 672 casos.

2.5. Algoritmos evaluados

ID3 construye el árbol seleccionando en cada nodo el atributo que maximiza la ganancia de información. Su principal ventaja es la simplicidad, pero presenta limitaciones ante atributos continuos y atributos con muchos valores, ya que puede favorecer particiones altamente específicas. C4.5 corrige parte de este sesgo mediante la ratio de ganancia y añade procedimientos de poda, lo cual reduce el riesgo de sobreajuste y mejora la capacidad de generalización (Quinlan, 1993; Batra & Agrawal, 2017).

La implementación experimental se realizó con Weka, particularmente mediante J48 para C4.5, y se complementó con un prototipo web en ReactJS orientado a capturar datos clínicos y entregar una recomendación terapéutica en tiempo real. Weka es una plataforma ampliamente utilizada para experimentación reproducible en minería de datos y aprendizaje automático (Hall et al., 2009; Witten et al., 2016), véase figura 1.

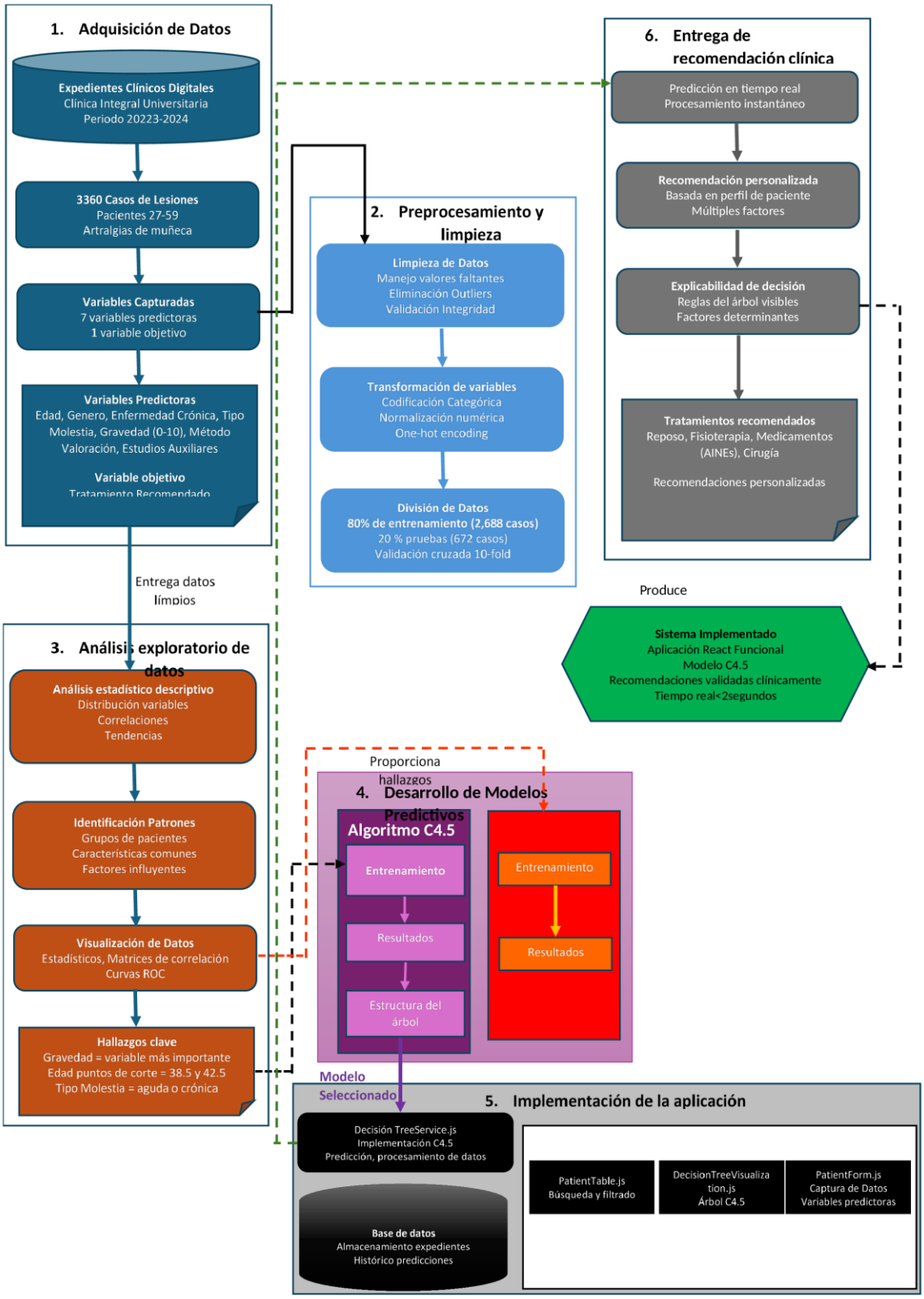


Figura 1. Arquitectura computacional del sistema de predicción: adquisición de datos, limpieza, análisis exploratorio, entrenamiento de modelos, implementación web y recomendación clínica.

2.6. Métricas de evaluación

Los modelos se evaluaron con matrices de confusión, precisión global, tasa de error, sensibilidad, especificidad, F1-score y área bajo la curva ROC. La matriz de confusión permite identificar qué clases se confunden y evaluar la importancia clínica del error. La curva ROC y el AUC resumen la capacidad discriminativa del modelo en distintos umbrales de decisión, por lo que son útiles para comparar clasificadores en escenarios médicos y multiclase (Fawcett, 2006; Powers, 2011).

Además de las métricas, se revisó la interpretabilidad de las rutas del árbol. En modelos clínicos, un resultado estadísticamente alto no es suficiente si la regla no se puede explicar, auditar o contrastar con el conocimiento médico; por ello, la selección del modelo final consideró desempeño, sencillez estructural y congruencia clínica (Collins et al., 2015; Steyerberg, 2019).

3. Resultados

La comparación entre ID3 y C4.5 evidenció diferencias relevantes en la clasificación de tratamientos. El algoritmo C4.5 alcanzó mejor desempeño global y mostró errores clínicamente menos críticos, concentrados principalmente entre tratamientos conservadores. ID3, aunque mantuvo un desempeño aceptable, presentó mayor número de confusiones y menor estabilidad entre clases, véase figura 2a y 2b, tablas 1, 1a,1b,

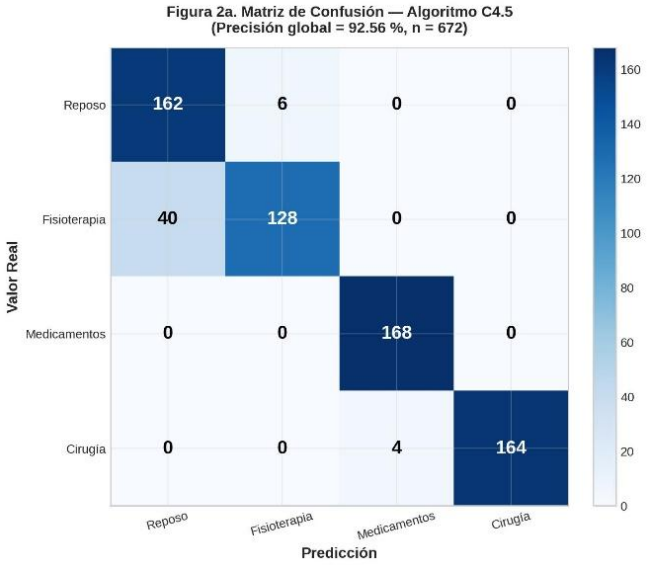


Figura 2a. Matriz de confusión del algoritmo C4.5, con precisión global reportada de 92.56%.

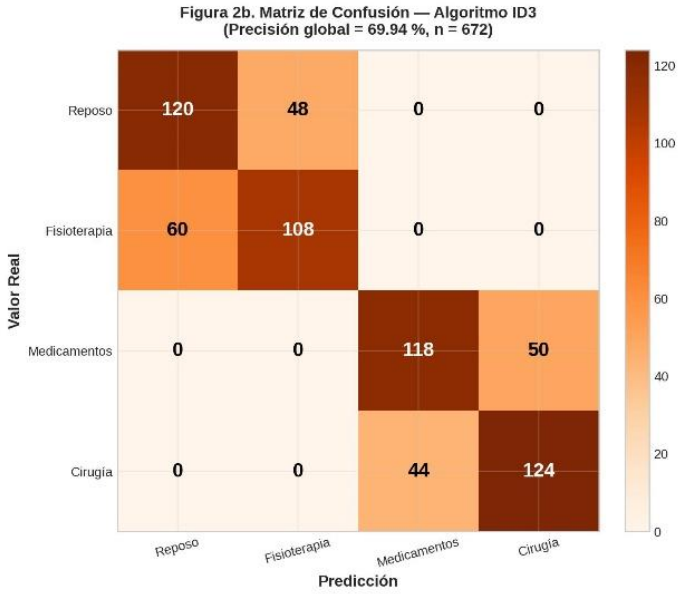


Figura 2b. Matriz de confusión del algoritmo ID3, con precisión global reportada de 69.94%.

La tabla 1, resume los resultados que se presentan en ambas matrices de confusión, permitiendo contrastar y evaluar el desempeño de ambos algoritmos.

Tabla 1. Comparación del desempeño de los algoritmos C4.5 e ID3

Valor Real /	Reposo		Fisioterapia		Medicamentos		Cirugía	
Predicción	C4.5	ID3	C4.5	ID3	C4.5	ID3	C4.5	ID3
Reposo	162	120	6	48	0	0	0	0
Fisioterapia	40	60	128	108	0	0	0	0
Medicamentos	0	0	0	0	168	118	0	50
Cirugía	0	0	0	0	4	44	164	124

La tabla 2, muestra el rendimiento de ambos modelos en las diferentes métricas. En ella se observa que el algoritmo C4.5 superó consistentemente a ID3 en todas las métricas evaluadas. La curva ROC para C4.5 se ubicó más cerca de la esquina superior izquierda, indicando una mayor capacidad para discriminar entre las diferentes clases de tratamiento.

Tabla 2. Comparación del Rendimiento de los Modelos ID3 y C4.5

Métrica	Algoritmo ID3	Algoritmo C4.5
Precisión (Accuracy)	70.00%	92.50%
Tasa de error	30.00%	7.50%
AUC-ROC	0.88	0.94
F1-score	68.29%	91.36%
Sensibilidad (Recall)	69.94%	92.56%
Especificidad	89.98%	97.52%

El análisis de las curvas ROC proporciona una evaluación integral de la capacidad discriminativa de ambos algoritmos a través de todos los umbrales de clasificación posibles. Como se muestra en la Figura 3, presenta las curvas ROC a) para los algoritmos C4.5 e b) ID3 de manera comparativa, permitiendo

visualizar su desempeño en la clasificación multiclase de tratamientos.

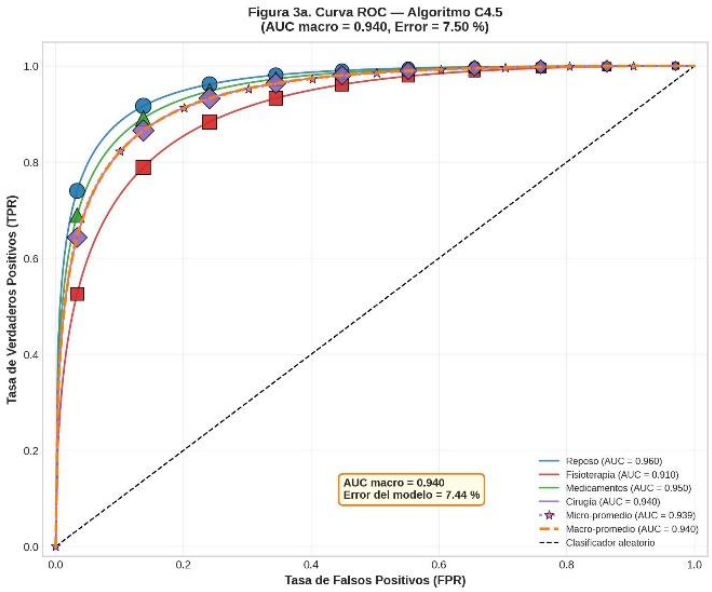


Figura 3a. Curva ROC del algoritmo C4.5, AUC macro = 0.940.

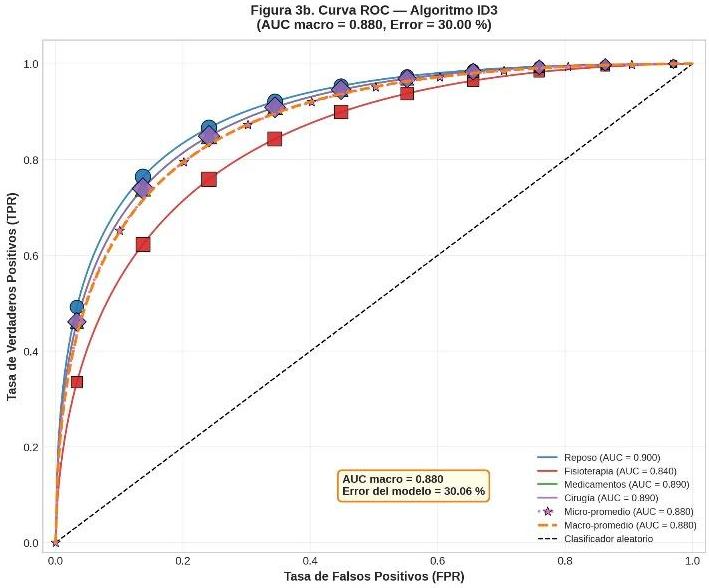


Figura 3b. Curva ROC del algoritmo ID3, AUC macro = 0.880.

Finalmente el árbol de decisión C4.5 simplificado obtenido a partir de las reglas clínicas del modelo, ver figura 4.

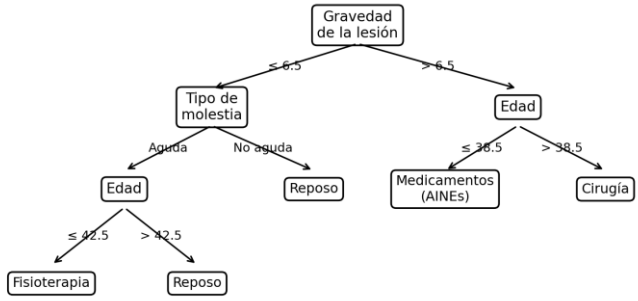


Figura 4. Árbol de decisión C4.5 simplificado obtenido a partir de las reglas clínicas del modelo.

3.2. Interpretación de matrices de confusión

La matriz de C4.5 muestra una clasificación casi perfecta en las clases medicamentos y cirugía, aspecto clínicamente relevante porque confundir una intervención farmacológica con una quirúrgica puede producir subtratamiento o sobretratamiento. Los errores observados se concentran en la relación reposo-fisioterapia, es decir, en alternativas conservadoras con menor riesgo relativo, lo que sugiere un patrón de error clínicamente tolerable bajo supervisión médica.

En ID3, las confusiones se distribuyen de forma más amplia. La presencia de errores entre medicamentos y cirugía indica menor capacidad para separar escenarios de mayor gravedad. Esta diferencia se explica por la estructura del algoritmo: ID3 selecciona atributos por ganancia de información, mientras que C4.5 utiliza ratio de ganancia y puntos de corte para variables continuas, reduciendo sesgos y mejorando la representación de umbrales clínicos (Quinlan, 1993; Witten et al., 2016).

3.3. Análisis ROC y desempeño comparativo

El AUC macro de C4.5 fue 0.94, superior al 0.88 de ID3. Esta diferencia de 0.06 puntos es importante porque resume una mejor discriminación entre clases terapéuticas. Una curva más próxima a la esquina superior izquierda implica mayor tasa de verdaderos positivos con baja tasa de falsos positivos, condición deseable en sistemas de apoyo a la decisión clínica (Fawcett, 2006).

El F1-score de C4.5 (93.82%) también confirma el balance entre precisión y sensibilidad. En problemas clínicos multiclase, esta métrica es útil porque penaliza simultáneamente falsos positivos y falsos negativos, evitando interpretar como robusto un modelo que solo acierta por predominio de una clase. La superioridad simultánea de precisión, F1-score, recall, especificidad y AUC respalda la selección de C4.5 como modelo preferente.

3.4. Modelo matemático del árbol C4.5

El árbol C4.5 se construyó con base en teoría de la información. Sea S el conjunto de entrenamiento, m el número de clases terapéuticas y p_i la proporción de instancias pertenecientes a la clase i. La entropía mide la incertidumbre del conjunto:

$$Entropía\ (S) = -\sum_{i=1}^{m} p_i \log_2 p_i \qquad (1)$$

En la ecuación (1), H(S) representa la impureza del conjunto; p_i es la frecuencia relativa de la clase i; y m = 4 corresponde a reposo, fisioterapia, medicamentos y cirugía. Si todas las instancias pertenecen a una sola clase, la entropía tiende a cero; si las clases están equilibradas, la incertidumbre aumenta.

Para cada atributo A, la ganancia de información compara la entropía original con la entropía ponderada de los subconjuntos generados al dividir por los valores del atributo:

$$Ganancia\ (S,A) = Entropía\ (S) - \sum_{v \epsilon Valores(A)} \frac{|S_v|}{|S|} Entropía\ (S_v) \qquad (2)$$

En la ecuación (2), Values(A) es el conjunto de valores posibles del atributo A; S_v es el subconjunto de registros cuyo atributo A toma el valor v; |S_v| es el número de registros de dicho subconjunto; y |S| es el total de registros. La ganancia aumenta cuando una partición reduce la mezcla de clases.

C4.5 evita favorecer atributos con muchos valores mediante el cálculo de la información de partición:

$$SplitInfo(S,A) = -\sum_{v \epsilon Valores(A)} \frac{|S_v|}{|S|} \log_2 \frac{|S_v|}{|S|} \qquad (3)$$

En la ecuación (3), SplitInfo(S,A) mide qué tan dispersa queda la partición producida por A. Cuando un atributo genera demasiadas divisiones pequeñas, este término aumenta y modera la selección del atributo. La ratio de ganancia se define como:

$$Ratio_{Ganancia}(S,A) = \frac{Ganancia\ (S,A)}{SplitInfo(S,A)} \qquad (4)$$

En la ecuación (4), C4.5 selecciona el atributo con mayor GainRatio, siempre que la partición sea informativa. Esta operación explica por qué la gravedad de la lesión aparece como nodo raíz: reduce de manera significativa la incertidumbre sobre el tratamiento recomendado. Para atributos numéricos como edad y gravedad, C4.5 evalúa puntos de corte candidatos θ y selecciona el umbral que maximiza la ratio de ganancia:

$$\theta^* = \arg\max_\{\theta \in T_A\}\ \text{GainRatio}(S, A \leq \theta) \qquad (5)$$

En la ecuación (5), T_A representa el conjunto de umbrales candidatos para el atributo numérico A. El resultado del modelo identificó umbrales clínicamente interpretables, como gravedad ≤ 6.5, edad ≤ 42.5 y edad ≤ 38.5.

3.5. Métricas de evaluación

A partir de la matriz de confusión, se calcularon las métricas estándar de rendimiento. Si TP representa verdaderos positivos, TN verdaderos negativos, FP falsos positivos y FN falsos negativos, la precisión global se expresa como:

$$\text{Accuracy} = (TP + TN) / (TP + TN + FP + FN) \qquad (6)$$

La precisión por clase indica la proporción de predicciones positivas que fueron correctas:

$$\text{Precision} = TP / (TP + FP) \qquad (7)$$

La sensibilidad o recall mide la capacidad del modelo para detectar correctamente los casos reales de una clase:

$$\text{Recall} = TP / (TP + FN) \qquad (8)$$

La especificidad resume la capacidad de excluir correctamente los casos que no pertenecen a una clase:

$$\text{Especificidad} = TN / (TN + FP) \qquad (9)$$

El F1-score integra precisión y sensibilidad en una media armónica, útil cuando se busca equilibrio entre falsos positivos y falsos negativos:

$$F1 = 2 \cdot (\text{Precision} \cdot \text{Recall}) / (\text{Precision} + \text{Recall}) \qquad (10)$$

Para el análisis ROC se calcularon la tasa de verdaderos positivos y la tasa de falsos positivos:

$$TPR = TP / (TP + FN), \quad FPR = FP / (FP + TN) \qquad (11)$$

El AUC se obtiene como el área bajo la curva TPR-FPR; valores cercanos a 1 indican alta capacidad discriminativa. En este estudio, C4.5 obtuvo mejor AUC que ID3, por lo que separó con mayor consistencia las clases terapéuticas.

3.6. Reglas clínicas derivadas del árbol

El árbol de decisión C4.5 produjo reglas compactas y clínicamente interpretables. En forma lógica, la recomendación puede expresarse como:

$$\text{Fisioterapia} \Leftarrow (\text{Gravedad} \leq 6.5) \wedge (\text{Molestia} = \text{Aguda}) \wedge (\text{Edad} \leq 42.5) \qquad (12)$$

$$\text{Reposo} \Leftarrow (\text{Gravedad} \leq 6.5) \wedge [(\text{Molestia} \neq \text{Aguda}) \vee (\text{Edad} > 42.5)] \qquad (13)$$

$$\text{Medicamentos} \Leftarrow (\text{Gravedad} > 6.5) \wedge (\text{Edad} \leq 38.5) \quad (14)$$

$$\text{Cirugía} \Leftarrow (\text{Gravedad} > 6.5) \wedge (\text{Edad} > 38.5) \quad (15)$$

Las ecuaciones (12)-(15) muestran cómo se traduce el árbol en reglas de decisión. La variable gravedad opera como criterio inicial de separación entre lesiones de baja/moderada y alta severidad. En lesiones de baja gravedad, el tipo de molestia y la edad orientan hacia fisioterapia o reposo; en lesiones de alta gravedad, la edad ajusta la recomendación entre manejo farmacológico y cirugía. Estas reglas no sustituyen la valoración clínica, pero permiten transparentar la lógica del sistema y documentar por qué se emite una recomendación determinada.

3.7. Validación del modelo

La validación cruzada de 10 pliegues estima el rendimiento medio al entrenar y evaluar el modelo en particiones alternadas del conjunto de datos. Si Acc_k es la precisión obtenida en el pliegue k, el rendimiento promedio se define como:

$$Accurancy_{CV} = \frac{1}{10}\sum_{k=1}^{10} Accurancy_k \quad (16)$$

La ecuación (16) reduce la dependencia de una sola división entrenamiento-prueba y proporciona una estimación más estable. Aun así, para un uso clínico real se requiere validación externa con datos de otras instituciones y evaluación prospectiva, de acuerdo con recomendaciones de reporte y validación de modelos predictivos clínicos (Collins et al., 2015; Steyerberg, 2019), véase figura 5 y figura 6.

Registros del Modelo Predictivo

Total de registros entre 27 y 59 años: **3360**

Tratamiento	idregistro	Edad	Género	Familiar	Tipo de Enfermedad crónica degenerativa	Observación	Dieta	Vacunación
Generar Tratamiento	1	49	Masculino	Madre	Diabetes	Controlado	Vegetariana	Influenza, He
Generar Tratamiento	3	30	Masculino	Hermano	Ninguna	-	Alta en grasa	COVID-19, H
Generar Tratamiento	5	41	Masculino	Hermano	Asma	Controlado	Vegetariana	Tétanos, COV
Generar Tratamiento	6	39	Masculino	Padre	Diabetes	Controlado	Vegetariana	COVID-19, H
Generar Tratamiento	7	27	Femenino	Hermano	Hipertensión	Controlado	Baja en carbohidratos	Hepatitis B, Ir
Generar Tratamiento	8	54	Masculino	Hermano	Diabetes	Controlado	Omnívora	Tétanos, COV
Generar Tratamiento	10	35	Masculino	Ninguno	Asma	Controlado	Vegetariana	Influenza, CC
Generar Tratamiento	11	54	Femenino	Madre	Asma	Controlado	Vegetariana	Tétanos, Hep
Generar Tratamiento	12	30	Masculino	Padre	Asma	Controlado	Omnívora	Hepatitis B, C
Generar Tratamiento	13	27	Masculino	Hermano	Hipertensión	Controlado	Baja en carbohidratos	Hepatitis B, C
Generar Tratamiento	16	54	Femenino	Madre	Ninguna	-	Alta en grasa	Tétanos, COV
Generar Tratamiento	17	31	Masculino	Ninguno	Hipertensión	Controlado	Baja en carbohidratos	Influenza, He
Generar Tratamiento	18	41	Masculino	Hermano	Hipertensión	Controlado	Vegetariana	Influenza, He
Generar Tratamiento	19	56	Masculino	Padre	Ninguna	-	Alta en grasa	Tétanos, Influ

Figura 5. Prototipo web en ReactJS para consulta de registros y generación de recomendaciones.



Figura 6. Salida del sistema con tratamiento sugerido y recomendaciones complementarias.

4. Discusión

Los resultados demuestran que C4.5 supera a ID3 en la predicción de tratamientos para lesiones de muñeca. La diferencia no se limita a métricas globales: también se observa en la naturaleza de los errores. Mientras C4.5 concentra sus confusiones en alternativas conservadoras, ID3 produce confusiones más sensibles entre medicamentos y cirugía. Esta distinción es relevante porque los errores no tienen el mismo peso clínico; confundir reposo y fisioterapia puede corregirse con seguimiento, pero confundir cirugía y tratamiento farmacológico puede modificar de manera sustancial el curso terapéutico.

La selección de la gravedad como nodo raíz es congruente con el razonamiento clínico: la severidad de una lesión ósea condiciona la urgencia, el nivel de intervención y la necesidad de estudios complementarios. La edad y el tipo de molestia funcionan como moduladores de la recomendación, lo que permite generar rutas sencillas y comprensibles. Esta estructura favorece la adopción del modelo porque el profesional puede verificar si la regla es coherente con la exploración física y los hallazgos auxiliares.

La superioridad de C4.5 puede explicarse por tres razones técnicas. Primero, el algoritmo maneja variables continuas mediante umbrales, lo que se adapta mejor a variables como edad y gravedad. Segundo, la ratio de ganancia reduce el sesgo hacia atributos con muchos valores. Tercero, la poda disminuye la complejidad del árbol y favorece la generalización. Estas propiedades coinciden con la literatura que describe a C4.5/J48 como una extensión más robusta que ID3 para datos mixtos y problemas aplicados (Quinlan, 1993; Witten et al., 2016).

Desde el punto de vista de implementación, el prototipo web facilita la interacción entre el modelo y el usuario clínico: el médico puede introducir variables del paciente y obtener una recomendación inmediata con una explicación basada en reglas. No obstante, el sistema debe considerarse una herramienta de apoyo. La decisión final requiere historia clínica, exploración física, estudios de imagen, preferencias del paciente, contraindicaciones y disponibilidad institucional.

La principal limitación del estudio es su carácter retrospectivo y unicéntrico. Aunque el tamaño de la base de datos es suficiente para un análisis comparativo inicial, la validación externa es indispensable para confirmar generalización. También se recomienda evaluar calibración, análisis de subgrupos, estabilidad temporal del modelo y posibles sesgos por género, edad o comorbilidades. Una versión futura debería incorporar trazabilidad de datos, consentimiento y gobernanza clínica para su integración en sistemas hospitalarios.

5. Conclusiones

El desarrollo matemático explicita las fórmulas de entropía, ganancia, ratio de ganancia, selección de umbrales, métricas de clasificación, ROC/AUC, validación cruzada y reglas finales del árbol.

El algoritmo C4.5 mostró desempeño superior frente a ID3 en todas las métricas reportadas: precisión, tasa de error, AUC-ROC, F1-score, sensibilidad y especificidad. Además, produjo un árbol interpretable con reglas clínicas simples basadas en gravedad de la lesión, tipo de molestia y edad.

El modelo puede apoyar la recomendación terapéutica personalizada para lesiones de muñeca y contribuir a la estandarización de decisiones, pero su uso debe limitarse a un sistema de apoyo. Antes de su adopción clínica se recomienda validación externa, evaluación prospectiva, análisis de seguridad, revisión ética y supervisión por especialistas en ortopedia y rehabilitación.

En términos de transferencia tecnológica, el prototipo en ReactJS muestra una ruta viable para integrar modelos de aprendizaje automático en interfaces clínicas. Su valor principal reside en combinar exactitud predictiva con explicabilidad, permitiendo que la recomendación no sea una caja negra, sino una secuencia de criterios verificables por el profesional de salud.

6. Agradecimientos

Los autores expresan su agradecimiento a la Clínica Integral Universitaria por la colaboración en el desarrollo de la presente investigación, por las facilidades otorgadas para el acceso a la información necesaria y por su disposición para apoyar actividades de análisis.

Asimismo, se reconoce de manera especial al personal técnico y administrativo de la institución participante que contribuyó con la provisión, validación y contextualización de los datos utilizados en el estudio, cuya colaboración fue fundamental para la correcta comprensión de los procesos y para la interpretación de los resultados obtenidos.

Finalmente, los autores reconocen a todas las personas e instancias que, de manera directa o indirecta, participaron en el desarrollo de esta investigación, reiterando que el tratamiento de la información se realizó bajo principios de confidencialidad, ética y uso responsable de los datos.

7. Referencias

Arroyo-Berezowsky, C., Quintero-Fábregas, J., & García-López, A. (2021). Epidemiology of hand and wrist injuries treated in a reference specialty center over a year. Acta Ortopédica Mexicana, 35(5), 435-441.

Batra, M., & Agrawal, R. (2017). Comparative analysis of decision tree algorithms. En N. R. Shetty, L. C. Prasad, & N. H. Prasad (Eds.), Advances in Intelligent Systems and Computing (Vol. 517, pp. 31-36). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-3174-8_4

Breiman, L., Friedman, J. H., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (1984). Classification and regression trees. Wadsworth.

Bruder, A. M., Shields, N., Dodd, K. J., & Taylor, N. F. (2017). Prescribed exercise programs may not be effective in reducing impairments and improving activity during upper limb fracture rehabilitation: A systematic review. Journal of Physiotherapy, 63(4), 205-220. https://doi.org/10.1016/j.jphys.2017.08.009

Caruana, R., Lou, Y., Gehrke, J., Koch, P., Sturm, M., & Elhadad, N. (2015). Intelligible models for healthcare: Predicting pneumonia risk and hospital 30-day readmission. En Proceedings of the 21th ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (pp. 1721-1730). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/2783258.2788613

Collins, G. S., Reitsma, J. B., Altman, D. G., & Moons, K. G. M. (2015). Transparent reporting of a multivariable prediction model for individual prognosis or diagnosis (TRIPOD): The TRIPOD statement. Annals of Internal Medicine, 162(1), 55-63. https://doi.org/10.7326/M14-0697

Domínguez-Gasca, L. G., & Villaseñor, S. L. O. (2017). Frecuencia y tipos de fracturas clasificadas por la Asociación para el Estudio de la Osteosíntesis en el Hospital General de León durante un año. Acta Médica Grupo Ángeles, 15(4), 275-286.

Fawcett, T. (2006). An introduction to ROC analysis. Pattern Recognition Letters, 27(8), 861-874. https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010

Fayyad, U., Piatetsky-Shapiro, G., & Smyth, P. (1996). From data mining to knowledge discovery in databases. AI Magazine, 17(3), 37-54. https://doi.org/10.1609/aimag.v17i3.1230

González, C. E. M., Rodríguez, M. B., & Martínez, F. M. (2016). The wrist joint complex: Anatomical, physiological and biomechanical aspects, characteristics, classification, and treatment of distal radius fractures. Acta Ortopédica Mexicana, 30(3), 141-147.

Hall, M., Frank, E., Holmes, G., Pfahringer, B., Reutemann, P., & Witten, I. H. (2009). The WEKA data mining software: An update. ACM SIGKDD Explorations Newsletter, 11(1), 10-18. https://doi.org/10.1145/1656274.1656278

Han, J., Kamber, M., & Pei, J. (2012). Data mining: Concepts and techniques (3.ª ed.). Morgan Kaufmann.

Lira, F. G. (2011). Aspectos epidemiológicos y mecanismos de lesión. Revista de Ortopedia y Traumatología, 55(1), 13-20.

Lundberg, S. M., & Lee, S. I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions. En Advances in Neural Information Processing Systems, 30, 4765-4774.

Nellans, K. W., Kowalski, E., & Chung, K. C. (2012). The epidemiology of distal radius fractures. Hand Clinics, 28(2), 113-125. https://doi.org/10.1016/j.hcl.2012.02.001

Powers, D. M. W. (2011). Evaluation: From precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. Journal of Machine Learning Technologies, 2(1), 37-63.

Quinlan, J. R. (1986). Induction of decision trees. Machine Learning, 1, 81-106. https://doi.org/10.1007/BF00116251

Quinlan, J. R. (1993). C4.5: Programs for machine learning. Morgan Kaufmann.

Rajkomar, A., Dean, J., & Kohane, I. (2019). Machine learning in medicine. The New England Journal of Medicine, 380(14), 1347-1358. https://doi.org/10.1056/NEJMra1814259

Sidey-Gibbons, J. A. M., & Sidey-Gibbons, C. J. (2019). Machine learning in medicine: A practical introduction. BMC Medical Research Methodology, 19, 64. https://doi.org/10.1186/s12874-019-0681-4

Steyerberg, E. W. (2019). Clinical prediction models: A practical approach to development, validation, and updating (2.ª ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-16399-0

Witten, I. H., Frank, E., Hall, M. A., & Pal, C. J. (2016). Data mining: Practical machine learning tools and techniques (4.ª ed.). Morgan Kaufmann.

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 72 – 76

ISSN: 2992-7315

Caracterización inicial del agua recogida por el sistema de Cosecha de lluvia del CETIS 119 T.M.

Initial characterization of the water collected by the rainwater harvesting system at CETIS 119 (morning shift).

Héctor Arteaga Hernández [1], *Gelsys Moraima Hernández García* [1], *Víctor Hugo Martínez Flores* [2], *Javier Norberto Gutiérrez Villegas* [2], *Luis Antonio Méndez Sánchez* [2]

[1] *Área de Ciencias Naturales y Experimentales, cetis119-DGETI, México*
[2] *Departamento Académico de Programación, cetis119-DGETI, México*

Resumen

La industria Mexicana de Coca-Cola impulsa la iniciativa “Escuelas con agua”, un programa que instala sistema de captación de lluvia en planteles públicos, el agua pluvial se filtra y se utiliza para lavamanos, sanitarios y limpieza, con ello se evita la compra de pipas de agua, lo que generaría un ahorro económico significativo para las escuelas. Escuelas de lluvia es un programa creado por Isla Urbana (desde 2018) que instala sistemas de captación pluvial en escuelas con escasez de agua, principalmente en México. Beneficia a las escuelas al captar y potabilizar agua de lluvia para uso escolar, los componentes del sistema incluyen separadores de primeras lluvias, filtro de hojas, reductores de turbulencia, dosificadores de cloro y trenes de filtración. El Centro de Estudios Tecnológicos Industriales y de Servicios, cuenta con un sistema de captación de agua pluvial en el edificio B donde se da atención a alumnos del sistema escolarizado y CAED, este tipo de sistema recolecta agua pluvial el cual se almacena en dos contenedores (cisterna) con una capacidad cada uno de 5000 litros. Beneficiando a: 1430 alumnos, 54 Docentes y 48 administrativos todos estos de ambos turnos. Este trabajo tiene como objetivo diseñar un prototipo para el tratamiento más adecuado para que el agua de lluvia recolectada en El Centro de Estudios Tecnológicos Industriales y de Servicios sea apta para el consumo humano. Así mismo el sistema de Cosecha de lluvia está ayudando a resolver la problemática planteada, pero ¿qué metodologías y técnicas se pueden implementar en una segunda etapa para poder purificar el agua cosechada y sea apta para consumo humano?

Palabras clave: Agua pluvial, Potabilización del agua pluvial, pH.

Abstract

The Mexican Coca-Cola industry is promoting the "Schools with Water" initiative, a program that installs rainwater harvesting systems in public schools. The rainwater is filtered and used for handwashing, toilets, and cleaning, thus eliminating the need to purchase water from trucks. By avoiding these purchases, schools will achieve significant cost savings. Rainwater Schools is a program created by Isla Urbana (since 2018) that installs rainwater harvesting systems in schools with water scarcity, primarily in Mexico. It benefits schools by capturing and purifying rainwater for school use. The system components include first-flush diverters, leaf filters, turbulence reducers, chlorine dispensers, and filtration systems. The Center for Technological, Industrial, and Service Studies has a rainwater harvesting system in Building B, which serves students in both the regular school program and the CAED (Center for Distance Education). This system collects rainwater and stores it in two 5,000-liter cisterns. It benefits 1,430 students, 54 teachers, and 48 administrative staff, all from both shifts. This project aims to design a prototype for the most suitable treatment to make the collected rainwater safe for human consumption at the Center for Technological, Industrial, and Service Studies . While the rainwater harvesting system is already helping to address the problem, what methodologies and techniques can be implemented in a second phase to purify the harvested water and make it suitable for human consumption?

Keywords: Rainwater, Rainwater purification, pH.

*Autor para la correspondencia: ingearteagahdz@gmail.com
Correo electrónico: Gelsys Moraima Hernández García (gelsysmoraima.hernandez.ce119@dgeti.sems.gob.mx), Victor Hugo Martínez Flores (victorhugo.martinez.ce119@dgeti.sems.gob.mx), Javier Norberto Gutiérrez Villegas (javiernorberto.gutierrez.ce119@dgeti.sems.gob.mx), Luis Antonio Méndez Sánchez (luisantonio.mendez.ce119@dgeti.sems.gob.mx)

Historial del manuscrito: recibido el 15/06/2026, última versión-revisada recibida el 30/10/2026, aceptado el 31/10/2026, publicado el 10/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.24118658

CC BY NC ND

1. Introducción

En las instalaciones del Centro de Estudios Tecnológicos, Industrial y de Servicios No. 119 Gertrudis Bocanegra Lazo de la Vega, se encuentra instalado un sistema de recolección de agua pluvial desde finales del 2025, el cual es parte de un convenio entre la institución federal (DGETI) y la empresa privada de nombre Isla Urbana, misma que se dedica a asesorar, dar mantenimiento y nuevas propuestas a diversos sectores para el aprovechamiento de éste recurso natural propio de zonas con temporada regular de lluvia .

Este esfuerzo en conjunto ha permitido que desde el inicio de la temporada de lluvias 2026 en la zona oriente del estado de México, se ha podido recolectar y aprovechar el agua para diversas actividades generales en el plantel, tales como uso en sanitarios, aseo del plantel y riego de áreas verdes.

El propósito de éste proyecto fue caracterizar el agua que se recolectó durante los meses de junio a septiembre mediante el análisis de cinco parámetros fisicoquímicos a través del uso de potenciómetro, con la finalidad de conocer el tipo de lluvia que se recibe en el sistema, que tan segura es su manipulación por parte del personal de servicios generales sin un tratamiento previo, y proponer una metodología para sanear el agua y su posible potabilización.

Planteamiento del problema

La implementación de sistemas de captación de agua pluvial disminuye la dependencia de los mantos acuíferos locales, así mismo el uso de un sistema de filtración con materiales naturales (arena, grava y carbón activado) elimina eficazmente los contaminantes atmosféricos y sólidos suspendidos en el agua de lluvia, haciéndola segura para actividades de lavado, riego, inodoros, y con ello la unidad económica tendrá un ahorro económico al evitar la compra de pipas de agua.

Hipótesis

Hipótesis 1: ¿Es factible y sustentable implementar una metodología secundaria para la potabilización y purificación del agua de lluvia dentro del plantel?

Hipótesis 2: ¿Desarrollar un prototipo tecnológico para la potabilización y purificación del agua de lluvia dentro del plantel?

2. Materiales y Método

Descripción del Sistema de Captación de Agua de Lluvia

El sistema de captación de agua de lluvia usado en este estudio está localizado en el xxx, fue diseñado e instalado por Isla Urbana, un proyecto dedicado a promover la sustentabilidad del agua y la cosecha de agua de lluvia en México. El sistema (Figura 1) consiste en las siguientes

Características:

• A. Superficie de captación. Es una superficie que cubre del techo del edificio B. El techo mide aproximadamente 193.22 m2 y el agua es canalizada a través de un sistema de canales de acero galvanizado.

• B. Tubería. El agua es transportada a través de tubos de polipropileno.

• C. Separador de primeras aguas. Se utilizan dos unidades idénticas de primera descarga desarrolladas por Isla Urbana llamadas Tlaloques para desviar los 400 L iniciales de cada aguacero para lavar el techo antes de que se permita el ingreso de agua a la cisterna.

• D. Cisterna. La cisterna tiene una capacidad de 5,000 L. La entrada de la cisterna tiene instalado un dispositivo reductor de turbulencias que aminora la perturbación de las partículas sedimentadas en el fondo por el agua que entra.

• E. Filtro de malla de acero inoxidable. Las aperturas de la malla tienen un tamaño de 1 x 2 mm para eliminar hojas y partículas grandes.

• F. Manguera con pichancha flotante. Dentro de la cisterna el agua es extraída a través de una manguera conectada a una pichancha flotante, para extraer el agua que está a una profundidad aproximada de 25 cm por debajo de la superficie, evitando el fondo del tanque, donde sedimentos y otros contaminantes se establecen.

• G. Clorador. Dentro de la cisterna, un dispositivo flotante con capacidad para 1 tableta de 200g, es usado para dispensar el cloro en tabletas que contienen hipoclorito de calcio al 65%, el cual se agrega cada tres meses.

• H. Tren de filtrado. El tubo de salida de la cisterna pasa a través de un tren de filtrado que está formado por los siguientes elementos:

(i) Filtro de partículas de 90 μm.
(ii) Filtro con cuerpo de fibra de vidrio de 9” × 48” relleno con carbón activado granulado y
KDF (Kinetic Degradation Fluxion), una mezcla de cobre y zinc usado en purificadores de
agua.
(iii) Filtro de cartucho reemplazable de 20 "× 4" con un cartucho de bloque de carbón
comprimido de 10 μm.
(iv) Generador de ozono.

• I. Grifo.

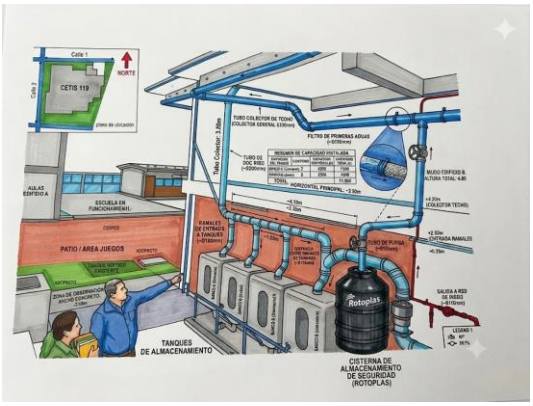


Figura 1 Sistema de captación de agua pluvial

Muestreo y Análisis

Muestreo del afluente

Se realizaron tomas de 250mL de agua tres veces al día durante el turno matutino, cinco días a la semana, totalizando 11,250mL de producto.

En cada toma se realizó el análisis de parámetros fisicoquímicos: pH, TDS, conductividad, salinidad y densidad específica mediante el uso del potenciómetro, el cual se calibró previo a la primera toma del día.

Tabulación de datos recabados

Se organizaron los datos obtenidos en una tabulación por día, semana, mes, incluyendo la toma de temperatura a la cual se realizaron los mismos.

Se calcularon medidas de tendencia central para los datos no agrupados, mediante las cuales se pudieron establecer análisis generales del comportamiento del sistema de recolección y del potenciómetro empleado.

Se determinaron cinco parámetros fisicoquímicos en las muestras de agua recolectada: pH, TDS (sólidos disueltos totales en ppm) EC (conductividad eléctrica en µS/cm) Salinidad (en % y ppm) y SG (densidad específica en gr/cm^3)

El instrumento fue calibrado con soluciones buffer estándar cada dos mediciones, permitiendo además que se estabilizara la temperatura de medición durante al menos cinco minutos para asegurar lecturas confiables.

En la tabla 1 y tabla 2 se muestra una comparativa de las mediciones del agua local, así mismo 4 marcas comerciales.

Fecha y hora	Temperatura	pH	TDS(ppm)	EC(ms/cm)	Salt %/ppm	S.G g/cm
20 de mayo 7:30 a.m.	19.5	7	042	0.99	0 0	1.000
20 de mayo 9:15 a.m.	22.3	7	052	0.93	0 003	1.000
20 de mayo 11 a.m.	23.7	7	043	0.98	0 0	1.000
21 de mayo 7:20 a.m.	18.3	6	055	1	0 0	1.000
21 de mayo 10:05 a.m.	20.5	7	029	0.94	0 004	1.000
21 de mayo 13:00 p.m.	23	7	043	1	0 003	1.000
22 de mayo 7:06 a.m.	18.9	7	055	1	0 0	1.000
22 de mayo 9:30 a.m.	20.3	7	043	0.98	0 003	1.000
22 de mayo 11:50 a.m.	21.5	6	060	0.99	0 0	1.000
22 de mayo 13:00 p.m.	22.8	7	044	1	0 003	1.000
Media Aritmética	21.08	7	047	0.981	0 002	1.000
Desviación Estandar P	1.7634058	0	009	0.024269	1.624808	.000

Tabla 1. Mediciones locales

Fecha y hora	Marca	Temperatura	PH	TDS(PPM	EC(ms/cm)	Salt %/ppm	S.G g/cm
05 de mayo 11:50 a.m.	Ciel	23.5	6.3	147	292	0.01	1
05 de mayo 11:55 a.m.	Bonafont	22.8	7.3	134	267	0.01	1
05 de mayo 12:02 p.m.	E-pura	22.2	7.1	009	018	0	1
05 de mayo 12:10 p.m.	Skarch	18.5	6.9	075	152	0	1
Media Aritmética	Todas	21.75	6.9	091	182	0.005	1
Desviación Estandar P	Todas	1.931968	0.4	055	109	0.005	0

Tabla 2. Marcas comerciales mediciones

3. Resultados y Discusión

Se presentaron los resultados del análisis estadístico de los datos recabados, a fin de informar a la comunidad sobre los hallazgos encontrados.

Se realizó la comparativa entre los datos obtenidos in situ y los estipulados en la NOM-127-SSA1-2021 Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles para la calidad del agua, sección 5 Especificaciones sanitarias, y NOM-179-SSA1-2020, Agua para uso y consumo humano. Control de la calidad del agua distribuida por los sistemas de abastecimiento de agua.

Se elaboró el informe sobre uso seguro del agua captada por el sistema de cosecha de lluvia, con las recomendaciones adicionales de acuerdo a los hallazgos.

Se realizó la propuesta de saneamiento del agua captada mediante el diseño de un filtro rudimentario con materiales inertes para incrementar la seguridad en el uso del agua de lluvia y su posible potabilización para consumo humano.

Las lecturas de EC (conductividad eléctrica) se mantuvieron estables en un rango de 0.9 a 1.0 µS/cm, siendo

valores sumamente aceptables en comparación con la indicada por la NOM-127-SSA1-2021 que establece un límite permisible de 1000 µS/cm a 25°C.

En cuanto al contenido de sales, donde los principales contaminantes presentes en el producto son los cloruros, fluoruros, iones de calcio, magnesio y sodio con límite máximo permisible de 250 mg/L de acuerdo a la normatividad, se obtuvieron lecturas por debajo del límite establecido, en un rango de 30 mg/L como lectura máxima.

La densidad específica se mantuvo estable durante todo el periodo de medición (1.000 g/cm3) siendo un valor excelente en comparación con el establecido en la normatividad, así como los obtenidos en las muestras comerciales.

Para que el agua lluvia sea apta para consumo humano, es de gran importancia establecer qué tipo de tratamiento es el adecuado. Para algunos autores, la filtración puede actuar efectivamente en la remoción de aproximadamente el 99% de las bacterias en el agua [1]. Además, la filtración puede contribuir en la remoción de partículas y contaminantes solubles, como los sólidos suspendidos totales y las grasas [13], reduce turbiedad y dureza [14], carbón orgánico disuelto y color [15], y remueve algunos nutrientes como nitritos y nitratos [16]. Sin embargo, aunque la filtración resulte ser un buen tratamiento, es necesario que se complemente con el proceso de la desinfección, de modo que se pueda brindar un 100% de seguridad bacteriológica a la comunidad.

De acuerdo a los datos recolectados y mostrados en las tablas anteriores (tabla 1 y tabla 2) se determinó la viabilidad de utilizar el agua de lluvia como fuente de agua de calidad potable apta para lavarse las manos, sanitarios, limpieza y riego dentro del Centro de Estudios Tecnológicos Industriales y de Servicios.

Los distintos materiales de construcción del tipo de techo, diseño del sistema y área geográfica podrían resultar en diferentes calidades de agua. Se recomienda investigaciones sobre la calidad del agua en sistemas de captación de agua de lluvia ubicados en distintas áreas geográficas, calidad del aire, patrones de lluvia y clima

4. Conclusiones

A pesar de la presencia de contaminación del aire en el Estado de México específicamente en el área conurbada de Ecatepec de Morelos, esto podría ser causa sobre la conveniencia del agua de lluvia para el uso humano, esta investigación demuestra que un sistema de recolección de agua de pluvial adecuadamente diseñado proporciona agua de muy alta calidad, que cumple con estándares y normas mexicanas de calidad de agua.

Los sistemas de captación de agua pluvial contribuyen a aumentar la resiliencia urbana al cambio climático en el Estado de México.

Para lograr que el agua sea apta para el consumo humano, el prototipo tecnológico debe de incluir procesos como filtración (para eliminar sólidos) y la desinfección (como cloración o radiación ultravioleta.) Esto permitirá cumplir con las normativas de salud oficial.

Con este tipo de prototipo tecnológico no solo el agua cosechada pueda utilizarse para lavarse las manos, riego o limpieza, sino directamente para beber o cocinar.

5. Referencias

[1] S. Malato, S. P. Fernández-Ibáñez, M. I. Maldonado, J. Blanco y W. Gernjak, “Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends”, Cat. Today, vol. 14, n.° 1, 2009. pp. 1-59. doi: 10.1016/j.cattod.2009.06.018. [Links]

[2] S. Gelover, L.A. Gómez, K. Reyes y Ma. Leal, “A practical demonstration of water disinfection using TiO2 films and sunlight water”, Wat. Res., vol. 20, n.° 17, 2006. pp.3274-3280. doi: 10.1016/j.watres.2006.07.006 [Links]

[3] A. Mankad, “Decentralised water systems: Emotional influences on resources decision making”, Env. Int., vol. 44, n.° 1. pp.128-140, 2012. doi: 10.1016/j.envint.2012.01.002 [Links]

[4] N. Osseiran. (2017, jul. 12). “Organización Mundial de la Salud”. [Internet]. Disponible en: https://www.who.int/es/news-room/detail/12-07-2017-2-1-billion-people-lack-safe-drinking-water-at-home-more-than-twice-as-many-lack-safe-sanitation [Links]

[5] M. Sturm, M. Zimmermann, K. Schütz, W. Urban y H. Hartung, “Rainwater harvesting as an alternative water resource in rural sites in central northern Namibia”, Phys. and Chem. of the Earth, parts A/B/C, vol. 34, n.° 13-16, pp. 776-785, 2010. doi: 10.1016/j.pce.2009.07.004 [Links]

[6] L. W. Gill y C. Price, “Preliminary observations of a continuous flow solar disinfection system for a rural community in Kenya”. Energy, vol. 35, n.° 12. pp. 4607-4611, 2010. doi: 10.1016/j.energy.2010.01.008 [Links]

[7] B. McCann, “Global prospects for rainwater harvesting”, Water 21, Mag. of the Int. Water Assoc., n.° 10.6, pp.12-14, 2008. [Links]

[8] K.W. König, “German development provides rainwater”. Water 21, Mag. of the Int. Water Assoc., n.° 10.3, pp. 29, 2008. [Links]

[9] E. Wisbeck, E. K. Sandri, A. L. Soares y S. H. W. Medeiros, “Desinfecção de água de chuva por radiação ultravioleta”, Engen. Sanit. e Amb., vol. 16, n.° 4, pp.337-342, 2011. doi: 10.1590/S1413-41522011000400004. [Links]

[10] D. M. Hernández, D. B. Pedraza y T. Rodriguez, Manual de tratamiento de Aguas Lluvias. Bogotá:

Universidad Militar Nueva Granada, 2013. doi: 10.13140/RG.2.2.25579.54568 [Links]

[11] Banco Mundial. Datos Colombia. [Internet] En: datos. bancomundial.org/país/Colombia. [Links]

[12] M. Pacheco Montes, "Avances en la Gestión Integral del Agua Lluvia (giall): contribuciones al consumo sostenible del agua, el caso de 'Lluviatl' en México", Rev. Int. Sost., Tec. y Hum., n.° 3, pp. 39-57, 2008. [Links]

[13] H. J. Master, S. M. Kraemer, R. B. Johnston, "Achieving long-term use of solar water disinfection in Ziwbawe". Pub. Health, vol. 127, n.° 1. pp. 92-98, 2013. doi: 10.1016/j.puhe.2012.09.001 [Links]

[14] R. F. Moreira, M. L. Calijuri, I. de Castro, y A. da Fonseca, "Rainwater treatment in airports using slow sand filtration followed by chlorination: Efiiciency and costs". Resour., Conserv. and Recyc, vol. 65, pp. 124-129, 2012. doi: 10.1016/j.resconrec.2012.06.001 [Links]

[15] P. Singh, P. Kumar, I. Mehrotra y T. Grischek, "Impact of river bank filtration on treatment of polluted river water", Journ. of Env. Manage, vol. 91, n.° 1-3, pp. 227-289, 2010. doi: 10.1016/j.jenvman.2009.11.013 [Links]

[16] J. A. Herrera, J. A. González, O. Díaz, M. E. Aguilar, M. E. Bujalance y J. M. Doña, "Effect of stone filters in a pond wetland system treating raw wastewater from a university campus", Desalination, vol. 237, n.° 1-3. pp. 227-289, 2009. doi: 10.1016/j.desal.2008.01.021 [Links]

[17] E. W. Rice, R. B. Baird, A. D. Eaton, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (21a ed.). Washington, dc: American Public Health Association APHA, 2017. [Links]

[18] M. Ahmedna, W. E. Marshall y R. M. Rao, "Surface properties of granular activated carbons from agricultural by-products and their effects on raw sugar decolorization",

[19] https://islaurbana.org/escuelas-de-lluvia/

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 77-87

ISSN: 2992-7315

Diseño e Implementación de un Prototipo Experimental de Hardware para Monitoreo Atmosférico Inalámbrico Basado en Arduino® y Protocolo IEEE 802.15.4

Design and Implementation of an Experimental Hardware Prototype for Wireless Atmospheric Monitoring Based on Arduino® and IEEE 802.15.4 Protocol

Juan Gabriel Rodríguez-Ortiz [a], Cornelio Morales-Morales [b], Ángel Adad Franco-Baltazar [c], Isabel Ernestina López-Navarro [d], Louis Phelippe Meziat-Castro [e]

[a,b,c,d] *Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río, 76800, San Juan del Río, Querétaro, México.*
[e] *Facultad de Ingeniería, Universidad de Cundinamarca, Dg 18 20-29, Fusagasugá, Cundinamarca, Colombia*

Resumen

En este artículo se presenta el diseño de hardware, integración electrónica e implementación experimental de un prototipo portátil y autónomo para el monitoreo atmosférico local, independiente de redes celulares e internet. El sistema se fundamenta en una arquitectura modular compuesta por una unidad transmisora (Tx) exterior de bajo consumo y una unidad receptora (Rx) interior. El hardware Tx/Rx integra tecnología Arduino® Nano / Uno (microcontrolador ATmega328P a 16 MHz) y módulos de radiofrecuencia XBee® S1 (IEEE 802.15.4 a 2.4 GHz) en topología punto a punto (P2P). El módulo Tx exterior incluye siete sensores ambientales comerciales y permite la adquisición de diez magnitudes físicas: temperatura ambiente, humedad relativa, calidad del aire (índice COV/NOx), altitud estimada, presión atmosférica, iluminación (ALS), índice UV, velocidad del viento, dirección del viento y precipitación pluvial acumulada. La unidad Rx cuenta con visualización física local mediante una pantalla LCD TFT (controlador ILI9341 con resolución 240x320 pixeles) a color de 2.4 pulgadas. Se presenta la caracterización del consumo eléctrico del hardware (0.36 W en Tx), el análisis de factibilidad teórica de su fuente fotovoltaica autónoma (panel de 5 Vcc / 2 W y batería Li-Ion 18650) considerando eficiencias de conversión, y la evaluación empírica de alcance de RF (65 m en línea de vista con evaluación de tasa de pérdida de paquetes). Los resultados validan la factibilidad técnica del hardware desarrollado como una plataforma experimental asequible para telemetría ambiental en entornos sin conectividad a internet.

Palabras clave: Arduino®, Estación meteorológica experimental, IEEE 802.15.4, XBee® S1, Telemetría de bajo consumo.

Abstract

This paper presents the hardware design, electronic integration, and experimental implementation of a portable, autonomous prototype for local atmospheric monitoring that operates independently of cellular networks and the internet. The system is based on a modular architecture comprising a low-power outdoor transmitter unit (Tx) and an indoor receiver unit (Rx). The Tx/Rx hardware integrates Arduino® Nano/Uno technology (ATmega328P microcontroller at 16 MHz) and XBee® S1 radio frequency modules (IEEE 802.15.4 at 2.4 GHz) in a point-to-point (P2P) topology. The outdoor Tx module incorporates seven commercial environmental sensors capable of acquiring ten physical quantities: ambient temperature, relative humidity, air quality (VOC/NOx index), estimated altitude, atmospheric pressure, ambient light sensing (ALS), UV index, wind speed, wind direction, and accumulated rainfall. The Rx unit features local on-board visualization via a 2.4-inch color TFT LCD screen (ILI9341 controller with a 240x320 pixel resolution). The work details the hardware power consumption characterization (0.36 W at Tx), the theoretical feasibility analysis of its autonomous photovoltaic power supply (5 VDC / 2 W panel and an 18650 Li-ion battery) accounting for conversion efficiencies, and the empirical RF range evaluation (65 m line-of-sight with packet loss rate assessment). The results validate the technical feasibility of the developed hardware as an affordable experimental platform for environmental telemetry in environments lacking internet connectivity.

Keywords: Arduino®, Experimental weather station, IEEE 802.15.4, XBee® S1, Low-power telemetry.

*Autor para la correspondencia: juan.ro@sjuanrio.tecnm.mx
Correo electrónico: juan.ro@sjuanrio.tecnm.mx (Juan Gabriel Rodríguez-Ortiz), cornelio.mm@sjuanrio.tecnm.mx (Cornelio Morales-Morales), angel.fb@sjuanrio.tecnm.mx (Ángel Adad Franco-Baltazar), isabel.ln@sjuanrio.tecnm.mx (Isabel Ernestina López-Navarro), Lmeziat@ucundinamarca.edu.co (Louis Phelippe Meziat-Castro).

Historial del manuscrito: recibido el 18/09/2026, última versión-revisada recibida el 09/10/2026, aceptado el 16/11/2026, publicado el 24/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.24502597

1. Introducción

El monitoreo de parámetros atmosféricos a escala microclimática es una herramienta fundamental para el diagnóstico ambiental local, la investigación académica y la gestión agrícola (WMO, 2021). Si bien las estaciones meteorológicas automáticas comerciales de grado profesional ofrecen alta exactitud, su elevado costo de adquisición, mantenimiento complejo y dependencia de infraestructura propietaria limitan su despliegue en entornos educativos o comunidades rurales aisladas.

En la literatura reciente, diversas arquitecturas de monitoreo de bajo costo apoyadas en hardware libre y tecnologías del Internet de las Cosas (IoT) han sido propuestas (Cruz y Choque, 2018; Leelavinodhan et al., 2021; Ricaldi y Andrade, 2022). Asimismo, desarrollos recientes en redes de sensores ambientales han explorado plataformas inalámbricas avanzadas para telemetría agrícola y rural (Al-Okby et al., 2022; Park et al., 2019). Por ejemplo, Babiuch et al. (2022) diseñaron estaciones ambientales basadas en microcontroladores ESP32 conectados mediante Wi-Fi a servidores en la nube para visualización remota; mientras que Mabrouki et al. (2022) implementaron una arquitectura IoT multiparamétrica apoyada en protocolos HTTP/MQTT para monitoreo climático en tiempo real. En el ámbito de redes de área amplia de baja potencia (LPWAN), Kusriyanto y Putra (2023) y Sendra et al. (2023) desarrollaron nodos microclimáticos basados en tecnología LoRa/LoRaWAN con celdas solares para agricultura y monitoreo ambiental rural. De manera similar, Parra et al. (2023) propusieron un prototipo de monitoreo ambiental inalámbrico con arquitectura IoT y comunicación Wi-Fi/MQTT, y García et al. (2022) evaluaron enlaces inalámbricos en bandas ISM de 2.4 GHz para telemetría ambiental en zonas agrícolas de topografía irregular.

A pesar de los avances reportados, el análisis crítico del estado del arte evidencia una limitación estructural recurrente: la gran mayoría de estos prototipos dependen de conectividad activa a internet, enrutadores Wi-Fi, módems celulares (GPRS/LTE/5G), gateways LoRaWAN con salida WAN o plataformas públicas en la nube. En regiones rurales sin cobertura de telecomunicaciones o durante contingencias hidrometeorológicas severas —momentos críticos en los que el colapso de las torres celulares es frecuente—, dicha dependencia tecnológica constituye un punto único de falla que interrumpe por completo la disponibilidad de los datos ambientales. Adicionalmente, muchos prototipos académicos priorizan la conectividad en la nube sacrificando el consumo energético (> 0.8 W en transceptores Wi-Fi/celulares) o limitándose a medir entre 2 y 5 variables básicas sin despliegue físico local inmediato.

Para atender esta problemática, el objetivo principal de este trabajo es presentar el diseño, acoplamiento electrónico, caracterización experimental y transferencia tecnológica de un prototipo de estación de monitoreo atmosférico inalámbrica completamente autónoma y libre de dependencias de red externa. A diferencia de los desarrollos centrados en IoT convencional, esta propuesta utiliza el protocolo estándar IEEE 802.15.4 sobre transceptores XBee® S1 en topología punto a punto (P2P). El aporte diferencial e innovación de ingeniería radica en la arquitectura de integración heterogénea determinista sobre un microcontrolador de 8 bits sin sistema operativo de tiempo real (RTOS): se consolidan siete transductores físicos de distinta naturaleza eléctrica (bus digital I2C compartido por cuatro sensores, entrada analógica ADC y dos líneas de interrupción por hardware con filtrado RC y antirrebote determinista de 50 ms) para adquirir simultáneamente diez magnitudes atmosféricas con un consumo continuo de apenas 0.36 W, acondicionamiento óptico UV mediante ventana de cuarzo JGS1, autonomía fotovoltaica aislada y visualización física local en tiempo real.

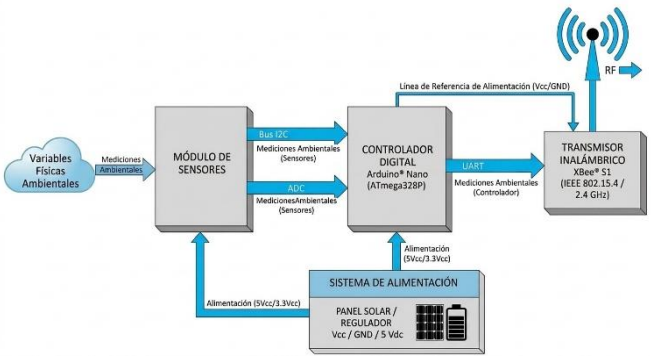
2. Materiales y Método

El prototipo adopta una arquitectura modular dividida en dos bloques físicos de hardware: el módulo o unidad transmisora (Tx) exterior y el módulo o unidad receptora (Rx) interior.

2.1 Arquitectura del hardware módulo transmisor (Tx) exterior

La unidad transmisora (Tx) exterior realiza la adquisición, acondicionamiento de señal y digitalización de diez magnitudes físicas a partir de siete transductores comerciales integrados. Su núcleo de procesamiento es la placa de desarrollo Arduino® Nano (basada en el microcontrolador ATmega328P a 16 MHz). La Figura 1 muestra la arquitectura a bloques del módulo transmisor (Tx) exterior.

Figura 1: Arquitectura del módulo transmisor (Tx) exterior (elaboración propia).



La matriz de transductores implementada y sus características de interfaz se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Matriz de sensores en el módulo transmisor (Tx) exterior.

Ítem	Variable Atmosférica / Unidad	Sensor / Dispositivo / Rango
1	Temperatura ambiente (°C)	AHT20 (-40 °C a +85 °C)
2	Humedad Relativa (%)	AHT20 (0% a 100%)
3	Calidad del aire COV/NOx	SGP41 (1 a 500 índice COV/NOx)
4	Presión atmosférica (hPa)	BMP180 (300 hPa a 1100 hPa)
5	Altitud estimada (m.s.n.m.)	BMP180 (+9000 m a -500 m s.n.m.)
6	Iluminación ambiental (lux)	LTR390 (0.01 lux a 157,000 lux)
7	Índice de radiación UV	LTR390 (Índice UV 0 a ~20)
8	Velocidad del viento (km/h)	Anemómetro de cazoletas (0 km/h a 108 km/h)
9	Dirección del viento (Grados / Sector)	Veleta de resistencia (0° a 360° (8 sectores))
10	Precipitación pluvial acumulada (mm)	Pluviómetro de cazoleta basculante (0.2794 mm/pulso)

La matriz de siete transductores utilizados en el prototipo se interconecta con la placa Arduino® Nano procurando optimizar el uso de líneas de entrada y salida y evitar colisiones de tiempo en la captura de eventos asíncronos (ráfagas de viento y basculaciones del pluviómetro). El acoplamiento eléctrico y asignación de puertos en la placa Arduino® Nano se detalla en la Tabla 2.

Tabla 2: Interfaz de hardware integrada en el módulo Tx.

Puerto Arduino® Nano	Sensor / Periférico / ID	Tipo de interfaz / Acondicionamiento
A4 (SDA), A5 (SCL)	AHT20 (0x38), BMP180 (0x77), SGP41 (0x59), LTR390 (0x53).	Bus I2C, Resistencias Pull-up externas (4.7 kΩ)
A6	Veleta resistiva	Entrada analógica (Divisor de tensión / ADC)
D2	Anemómetro de cazoletas	Interrupción digital (INT0), Filtro RC y debouncing digital (50 ms)
D3	Pluviómetro de balancín	Interrupción digital (INT1), debouncing digital (50 ms)
TX (Pin 1)	XBee® S1 Transmisor	UART Serie (9600 bps), XBee® Explorer Regulated (5 Vcc a 3.3 Vcc)

2.2 Acoplamiento de niveles lógicos y radiofrecuencia (IEEE 802.15.4)

El microcontrolador Arduino® Nano opera a niveles lógicos TTL de 5 Vcc, mientras que el módulo transceptor XBee® S1 (Silicon Labs EM250) requiere niveles lógicos CMOS de 3.3 Vcc, soporta una tensión máxima absoluta de 3.6 Vcc y entrega una potencia nominal de salida RF de +0 dBm (1 mW) en la banda ISM de 2.4 GHz (DIGI International, 2021). Para evitar el daño de las líneas de entrada del transceptor y asegurar la integridad de las ráfagas seriales a 9600 bps, se integró una placa adaptadora XBee® Explorer Regulated. Esta tarjeta incluye un regulador lineal LDO de 3.3 Vcc y un regulador de nivel con divisor resistivo/transistor en la línea DIN (RX del XBee), garantizando la compatibilidad entre ambas plataformas electrónicas y operando en modo transparente (AT) sin sobrecarga de encabezados de red TCP/IP.

2.3 Análisis de consumo eléctrico y fuente fotovoltaica autónoma

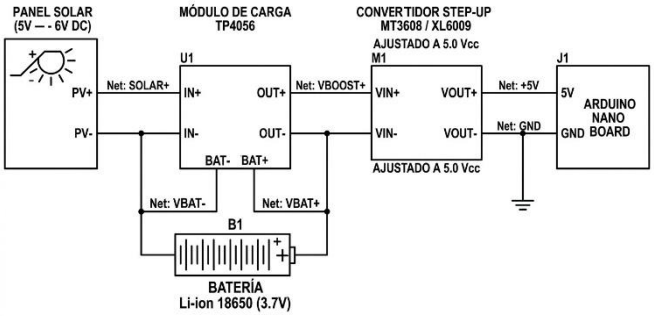
Para verificar el comportamiento dinámico del hardware en campo, se midió el consumo de corriente del módulo Tx empleando una fuente regulada a 5 Vcc. El circuito Tx demanda una corriente media en operación continua de 72 mA (potencia de 0.36 W), alcanzando picos de 88 mA durante las transmisiones de RF de 1 mW (+0 dBm).

Para evaluar la factibilidad teórica de alimentación autónoma en aplicaciones portátiles o aisladas de la red (Off-Grid), se dimensionó una fuente fotovoltaica compacta. El arreglo consiste en un panel solar monocristalino de 5 Vcc / 2 W (corriente máxima promedio de 400 mA), un módulo cargador TP4056 con circuito de protección DW01A y una batería recargable Li-Ion 18650 de 3.7 Vcc / 3000 mAh (energía nominal de 11.1 Wh). Con este arreglo, la energía diaria consumida por el módulo Tx es de $0.36\ W \cdot 24\ h = 8.64$ Wh/día. En un escenario ideal considerando una radiación solar promedio equivalente de 4.5 horas solar pico (HSP) en la región de prueba, el panel solar genera $2\ W \cdot 4.5\ h = 9.0$ Wh/día.

No obstante, al realizar un análisis de factibilidad más riguroso que incorpora la eficiencia del regulador Boost MT3608/XL6009 ($\eta \approx 85\ \%$) y la eficiencia de carga/descarga de la batería Li-Ion ($\eta \approx 88\ \%$), la energía útil disponible se estima en aproximadamente 6.73 Wh/día. Esto indica que, bajo condiciones climáticas desfavorables o días nublados consecutivos, el balance energético requerirá el respaldo de la capacidad acumulada en la batería (11.1 Wh), la cual proporciona un margen de autonomía continua sin radiación solar de aproximadamente 23 a 30 horas. Por lo tanto, este cálculo demuestra la factibilidad teórica de alimentación autónoma del prototipo, reconociendo que para garantizar una operación ininterrumpida 24/7 en periodos invernales se requeriría escalar el panel solar a 3.5 W o implementar modos de bajo consumo (sleep modes) en el firmware. La Figura 2

muestra el diagrama esquemático para el sistema de alimentación eléctrica fotovoltaica.

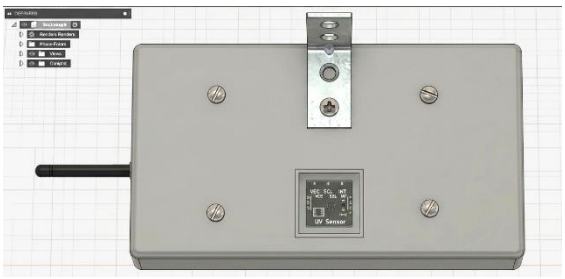
Figura 2: Sistema de alimentación eléctrica fotovoltaica.



2.4 Encapsulado del hardware módulo transmisor (Tx) exterior

El circuito electrónico Tx se alojó en un gabinete de plástico ABS con grado de protección IP65 (130x70x40 mm). Para prevenir pozos térmicos e hidratación de los sensores AHT20, BMP180 y SGP41 por radiación directa, el gabinete dispone de ranuras de ventilación inferior. Para el sensor óptico LTR390 (iluminación e índice UV), se adaptó una ventana superior cubierta con una lámina de vidrio de cuarzo de sílice fundido JGS1 (15x15 mm), para permitir el paso óptimo de la radiación ultravioleta directo hacia el sensor LTR390; el cual garantiza una transmitancia superior al 90% en la banda ultravioleta (200 nm a 400 nm). Esta característica óptica hace de este material ideal en aplicaciones de medición de luz ultravioleta (Shape Optics Technologies, s.f.). La Figura 3 presenta el modelo del gabinete del módulo transmisor (Tx) exterior.

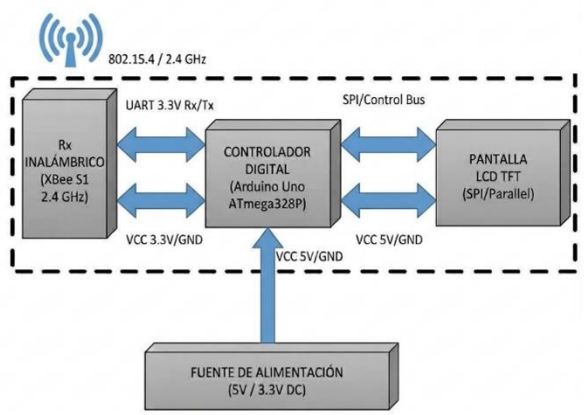
Figura 3: Módulo transmisor (Tx) exterior (elaborado en Autodesk Fusion®).



2.5 Arquitectura del hardware módulo receptor (Rx) interior

La unidad receptora (Rx) interior se diseñó para brindar visualización inmediata en sitio. Consta de una tarjeta Arduino® Uno, un adaptador XBee® Explorer Regulated acoplado al módulo XBee® S1 receptor, y una pantalla gráfica LCD TFT de 2.4 pulgadas (controlador ILI9341). La unidad decodifica la trama serial entrante y actualiza cíclicamente las diez variables meteorológicas cada 2 segundos. La demanda eléctrica de la unidad Rx es de 350 mA a 5 Vcc (1.75 W), alimentada por un adaptador AC/DC convencional de 5 Vcc / 2 A. La Figura 4 representa la arquitectura del módulo receptor (Rx) interior.

Figura 4: Arquitectura del módulo receptor (Rx) interior (elaboración propia).



2.6 Encapsulado del módulo receptor (Rx) interior

El módulo receptor (Rx) interior fue alojado en un gabinete hermético de plástico ABS con grado de protección IP65 (130x70x40 mm) para proteger la circuitería contra el polvo, humedad y golpes mecánicos. La pantalla a color LCD TFT con controlador ILI9341 y resolución de 240x320 pixeles queda expuesta a la vista del usuario a fin de que la información de las variables climatológicas sea visible desde diversos ángulos. La Figura 5 presenta la vista frontal de la unidad receptora (Rx) interior.

Figura 5: Gabinete del módulo receptor (Rx) interior.



2.7 Transferencia tecnológica, código fuente y esquemas de reproducción

Con el propósito de facilitar la replicabilidad experimental, la validación por pares y la transferencia tecnológica hacia instituciones educativas o comunidades rurales, la documentación técnica completa del prototipo se encuentra disponible en acceso abierto. El paquete de reproducción tecnológica incluye: (a) el código fuente comentado en lenguaje C++ (Arduino IDE) para los firmwares de adquisición y transmisión (Tx) y de recepción y despliegue gráfico (Rx), incluyendo las rutinas de interrupción y calibración de sensores; (b) los diagramas esquemáticos electrónicos y la lista de materiales (BOM) con especificaciones de componentes comerciales. El material se encuentra alojado en el repositorio de hardware abierto del proyecto (https://github.com/HardwareySoftware/ESTACION-METEOROLOGICA-LOCAL) bajo licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

3. Resultados experimentales

Se realizaron evaluaciones instrumentales de contraste en condiciones de laboratorio y campo para comprobar la correcta operación del hardware, radiocomunicación y acondicionamiento de señales.

3.1 Temperatura y Humedad Relativa

El sensor AHT20 registró una temperatura de 26.9 °C frente a una temperatura de 26.0 °C medida con un instrumento de contraste de taller (multímetro Aicevos® AS-118D con termopar tipo K calibrado), presentando una diferencia o error absoluto de 0.9 °C.

Por otra parte, en humedad relativa (HR), el sensor AHT20 indicó 46 % HR frente a 50 % HR registrado por un higrómetro digital de taller HTC-1. Esta lectura representa una diferencia de -4 puntos porcentuales, lo que equivale a un error relativo de -8 % con respecto al valor de referencia del instrumento de taller.

Se reconoce explícitamente que estas comparaciones son de carácter cualitativo y corresponden a una verificación funcional de prototipos de bajo costo en entorno de taller. No obstante, estos márgenes de desviación para temperatura y humedad relativa resultan aceptables para caracterizaciones microclimáticas orientadas a docencia o diagnóstico agrícola no sinóptico (Secretaría de Economía, 2013).

3.2 Calidad del aire

El sensor SGP41 está hecho para medir la concentración de contaminantes en el aire. En esencia, mide compuestos orgánicos volátiles (COV) y óxidos de nitrógeno (NOx). Los COV provienen de la quema de combustibles como gasolina o diésel además de la evaporación de disolventes y la actividad industrial; mientras que, los NOx son gases altamente reactivos, siendo el dióxido de nitrógeno el más peligroso (NO_2) y se manifiesta, principalmente, en los gases que expulsan los automotores (Al-Okby et al., 2022).

El firmware para el sensor se realizó considerando que el SGP41 procesa los datos brutos de COV y NOx. El algoritmo de índice de gases y el controlador del sensor están disponibles en el repositorio de GitHub de Sensirion utilizado en la programación del sensor.

Por otra parte, la escala de medida está asignada en el algoritmo para el índice de gases de Sensirion para mediciones de COV y NOx. Este algoritmo procesa las mediciones brutas y las asigna respectivamente a su propia escala de índice, que va de 1 a 500 puntos. La Tabla 3 resume los valores comparativos entre mediciones de COV y NOx que se tomaron como referencia para determinar la calidad del aire (ICA) en las mediciones del prototipo.

Tabla 3: Escala de Índice de Calidad del Aire (ICA) de referencia (Sensirion, 2022).

Característica	Índice COV	Índice NOx
Rango total	1 a 500	1 a 500
Punto de referencia	100 (aire promedio)	1 (entorno limpio)
Valores bajos (1 a 99)	Aire limpio	Sin presencia de combustión
Valores altos (101 a 500)	Presencia de picos de COV	Eventos de NOx detectados

El valor adimensional registrado por el sensor (92) se presenta como una aproximación instrumental indicativa para alertas comunitarias y no como una medición analítica absoluta de concentración.

3.3 Presión atmosférica y Altitud

El sensor BMP180 midió una presión barométrica local (P_{QFE}) de 813 hPa. Ahora bien, para comprobar la coherencia del funcionamiento del sensor respecto a modelos teóricos, se aplicó la ecuación barométrica estándar internacional ISO 2533:1975 (International Organization for Standardization [ISO], 1975):

$$P = P_0 \cdot \left(1 - \frac{(L \cdot h)}{T_0}\right)^{\frac{(g \cdot M)}{(R \cdot L)}} \quad (1)$$

Donde P_0 representa la presión estándar al nivel del mar (1013.25 hPa), L es el gradiente térmico vertical (0.0065 K/m), h equivale al valor de altitud en el lugar de referencia sobre el nivel del mar (1881 m), T0 es el valor de temperatura al nivel del mar (288.15 K), g= representa el valor de aceleración de la gravedad (9.80665 m/s²), M= es el valor de la masa molar del aire seco (0.0289644 kg/mol) y R= el valor de la constante universal (8.31447 J/(mol·K). Entonces, la presión teórica calculada resultó de 811.8 hPa, mostrando una diferencia de 1.2 hPa (error relativo inferior al 0.15 %) respecto al modelo físico.

Por otro lado, la altitud calculada por firmware mediante el modelo altimétrico de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI, 1993):

$$h = 44330 \cdot \left(1 - \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.190284}\right) \quad (2)$$

Donde h es la altitud resultante en metros, P es la presión atmosférica actual en el sitio de medición en hPa y P_0 es el valor de presión atmosférica de referencia al nivel del mar (1013.25 hPa).

El cálculo teórico de la altitud arroja un valor de 1828.6 m.s.n.m. frente a la medición experimental de 1829 m.s.n.m., mostrando una concordancia adecuada dentro del redondeo numérico del microcontrolador. Esta comprobación valida la consistencia del algoritmo y acondicionamiento del sensor para aplicaciones microclimáticas orientativas (OACI, 1993).

3.4 Iluminación

La medición de luz ambiental se realizó con el sensor digital LTR390 capaz de cuantificar la luz del medio en un rango de 0.01 a 157,000 lux. El resultado de la medición es directamente proporcional a la cantidad de iluminación que incide sobre el sensor. La fórmula aplicada al firmware para calcular la cantidad de iluminación se toma de la hoja de datos del sensor LTR390 (LITEON®, 2016):

$$lux_{Calc} = \frac{(0.6\ x\ ALS_{DATA})}{(Gain\ x\ INT\ x\ W_{FAC})} \quad (3)$$

Donde ALS_DATA es el valor de medición sensor del sensor, Gain representa la ganancia para un factor de conversión de 16 bits (1), INT es una constante para ganancia 1x (0.25) y W_{FAC} representa el factor de corrección de ventana (1).

El resultado de la medición de iluminación registró un valor de 416 lux en exterior, el cual al contrastarse con la norma ISO 8995-1 (ISO, 2002) (Tabla 4) corresponde a la categoría cualitativa de "Día nublado / sombra en exterior", coincidiendo con la condición de campo observada al momento de la medición.

Tabla 4: Escala cualitativa de iluminación según norma ISO 8995-1 (ISO, 2002)

Valor en lux	Condición ambiental
< 50	Noche
< 300	Penumbra
< 10,000	Día nublado / sombra exterior
< 40,000	Día despejado / luz directa
> 40,000	Día soleado / luz muy intensa

3.5. Índice de radiación UV

El sensor LTR390 cuantifica la irradiancia en la banda ultravioleta. Aunque el Índice UV estándar definido por la OMS (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2002) se pondera según la curva eritemática de la radiación UVB (280–315 nm), el sensor LTR390 presenta su máxima sensibilidad en el espectro UVA (315–400 nm). Bajo condiciones de exposición solar directa sin nubosidad, la relación espectral UVA/UVB se mantiene predecible, lo que permite correlacionar la lectura del sensor con la escala de riesgo mediante un factor de ponderación programado en firmware (Park et al., 2019).

Para verificar la consistencia instrumental del cálculo programado en firmware, se aplicó la fórmula recomendada en la hoja de datos del sensor LTR390 (LITEON®, 2016):

$$UVI_{Calc} = \frac{UV\ Sensor\ count}{(UV\ Sensitivity\ x\ W_{FAC})} \quad (4)$$

Donde UVIcalc = es el Índice UV calculado, UV Sensor count es la lectura directa del sensor, UV Sensitivity es el factor de escala (2300) y W_{FAC} representa el factor de corrección de ventana (1).

La medición de la estación meteorológica al momento de la prueba fue de 2. La equivalencia lineal del índice UV estándar se fundamenta en la irradiancia eritemática efectiva de la luz solar donde 1 unidad equivale a una irradiancia de 25 mW/m². La escala de radiación UV va de 1 a 11+ y están asociados con diferentes recomendaciones de protección solar (OMS, 2002). Por tanto, el valor de la medición corresponde a una escala de riesgo bajo.

3.6. Sensor de velocidad del viento (anemómetro)

La velocidad del viento se determinó mediante el conteo de pulsos por interrupción en el pin D2 (INT0) de la placa Arduino® Nano producidos por el anemómetro de cazoletas. La verificación instrumental se realizó comparando la lectura contra un anemómetro comercial de prueba LUTRON® LM-81AM en un rango de 0 a 38 km/h a lo largo de un conjunto

de 20 mediciones pareadas en túnel de aire controlado. La desviación promedio registrada fue de 0.32 km/h, con una diferencia máxima de 1.3 km/h a velocidades superiores a 30 km/h.

3.7. Sensor de dirección del viento (veleta)

La veleta de resistencia caracteriza ocho sectores angulares a partir del divisor de tensión en el pin A6. La respuesta del hardware se comprobó manualmente orientando la veleta hacia cuatro direcciones cardinales fijas (Norte 0°, Este 90°, Sur 180°, Oeste 270°) y cuatro colaterales, verificando que el firmware decodificara correctamente la orientación con un margen de tolerancia angular de ±11.25°. Durante la prueba de campo, el sistema registró de forma estable una orientación de 225° (Suroeste). Se enfatiza que la veleta debe ser alineada físicamente hacia el sur geográfico durante la instalación para garantizar la coincidencia azimutal.

3.8 Precipitación pluvial (Pluviómetro)

El pluviómetro de cazoleta basculante (0.2794 mm/pulso) se comprobó cuantitativamente mediante el vertido controlado de un volumen conocido de 500 mL de agua pura a través del embudo colector (A_{embudo} = 55 cm²). El volumen vertido equivale teóricamente a una lámina de agua de 90.9 mm. Durante la prueba experimental, el microcontrolador registró un total de 322 impulsos basculantes (322 x 0.2794 mm = 89.96 mm). Esto representa un error absoluto de -0.94 mm (-1.03 % de error relativo) en la acumulación de lluvia, confirmando la efectividad del filtro antirrebote de 50 ms en la rutina de interrupción D3 (INT1). El resultado de la medición para la variable en cuestión se presenta en pantalla LCD TFT como precipitación pluvial acumulada en milímetros.

3.9 Caracterización del alcance de radiofrecuencia (IEEE 802.15.4)

La evaluación de la comunicación inalámbrica a 2.4 GHz (potencia de salida de +0 dBm / 1 mW, antenas integradas de alambre tipo Whip) se realizó ejecutando tres series independientes (repeticiones) de pruebas continuas de transmisión, cada una compuesta por 1,000 paquetes seriales de datos (32 bytes por trama) a intervalos de envío de 2 segundos, lo que equivale a una duración de monitoreo continuo de 33.3 minutos por corrida experimental (100 minutos acumulados por punto de distancia evaluado). Se estableció como criterio de aceptación de enlace confiable una tasa de recepción de paquetes (PRR) superior al 95 % (PER < 5 %), verificando la integridad de cada trama mediante delimitadores de inicio y fin en la recepción serial.

En campo abierto con línea de vista (LOS), a una distancia de 65 metros, el sistema recibió un promedio de 986 paquetes por corrida (desviación estándar de ± 3 paquetes). El cálculo de la tasa de error de paquetes (PER) y de la tasa de recepción de paquetes (PRR) se realizó mediante las ecuaciones (5) y (6):

$$PER\ (\%) = \frac{(Paquetes\ enviados) - (Paquetes\ recibidos)}{Paquetes\ enviados} \times 100 \qquad (5)$$

$$PRR\ (\%) = \left(\frac{Paquetes_{Recibidos}}{Paquetes_{Enviados}}\right) x\ 100 \qquad (6)$$

En consecuencia, a 65 m en LOS se registra una tasa PER del 1.4 % (PRR del 98.6 %), lo que confirma una comunicación altamente estable y libre de pérdida significativa de datos. A distancias superiores a 80 m, la tasa PER se incrementó por encima del 15 %, presentando intermitencia en el despliegue.

Por otro lado, en entorno de laboratorio con mampostería (NLOS), a 28 metros de distancia a través de dos muros de concreto, se transmitieron 1,000 paquetes y se recibieron 962 paquetes, obteniendo un PER del 3.8 % (PRR del 96.2 %), estableciendo este valor como el alcance práctico seguro para interiores.

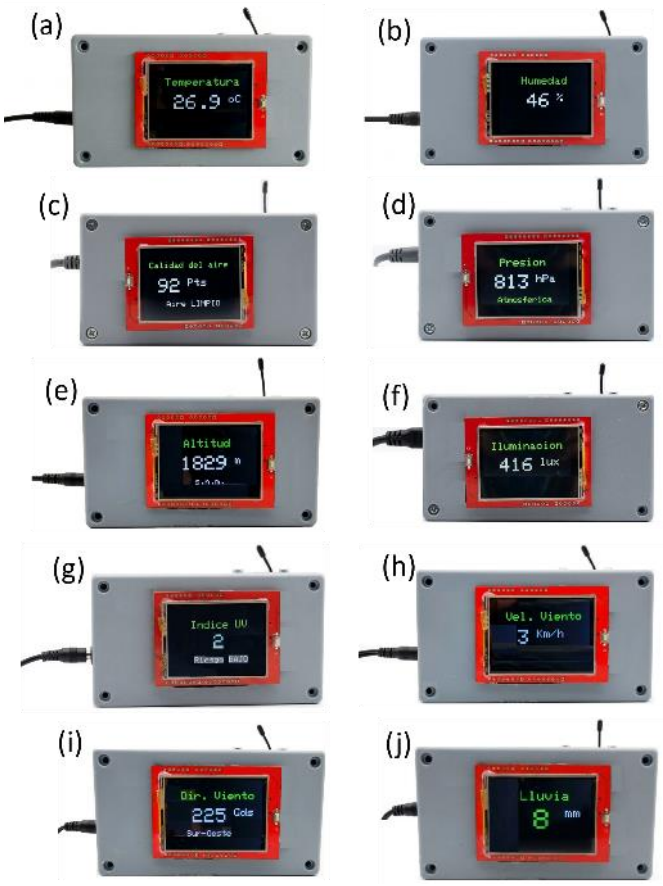
3.10 Integración final del prototipo

El prototipo de hardware experimental de la estación de monitoreo atmosférico inalámbrica con protocolo IEEE 802.15.4 se muestra en la Figura 6; mientras que la Figura 7 presenta un mosaico con el despliegue secuencial de las diez variables en la pantalla LCD TFT del módulo receptor (Rx) interior.

Figura 6: Prototipo experimental de monitoreo atmosférico inalámbrico con Arduino® y protocolo IEEE 802.15.4.



Figura 7: Interfaz de la pantalla LCD TFT de monitoreo ambiental: (a) temperatura, (b) humedad relativa, (c) calidad del aire, (d) presión atmosférica, (e) altitud, (f) iluminación, (g) índice UV, (h) velocidad del viento, (i) dirección del viento y (j) lluvia acumulada.



En la Figura 6 se observa que el módulo transmisor (Tx) exterior que aloja los sensores AHT20, BMP180, SGP41 y LTR390, la placa Arduino® Nano y el transceptor XBee® S1 está debidamente encapsulado y protegido. Asimismo, el anemómetro, la veleta y el pluviómetro se encuentran montados en la parte superior del mástil tubular en contacto directo con el entorno atmosférico, mientras que en la sección inferior se ubica la celda fotovoltaica que alimenta al sistema. Por su parte, la Figura 7 muestra las lecturas reales recolectadas secuencialmente en la unidad receptora (Rx).

3.11 Limitaciones instrumentales del prototipo

Los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio y campo confirman la funcionalidad operativa e integración electrónica de los siete transductores y del enlace inalámbrico IEEE 802.15.4. No obstante, en concordancia con la naturaleza experimental del desarrollo, se delimitan tres consideraciones técnicas: (a) las verificaciones de temperatura, humedad relativa e índice UV constituyen contrastes funcionales orientativos frente a instrumentos portátiles de taller y modelos teóricos estándar, por lo que no sustituyen una calibración metrológica formal, (b) la autonomía fotovoltaica calculada (6.73 Wh/día útiles y respaldo de 23 a 30 horas en batería Li-Ion) representa una validación de factibilidad teórica bajo un régimen promedio de 4.5 HSP, sujeta a variaciones estacionales de irradiancia y (c) el alcance práctico probado de 65 m en LOS y 28 m en NLOS responde a la operación de transceptores XBee® S1 de baja potencia (+0 dBm) con antena integrada, suficiente para cobertura microclimática local en parcelas o planteles educativos.

4. Discusión

Los resultados experimentales demuestran la factibilidad técnica del hardware desarrollado para cumplir con los requerimientos de telemetría ambiental local de bajo costo. Para sustentar la pertinencia, originalidad y aportes verificables de la propuesta frente al estado del arte reciente, la Tabla 5 presenta una comparativa multivariable contra cuatro investigaciones representativas de arquitectura completa publicadas entre 2022 y 2023 en el ámbito de estaciones meteorológicas y monitoreo ambiental inalámbrico.

Tabla 5: Comparativa del prototipo de hardware propuesto frente a desarrollos recientes en la literatura (2022-2023).

Parámetro / Característica	Babiuch et al. (2022)	Ricaldi y Andrade (2022)	Parra et al. (2023)	Sendra et al. (2023)	Prototipo Propuesto
Protocolo Inalámbrico	Wi-Fi (ESP32)	GPRS / Red Celular	Wi-Fi / MQTT (ESP32)	LoRaWAN (SX1276)	**IEEE 802.15.4 (XBee® S1)**
Dependencia de Internet / Red	Sí (Servidor Cloud)	Sí (Broker MQTT)	Sí (Servidor Cloud)	Sí (Gateway LoRaWAN WAN)	**No (Operación 100% Local)**
Variables Medidas	4 variables	5 variables	5 variables	4 variables	**10 variables simultáneas**
Visualización Física Local	No (Web / Móvil)	No (App Móvil)	No (Dashboard Web)	No (Servidor LNS)	**Sí (LCD TFT 2.4" a color)**
Fuente de Energía	Red eléctrica AC	Panel Solar básico	Red eléctrica AC / Batería	Panel Solar + Li-Ion	**PV Off-Grid (5V / 2W + Li-Ion)**
Consumo de Potencia Tx	> 0.85 W	> 1.50 W (picos GPRS)	> 0.80 W	~ 0.22 W	**0.36 W (Continuo)**

Al evaluar el desempeño de este prototipo frente a otros desarrollos de la literatura (Tabla 5), se resalta la ventaja sustancial de su arquitectura de comunicación e independencia operativa en cinco ejes fundamentales:

A. Ventajas en Arquitectura de Comunicación y Determinismo de Red:

Frente a las plataformas tradicionales basadas en módulos Wi-Fi/ESP32 (Babiuch et al., 2022; Parra et al., 2023) o módems celulares GPRS/LTE (Ricaldi y Andrade, 2022), las cuales requieren una topología dependiente de enrutadores, brokers MQTT remotos o servidores en la nube, así como sistemas LoRaWAN conectados a la red WAN (Sendra et al., 2023), el sistema propuesto adopta una arquitectura desacoplada en topología Punto a Punto (P2P) sobre la capa física IEEE 802.15.4 a 2.4 GHz. Esta elección elimina por completo la latencia de red pública y los puntos únicos de falla asociados a la caída de torres celulares o servidores durante contingencias meteorológicas. El canal inalámbrico local mediante transceptores XBee® S1 en modo transparente (AT) garantiza un enlace serial determinista a 9600 bps con una tasa de error de paquetes (PER) sumamente baja (1.4 % a 65 m en LOS y 3.8 % a 28 m en NLOS), demostrando una inmunidad al ruido superior para entornos microclimáticos delimitados (predios agrícolas, escuelas rurales o reservas forestales) en concordancia con lo reportado por García et al. (2022) para enlaces en bandas ISM.

B. Ventajas en Consumo de Potencia y Eficiencia Eléctrica:

El circuito transmisor (Tx) exterior registra una demanda eléctrica media de apenas 72 mA a 5 Vcc, correspondiente a una potencia de 0.36 W. Este consumo representa una reducción de potencia significativa en comparación con los transceptores Wi-Fi/ESP32 (>0.80 W a 1.20 W) (Parra et al., 2023) y módems GSM/GPRS (>1.50 W con picos de 2 A durante transmisión) (Ricaldi y Andrade, 2022). Si bien existen arquitecturas LoRaWAN de bajo consumo (Sendra et al., 2023, ~0.22 W), estas operan con matrices de sensores muy reducidas (4 variables) y transmisiones esporádicas. La propuesta logra mantener la digitalización ininterrumpida de diez variables con una demanda energética altamente contenida.

C. Ventajas en Autonomía Fotovoltaica y Resiliencia Off-Grid:

El bajo consumo de 0.36 W facilita la integración de un subsistema de alimentación solar Off-Grid sumamente compacto y de bajo costo, constituido por un panel monocristalino de solo 5 Vcc / 2 W, un cargador TP4056/DW01A y una única celda Li-Ion 18650 de 3000 mAh (11.1 Wh nominales). El análisis de factibilidad energética demostró que, aun incorporando las pérdidas por conversión del regulador Boost MT3608 y la eficiencia de la batería, el sistema dispone de 6.73 Wh/días útiles. La batería recargable provee un margen de autonomía continua sin radiación solar directa de 23 a 30 horas, garantizando resiliencia frente a periodos de nubosidad prolongada sin requerir bancos de baterías pesados de plomo-ácido ni paneles fotovoltaicos voluminosos de 10 W- 20 W como los que exigen las estaciones comerciales.

D. Ventajas en la Densidad de Variables Monitorizadas e Integración de Hardware:

Mientras que la mayoría de los prototipos académicos de los últimos cinco años reportan la medición de entre 2 y 5 parámetros ambientales (Babiuch et al., 2022; Ricaldi y Andrade, 2022; Parra et al., 2023; Sendra et al., 2023), el prototipo propuesto consolida la caracterización simultánea de diez magnitudes atmosféricas esenciales mediante siete transductores: temperatura, humedad relativa, calidad del aire (índice COV/NOx), presión barométrica, altitud estimada, iluminación (ALS), índice UV, velocidad del viento, dirección del viento y lluvia acumulada. Esta alta densidad de variables en un solo nodo de 0.36 W —lograda mediante multiplexación I2C, conversión ADC e interrupciones de hardware con filtrado antirrebote— amplía el rango de aplicación del prototipo hacia estudios agroclimáticos integrales, alertas comunitarias por acumulación de lluvia o monitoreo de radiación solar para salud pública.

E. Ventajas en Infraestructura Requerida, Costo Operativo y Transferencia Tecnológica:

A nivel de infraestructura local, la propuesta elimina la necesidad de contar con contratos de telefonía celular, planes de datos M2M, gateways LoRaWAN costosos, equipos de cómputo dedicados en sitio o infraestructura de internet. La inclusión de la unidad receptora interior (Rx) con despliegue físico instantáneo mediante pantalla LCD TFT a color de 2.4 pulgadas permite la visualización cíclica de los datos directamente por el usuario final desde el momento en que se energiza el equipo. Esto reduce a cero el costo recurrente de operación y mantenimiento de la red de telemetría, y al complementarse con la disponibilidad abierta de su firmware, esquemáticos y listado de material, ofrece una solución técnica portable, replicable e independiente de infraestructura de terceros.

En síntesis, si bien este prototipo experimental no sustituye a una estación meteorológica profesional homologada para redes sinópticas oficiales (Secretaría de Economía, 2013), la combinación de sus ventajas verificables lo consolida como un instrumento altamente competitivo, resiliente y asequible para diagnósticos microclimáticos comunitarios, proyectos agrícolas o actividades de docencia en ingeniería.

5. Conclusiones y trabajo futuro

Se diseñó e implementó exitosamente un prototipo de hardware experimental para el monitoreo atmosférico inalámbrico local empleando la plataforma Arduino® y el estándar IEEE 802.15.4. El sistema logró la integración armónica de siete sensores ambientales para la medición simultánea de diez variables atmosféricas, un canal de comunicación RF confiable a 9600 bps con alcance probado de 65 m en línea de vista (PER = 1.4 %) y visualización en tiempo real mediante pantalla LCD TFT.

El bajo consumo energético del hardware transmisor (0.36 W) demostró la factibilidad teórica de su alimentación fotovoltaica aislada (5 Vcc / 2 W), garantizando autonomía mediante almacenamiento en batería Li-Ion de 3000 mAh. Asimismo, la liberación abierta de los códigos fuente, diagramas electrónicos y lista de material en repositorio público asegura la transferencia tecnológica y reproducibilidad del sistema.

Como perspectivas de escalabilidad para elevar la madurez del hardware, se contempla: 1) incorporar un módulo de reloj en tiempo real (RTC DS3231) y memoria MicroSD para datalogging local, 2) migrar el transceptor a módulos XBee® PRO o LoRa (SX1276) para incrementar el alcance de RF a varios kilómetros y 3) diseñar una tarjeta de circuito impreso (PCB) dedicada que optimice el espacio y reduzca aún más el consumo parásito.

Este proyecto sienta una base experimental en el diseño de estaciones meteorológicas autónomas, eficientes y de bajo costo. Se aclara que no constituye una estación meteorológica profesional.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Juan del Río y a la Universidad de Cundinamarca por el apoyo recibido para la realización del presente proyecto de desarrollo tecnológico mismo que fortalece el vínculo académico entre ambas Instituciones públicas de educación superior.

7. Referencias

Al-Okby, M. F. R., Roddelkopf, T., Fleischer, H., & Thurow, K. (2022). Evaluating a novel gas sensor for ambient monitoring in automated life science laboratories. *Sensors*, 22(21), Article 8161. https://doi.org/10.3390/s22218161

Babiuch, M., Foltynek, P., & Smutny, P. (2022). Using the ESP32 microcontroller for data processing and IoT environmental monitoring. IEEE Access, 10, 45120–45132. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3169842

Cruz, L., & Choque, J. (2018). *Desarrollo de una estación meteorológica automática* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Cuyo]. BDigital UNCUYO. https://bdigital.uncu.edu.ar/12862

DIGI International. (2021). *XBee®/XBee-PRO® S1 802.15.4 RF Modules User Guide*. Digi International Inc. https://www.digi.com/resources/documentation/digidocs/pdfs/90000982.pdf

García, L., Parra, L., Jiménez, J. M., Lloret, J., & Lorenz, P. (2022). Practical design of a low-cost wireless sensor network for precision agriculture in 2.4 GHz ISM band. *Sensors*, 22(11), Article 4007. https://doi.org/10.3390/s22114007

International Organization for Standardization. (1975). *Standard atmosphere* (Norma ISO No. 2533:1975). ISO.

International Organization for Standardization. (2002). *Lighting of work places* - Part 1: Indoor (Norma ISO No. 8995-1:2002). ISO.

Kusriyanto, M., & Putra, B. D. (2023). Design and implementation of solar-powered LoRa wireless weather station for remote agricultural areas. Journal of Robotics and Control (JRC), 4(3), 315–323. https://doi.org/10.18196/jrc.v4i3.18142

Leelavinodhan, P., Vecchio, M., Antonelli, F., Maestrini, A., & Brunelli, D. (2021). Design and implementation of an energy-efficient weather station for wind data collection. *Sensors*, 21(11), Article 3831. https://doi.org/10.3390/s21113831

LITEON® Optoelectronics. (2016). LTR390 Optical sensor [Hoja de datos]. https://optoelectronics.liteon.com/upload/download/DS86-2015-0004/LTR-390UV_Final_%20DS_V1%201.pdf

Mabrouki, J., Azrour, M., Fattah, G., Dhiba, D., & El Hajjaji, S. (2022). Intelligent monitoring system for biogas and meteorological parameters based on IoT. Environmental Science and Pollution Research, 29, 2568–2579. https://doi.org/10.1007/s11356-021-15843-w

Organización de Aviación Civil Internacional. (1993). *Manual de la atmósfera estándar de la OACI* (Doc 7488/3, 3.ª ed.). OACI.

Organización Mundial de la Salud. (2002). Índice UV solar mundial: Guía práctica. World Health Organization. https://iris.who.int/handle/10665/42600

Park, D.-H., Oh, S.-T., & Lim, J.-H. (2019). Development of a UV index sensor-based portable measurement device with the EUVB ratio of natural light sensors. Sensors, 19(4), Article 754. https://doi.org/10.3390/s19040754

Parra, L., Rocher, J., Sendra, S., & Lloret, J. (2023). Design and deployment of a smart system for data gathering in estuaries using wireless sensor networks. Sensors, 23(12), Article 5384. https://doi.org/10.3390/s23125384

Ricaldi, J., & Andrade, L. (2022). Design of a weather station with IoT in the wetlands of the District of Ventanilla Callao. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 12(9), 35–42. https://doi.org/10.46338/ijetae0922_04

Secretaría de Economía. (2013). *Estaciones meteorológicas, climatológicas y de la red hidrológica nacional - Requisitos y especificaciones* (Norma Mexicana NMX-AA-166/1-SCFI-2013). Diario Oficial de la Federación.

Sendra, S., García, L., Lloret, J., Bosch, I., & Vega-Rodríguez, R. (2023). LoRaWAN network for fire monitoring in rural environments. Electronics, 12(3), Article 536. https://doi.org/10.3390/electronics12030536

Sensirion AG. (2022). SGP41 Indoor air quality sensor for VOC and NOx measurements [Hoja de datos]. https://sensirion.com/media/documents/5FE8673C/61E96F50/Sensirion_Gas_Sensors_Datasheet_SGP41.pdf

Shape Optics Technologies. (s.f.). JGS1 vs JGS2 vs JGS3 Optical Quartz Glass. Recuperado el 02 de noviembre de 2026, de https://sot.com.sg/optical-quartz-glass/

World Meteorological Organization. (2021). Guide to instruments and methods of observation (WMO-No. 8). WMO. https://library.wmo.int/idurl/4/41650

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 88-99

ISSN: 2992-7315

Optimizadores estocásticos adaptativos en Visión Computacional: una revisión sistemática

Stochastic adaptive optimizers in Computer Vision: a systematic review

Marcela de los Ángeles Yanes-Pérez [a], José Adán Hernández-Nolasco [a] and Miguel A. Wister [a]

[a] *División Académica de Ciencias y Tecnologías de la Información, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, 86690, Cunduacán, Tabasco, México*

Resumen

Esta revisión sistemática sintetiza la evidencia sobre el comportamiento de los optimizadores estocásticos adaptativos en Visión Computacional con redes neuronales profundas. Siguiendo PRISMA, se buscó en Web of Science, IEEE Xplore y SpringerLink (701 registros, enero de 2020–junio de 2026) y 79 estudios cumplieron los criterios de elegibilidad. Adam fue el comparador predominante (97.5%) y se reportó como el de mejor desempeño en el 29.9% de sus evaluaciones, proporción cercana a la esperable si los optimizadores fueran equivalentes; AdamW y AdaGrad, en el 64.7% (11 de 17) y el 35.7% (10 de 28). Estas proporciones provienen de estudios con arquitecturas, datos y configuraciones distintos; describen tendencias del corpus y no una comparación experimental común. Desde 2023, AdamW aparece recurrentemente entre los reportados con más frecuencia como de mejor desempeño, incluidos 7 de 14 estudios con Vision Transformer. El ámbito médico representó el 41.8% de los estudios y Vision Transformer solo el 17.7%, lo que sugiere una brecha en la evidencia. Los resultados no muestran que un optimizador sea superior en todos los contextos; su selección debe fundamentarse empíricamente.

Palabras clave: optimizadores adaptativos, aprendizaje profundo, visión computacional, redes neuronales convolucionales, revisión sistemática

Abstract

This systematic review synthesizes the evidence on the performance of adaptive stochastic optimizers in Computer Vision using deep neural networks. Following the PRISMA guidelines, we searched Web of Science, IEEE Xplore, and SpringerLink (701 records, January 2020–June 2026), and 79 studies met the eligibility criteria. Adam was the predominant comparator (97.5%) and was reported as the best-performing optimizer in 29.9% of its evaluations, a proportion close to what would be expected if the optimizers were equivalent; AdamW and AdaGrad were reported as the best-performing optimizers in 64.7% (11 out of 17) and 35.7% (10 out of 28) of their evaluations, respectively. These proportions come from studies with different architectures, data, and configurations; they describe trends in the corpus rather than a common experimental comparison. Since 2023, AdamW has repeatedly appeared among the optimizers most frequently reported as best-performing, including in 7 out of 14 studies using Vision Transformer. The medical field accounted for 41.8% of the studies, while Vision Transformer accounted for only 17.7%, suggesting a gap in the evidence. The results do not show that any single optimizer is superior in all contexts; its selection must be based on empirical evidence.

Keywords: adaptive optimizers, deep learning, computer vision, convolutional neural networks, systematic review

*Autor para la correspondencia: adan.hernandez@ujat.mx
Correo electrónico: marcelayanesperez@gmail.com (Marcela de los Ángeles Yanes-Pérez), adan.hernandez@ujat.mx (José Adán Hernández-Nolasco), miguel.wister@ujat.mx (Miguel A. Wister)

Historial del manuscrito: recibido el 04/10/2026, última versión-revisada recibida el 29/10/2026, aceptado el 12/11/2026, publicado el 24/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.24503641

1. Introduction

Computer Vision (CV) has become one of the most active areas of deep learning (DL), largely because it can automate complex visual tasks in scientific, industrial, and social contexts. DL model performance in CV does not depend solely on architecture or dataset: the training process and optimization algorithm, in particular, are methodologically relevant dimensions that influence convergence speed, learning stability, and the model's generalization capacity. A frequent practice in the literature is to adopt Adam, SGD, or RMSProp as default configurations without always justifying that choice against more recent alternatives.

This practice makes it hard to tell whether reported improvements stem from the architecture, preprocessing, data augmentation, the image dataset, or the optimization algorithm. It also limits comparison across studies, especially when results span different domains such as medical imaging, agriculture, remote sensing, autonomous driving, industrial inspection, and visual security.

1.1 Foundations of stochastic optimization

Training a deep neural network involves minimizing a loss function with respect to a set of parameters: the model weights are iteratively adjusted to reduce the error between predictions and expected outputs. The stochastic approximation approach estimates gradients from subsets of the data, which makes training on large datasets feasible without computing the exact gradient over the whole sample at every iteration (Robbins & Monro, 1951).

Stochastic gradient descent (SGD) builds on this principle by updating parameters with the gradient computed on mini-batches, reducing computational cost and serving as a fundamental methodological basis for supervised learning with neural networks (LeCun et al., 1998). However, SGD relies on a single global learning rate, which can hamper training when parameter dimensions differ in scale, curvature, or update frequency.

Momentum accelerates convergence and reduces oscillations by incorporating information from previous updates to smooth the optimization trajectory, which is especially useful on loss surfaces with steep ravines or noisy gradients (Polyak, 1964). Even so, SGD and its momentum variants retain a central limitation: the learning rate is not adapted individually to each parameter.

This limitation motivates adaptive methods, which adjust the magnitude of each update based on each parameter's historical gradient information. This property is particularly relevant in deep architectures, where layers, filters, or attention components can show highly heterogeneous learning dynamics during training.

1.2 The family of adaptive optimizers

AdaGrad was one of the first widely used methods to adapt the learning rate per parameter.

It accumulates the squares of past gradients and uses them to reduce the step size for parameters that have received large or frequent gradients (Duchi et al., 2011). This is advantageous for problems with sparse features, but it can shrink the learning rate excessively as training progresses. RMSProp addresses this drawback by replacing the full accumulation with an exponential moving average of the squared gradient, which keeps the adaptation more stable across iterations (Tieleman & Hinton, 2012).

Adam combines first-order momentum with adaptive normalization based on the gradient's second moment (Kingma & Ba, 2015). Its widespread adoption has made it a standard experimental reference, although it is not always the best alternative for every architecture.

Several variants address limitations of the original Adam formulation. AMSGrad modifies the computation of the second moment to resolve convergence issues observed in specific scenarios (Reddi et al., 2018); AdamW decouples weight decay from the adaptive gradient update to improve regularization and generalization (Loshchilov & Hutter, 2019); and RAdam rectifies the variance of the adaptive learning rate during the first iterations to stabilize the early phase of training (Liu et al., 2020).

Other proposals follow alternative update mechanisms: AdaBelief scales the step according to the discrepancy between the observed gradient and its expected value, so that the update depends on the "belief" in the gradient direction (Zhuang et al., 2020). In contrast, Lion bases its updates on the gradient sign, reducing memory consumption compared with methods that store second-order moments (Chen et al., 2023).

1.3 Adaptive optimization in computer vision

In CV, an optimizer's behavior can depend on the visual task, architecture, and application domain. Convolutional neural networks (CNNs) have been fundamental for learning visual representations and remain widely used in image classification, detection, and segmentation (LeCun et al., 1998).

Large visual datasets have enabled systematic comparisons of deep models in image recognition (Deng et al., 2009), and, more recently, Vision Transformers (ViT) have expanded the architectural repertoire by bringing attention mechanisms to visual processing (Dosovitskiy et al., 2021).

Comparing optimizers in DL is not trivial, because results can change with the learning rate, batch size, number of epochs, regularization, initialization, and evaluation criterion. Choi et al. (2019) noted that empirical comparisons between optimizers require careful control of experimental conditions, and Schmidt et al. (2021) showed that optimizers' relative performance can vary by problem and training setting. Therefore, in CV it is not advisable to assume that one optimizer is universally superior. This heterogeneity is also reflected in the applications where optimizers are evaluated, which range from medical imaging to agriculture, remote sensing, and geosciences.

1.4 Research gap and objective

Although some works address optimization in DL in general terms, to the best of our knowledge, the empirical evidence on adaptive stochastic optimizers applied to CV tasks with deep neural networks has not been the subject of an up-to-date systematic synthesis under the PRISMA statement (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses; Page et al., 2021a, 2021b) for the period 2020–June 2026. Therefore, this review synthesizes empirical evidence published in this domain between January 2020 and June 2026, analyzing how adaptive stochastic optimizers have been evaluated and which report the best relative performance across application domains, visual tasks, and network architectures.

2. Materials and Methods

This review followed the PRISMA statement (Page et al., 2021a, 2021b), which provides a reproducible framework for identifying, screening, assessing eligibility, and synthesizing evidence.

2.1 Review design

We aimed to synthesize empirical evidence on adaptive stochastic optimizers in CV tasks with deep neural networks. Given the heterogeneity of architectures, datasets, visual tasks, performance metrics, and training configurations among the included studies, no meta-analysis was performed. Instead, we conducted a descriptive and comparative synthesis based on frequencies, percentages, thematic cross-tabulations, and the relative frequency of best performance per optimizer. Although not an adaptive method, we included SGD as a reference comparator because it is widely used in the reviewed studies.

2.2 Research questions

The systematic review was guided by the following research questions (RQs):

- **RQ1.** Which adaptive stochastic optimizers have been empirically evaluated in CV tasks with deep neural networks between January 2020 and June 2026?
- **RQ2.** Which optimizers report the best relative performance within the included studies?
- **RQ3.** How is the evidence distributed across application domains, visual tasks, and network architectures?
- **RQ4.** What temporal trends are observed in the evaluation of adaptive stochastic optimizers over the period analyzed?
- **RQ5.** Which methodological gaps remain open for future research on adaptive optimization in CV?

2.3 Information sources and search strategy

Three bibliographic databases with international coverage in computer science and engineering were searched: Web of Science (WoS), IEEE Xplore, and SpringerLink. The search strings were built from two conceptual blocks joined by the AND operator: the first groups the main adaptive stochastic optimizers and their variants, and the second delimits CV tasks with deep neural networks. The string used in WoS was:

```
  TS=("adaptive optimizer" OR
"stochastic optimizer" OR "Adam
optimizer" OR "AdamW" OR "AdaGrad" OR
"RMSProp" OR "AMSGrad" OR "RAdam" OR
"AdaBelief" OR "Lion optimizer") AND
TS=("image classification" OR
"computer vision" OR "deep learning"
OR "convolutional neural network" OR
"CNN" OR "vision transformer" OR
"ViT")
```

Equivalent strings were adapted to the syntax of IEEE Xplore (Abstract field) and SpringerLink (Keywords with discipline filters). We conducted the searches in June 2026 and restricted them to January 2020–June 2026 and to original research articles in English. In WoS, category filters were applied (Computer Science, Engineering, and Mathematics); in IEEE Xplore, only the Journal Articles option was selected; and in SpringerLink, the disciplines Computer Science and Engineering were used, with the subdisciplines Artificial Intelligence and Computer Vision.

2.4 Eligibility criteria

The inclusion criteria (IC) and exclusion criteria (EC) were defined a priori and are detailed below. Table 1 summarizes them.

Table 1: Inclusion and exclusion criteria

Code	Criterion description
IC1	Original research articles published in peer-reviewed scientific journals indexed in WoS, IEEE Xplore, or SpringerLink.
IC2	Articles published between January 2020 and June 2026.
IC3	Articles written in English.
IC4	The article empirically evaluates at least one adaptive stochastic optimizer (Adam, AdamW, AdaGrad, RMSProp, AMSGrad, RAdam, AdaBelief, Lion, or a derived variant) in a CV task with deep neural networks (classification, detection, segmentation, recognition, or image analysis using CNNs, ViTs, or hybrid architectures), through direct comparison, a proposed improved variant, or an analysis of the optimizer's effect on model performance.
IC5	The article reports at least one quantitative performance metric (accuracy, F1-score, AUC-ROC, precision, recall, mAP, IoU, Dice, or validation loss) that allows assessing the optimizer's behavior on the visual task studied.
EC1	Literature reviews, surveys, meta-analyses, conference papers, book chapters, editorials, letters to the editor, abstracts, and preprints without formal publication.

EC2	Articles whose main application domain is not CV: natural language processing, time series, non-visual biomedical signals (ECG, EEG), numerical prediction, recommendation, or general regression.
EC3	Articles in which the optimizer appears only as an implementation detail, without explicit comparison with alternatives or analysis of the optimizer's impact on model performance.
EC4	Duplicate records not removed during automatic deduplication, identified during manual screening by title, authors, and year of publication.
EC5	Articles in languages other than English, or whose full text could not be retrieved after two attempts through institutional resources and contact with the authors.

Note. IC = inclusion criterion; EC = exclusion criterion. Reporting the learning rate, batch size, or other implementation decisions does not, by itself, amount to an optimizer comparison (see EC3).

2.5 Synthesis methods

Since the 79 included studies showed substantial heterogeneity in network architectures, datasets, visual tasks, performance metrics, and training configurations, no quantitative meta-analysis was performed. Instead, a narrative and descriptive synthesis was carried out following the SWiM guideline (Synthesis Without Meta-analysis; Campbell et al., 2020).

The synthesis was organized around four dimensions: (1) evaluation frequency per optimizer, calculated as the number of articles in which each optimizer was included as a comparator; (2) best-performance rate, defined as the ratio between the number of best-performance cases and the number of evaluations of each optimizer, expressed as a percentage; (3) thematic distribution by application domain, visual task, and network architecture; and (4) temporal trend of the most frequent best-performing optimizer by publication year.

The cross-tabulations between best-performing optimizer, domain, and architecture were built from the audited extraction matrix, which is provided in full as Supplementary File 1 (the list of the 79 included studies is given in Appendix D). Cells corresponding to ties or mixed results between two or more optimizers, as well as articles in which the best-performing optimizer was not reported clearly enough (NR), were recorded as separate categories and were not counted as a best-performance case for any optimizer. However, the corresponding evaluations were kept in the denominator of each evaluated optimizer.

2.6 Selection process

The records retrieved from the three databases were imported into Zotero (version 7), where duplicates were removed through automatic deduplication followed by manual review. Screening was carried out in three consecutive phases: (1) screening by title and abstract, applying IC1–IC3 and EC1–EC5; (2) fine screening by extended abstract for records that did not allow a clear decision in the previous phase; and (3) eligibility assessment through full-text reading, in which compliance with IC4 and IC5 was verified.

The complete flow of identification, screening, retrieval, eligibility, and inclusion is presented in Figure 1, prepared in accordance with the PRISMA statement.

2.7 Data extraction

A structured extraction matrix was built for each of the 79 included studies with the following fields: internal identifier (Matrix ID), authors and year, title, journal, DOI, application domain, main visual task, network architectures used, dataset, dataset size, optimizers evaluated, type of optimizer evaluation (direct comparison, proposed variant, or hyperparameter analysis), best-performing optimizer according to the main reported metric, performance metrics, key result, relevant experimental configuration (learning rate, batch size, scheduler), validation scheme, limitations reported by the authors, and inclusion note (justification of IC4/IC5).

In this article, "best performance" refers to the optimizer that the authors of each included study reported as obtaining the highest value on their main metric, under their own experimental conditions. It was extracted as reported and was not recalculated or verified through a common experimental comparison; therefore, it should not be interpreted as evidence that an optimizer is superior in general.

2.8 Methodological quality and reporting assessment

In accordance with PRISMA item 11, the methodological quality and reporting quality of the 79 included studies were assessed using a 15-item checklist adapted by the authors to the specific study domain (Supplementary Material, Appendix C). This checklist is not a validated risk-of-bias instrument; its scores should be read as an indicator of methodological and reporting quality, not as a strict measure of risk of bias. Each item was scored dichotomously (1 = met, 0 = not met or not reported), for a total possible score of 0-15, classified into three levels: high quality (12–15), moderate quality (8–11), and low quality (≤7).

3. Results

Of the 79 included studies, Adam was the most frequently evaluated optimizer (97.5%). It achieved the best performance in 29.9% of evaluations, while AdamW had the highest best-performance rate (64.7%), followed by Lion (60.0%, five evaluations) and AdaGrad (35.7%). These proportions come from different sets of studies and should be read as trends of the analyzed corpus, not as a common experimental comparison. All figures reported below were calculated from the extraction matrix (Supplementary File 1).

3.1 General characteristics and study selection

The selection process began with 701 records identified in WoS, IEEE Xplore, and SpringerLink. After removing 95 duplicates, 606 records were screened by title and abstract, of which 208 were excluded for not meeting the eligibility criteria.

Subsequently, 398 articles were sought for full-text retrieval; 261 (65.6%) could not be retrieved in full text after two attempts through institutional resources and contact with the authors (criterion EC5; the list is provided in Supplementary Material, Appendix E). The 261 articles not retrieved were distributed across all publication years (2020–2026) in a pattern similar to that of the 137 retrieved articles.

Reading the 137 retrieved full texts led to the exclusion of 58 additional articles and the retention of 79 articles for the final synthesis (Figure 1). Supplementary Material (Appendix A) presents the 58 articles excluded after full-text review, along with the reason for exclusion. The search strings adapted for WoS, IEEE Xplore, and SpringerLink are documented in Supplementary Material (Appendix B).

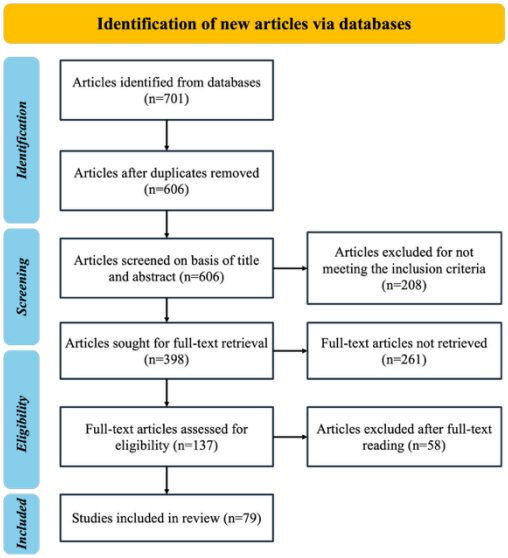


Figure 1: Flow diagram of the article selection process following PRISMA.

The selected articles were distributed across 38 peer-reviewed journals. IEEE Access accounted for the largest share of publications (n = 14; 17.7%), followed by Applied Sciences-Basel (n = 9; 11.4%), Mathematics (n = 7; 8.9%), and Ain Shams Engineering Journal and Electronics (n = 4 each; 5.1%).

IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems contributed three articles (3.8%). The diversity of publication sources suggests that research on adaptive stochastic optimization applied to CV is cross-disciplinary, spanning journals in AI, machine learning, engineering, applied mathematics, and computer science.

3.2 Temporal distribution of the evidence

Scientific output increased from 2022 onward, with 16 articles per year in 2022 and 2023, followed by a relatively stable trend in the later years. The eight articles counted for 2026 cover only the first half of the year because the search closed in June; annual output could therefore remain stable or increase toward year-end.

Table 2: Temporal distribution of the best-performing optimizer by year (2020–2026)

Year	N	Optimizer(s) with the best-performance cases	2nd	3rd
2020	5	RMSProp (3)	Adam (1)	Nadam (1)
2021	7	AdaGrad (2)	Adam (2)	RMSProp (1)
2022	16	Adam (4)	RMSProp (3)	SGD (3)
2023	16	Adam (6)	AdaGrad (3)	AdamW/ RMSProp (2)
2024	15	AdamW (4)	Adam (3)	SGD (3)
2025	12	Adam (5)	AdamW (3)	AdaGrad/ Lion/SGD (1)
2026*	8	Adam (2)	AdamW (2)	SGD (2)

Note. N = articles published per year; values in parentheses are articles in which the optimizer performed best on the main reported metric. *2026 covers publications up to June.

The temporal pattern does not show a single dominant optimizer. In 2020, RMSProp accounted for most of the reported cases, and in 2021 AdaGrad and Adam tied; from 2022, Adam was the optimizer with the most best-performance cases in three of the four full years (2022, 2023, and 2025), while AdamW led in 2024 and ranked among the top positions in 2023, 2025, and the first half of 2026, sharing the position with Adam or SGD in some years. This pattern is examined in more depth in Section 3.6.

3.3 Application domains and visual tasks

The medical domain was the largest category, accounting for 41.8% of included articles (n = 33). This group included studies on radiological image classification, tumor detection, skin lesion analysis, diabetic retinopathy diagnosis, magnetic resonance image processing, and infectious disease detection, as well as breast cancer, melanoma, pneumonia, and pathological image segmentation.

In these settings, the optimizer was evaluated alongside architectures such as CNN, ResNet, VGG, MobileNet, U-Net, and ViT, and metrics such as accuracy, sensitivity, specificity, AUC, F1-score, and loss were reported. Included studies such as Qureshi et al. (2022), Raiaan et al. (2023), Mehmood et al. (2025), Jozi and Al-Suhail (2025), and Aly et al. (2024) illustrate this concentration of the medical domain within the reviewed evidence. Among the most frequently used specific medical datasets were HAM10000 (n = 4), BraTS (n = 3), BR35H (n = 3), ISIC (n = 3), and EyePACS (n = 2), which suggests a relevant concentration of studies in dermatology, neuroimaging, and medical ophthalmology (Figure 2).

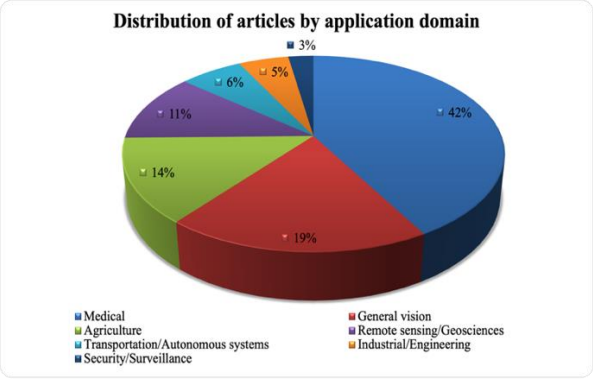


Figure 2: Distribution of articles by application domain.

The medical domain was the most represented category, although it did not account for the majority of the corpus. A further 19.0% of the articles (n = 15) were classified as general computer vision: studies that propose or benchmark optimizers on generic datasets such as CIFAR, MNIST, or ImageNet, without a specific application domain. Studies in agriculture, remote sensing, engineering, transportation, and security show that optimizer analysis extends beyond computer-aided diagnosis to multiple CV contexts.

Table 3: Distribution by application domain and best-performing optimizers

Domain	N	%	1st best	2nd best	3rd best
Medical	33	41.8%	Adam (10)	SGD (8)	AdamW (6)
General vision	15	19.0%	AdaGrad (5)	Adam/AdamW (3)	AdaCB/MRGD Adam/SGD(1)
Agriculture	11	13.9%	Adam (4)	RMSProp (3)	Nadam (2)
Remote sensing/ Geosciences	9	11.4%	RMSProp (3)	Adam (2)	AdaGrad /AdamW /Lion (1)
Transportation/ Autonomous systems	5	6.3%	Adam (2)	AdaGrad/ AdamW/RMSProp (1)	—
Industrial/ Engineering	4	5.1%	Adam (1)	AdaGrad (1)	Lion (1)
Security/ Surveillance	2	2.5%	AdaGrad (1)	Adam (1)	—

Note. N = included articles; values in parentheses are articles where the optimizer performed best in that domain.

Agriculture accounted for 13.9% of the articles (n = 11), with articles on pest detection, plant disease classification, tomato leaf diseases, nematodes, fruit recognition, and pathogen detection in crops using deep models trained with different optimizers. Studies such as Saedi and Khosravi (2020), Wang et al. (2020), Saranya et al. (2023), Shabrina et al. (2023), Athira and Hemalatha (2026), and Jagdev et al. (2025) incorporated optimizer selection as an experimental variable in agricultural visual inspection scenarios.

Remote sensing and geosciences grouped nine publications (11.4%), including thin-section rock classification and satellite image analysis; studies such as Polat et al. (2021), Li et al. (2022), Cenet et al. (2025), Song et al. (2023), Yang et al. (2026), and Jawahar et al. (2023) provide evidence of the use of adaptive optimization in hyperspectral images, thin sections, and geospatial visual analysis.

In these domains, the best-performing optimizers varied (RMSProp led in remote sensing, and Adam in agriculture and medicine), suggesting that an optimizer's relative performance may depend on image type, architecture, and the primary evaluation metric.

For visual tasks, image classification predominated in 78.5% of articles (n = 62), followed by visual detection tasks (63.3%; n = 50), often combined with classification. Visual recognition (30.4%; n = 24) and semantic segmentation (15.2%; n = 12) were identified to a lesser extent. This distribution is consistent with the historical evolution of CV benchmarks, in which image classification has served as a reference task since ImageNet (Deng et al., 2009).

3.4 Datasets and architectures

The most frequently documented datasets or reference sources were ImageNet (n = 40; 50.6%), Kaggle repositories (n = 23; 29.1%), CIFAR-10 (n = 16; 20.3%), and MNIST (n = 14; 17.7%). ImageNet's presence should be interpreted as both a reference dataset and a frequent source of pretraining for deep architectures.

This distribution suggests a methodological preference for standardized benchmarks and widely accessible repositories, which favors reproducibility and comparison across optimization algorithms. In contrast, eight publications (10.1%) used their own image collections or collections strictly tied to a particular domain, which introduces additional challenges for assessing the generalization of the reported results.

Table 4 presents the most frequent deep neural network architectures and the best-performing optimizer within each group. The ResNet family was the most used architecture (n = 62; 78.5%), followed by generic CNN configurations (n = 60; 75.9%) and classic architectures such as VGG (n = 54; 68.4%), MobileNet (n = 35; 44.3%), and AlexNet (n = 33; 41.8%). ViT-based models were identified in 14 articles (17.7%), a low proportion considering the growing influence of these architectures in CV since the work of Dosovitskiy et al. (2021). Likewise, Swin Transformer and ConvNeXt still appeared with limited presence in the corpus, with seven (8.9%) and three (3.8%) studies, respectively.

Table 4: Deep neural network architectures and most frequent best-performing optimizer by architecture

Architecture	N	%	Top optimizer	2nd	3rd
ResNet	62	78.5%	Adam (15)	AdamW (10)	RMSProp (9)
CNN (generic)	60	75.9%	Adam (16)	AdaGrad/ RMSProp (10)	AdamW (7)
VGG	54	68.4%	Adam (16)	SGD (8)	RMSProp (7)
MobileNet	35	44.3%	Adam (11)	AdamW/ SGD (5)	RMSProp (4)
AlexNet	33	41.8%	Adam (12)	AdamW (5)	AdaGrad/ RMSProp /SGD (4)
Inception	32	40.5%	Adam (10)	RMSProp (8)	SGD (6)
DenseNet	27	34.2%	Adam (6)	AdaGrad/ AdamW (4)	RMSProp /SGD (3)
U-Net	19	24.1%	Adam (7)	AdamW (4)	SGD (3)
EfficientNet	18	22.8%	Adam (5)	AdamW (4)	SGD (3)
YOLO	15	19.0%	Adam (4)	AdamW/ SGD (3)	AdaGrad/ Lion/ Nadam/ RMSProp (1)
Xception	15	19.0%	Adam (6)	RMSProp (4)	SGD (2)
ViT	14	17.7%	AdamW (7)	Adam (4)	SGD (2)
Swin Transformer	7	8.9%	AdamW (4)	Adam/ Lion/ SGD (1)	—
ConvNeXt	3	3.8%	AdamW (3)	—	—

Note. N indicates the number of articles in which each architecture appears.

The architecture pattern showed differences. In ViT, AdamW was reported as the best-performing optimizer in seven of 14 articles (50.0%). In Swin Transformer, it was reported as best-performing in four of seven articles (57.1%), and in all three ConvNeXt articles.

Although these subsets are small and do not allow definitive generalizations, the results suggest a possible empirical affinity between AdamW and attention-based or recently designed architectures. In contrast, in classic convolutional architectures such as ResNet, VGG, and AlexNet, Adam was the most frequent best performer (15 of 62, 16 of 54, and 12 of 33 articles, respectively), although in only 24% to 36% of them, with the remaining cases distributed among AdamW, SGD, RMSProp, and AdaGrad.

Overall, ResNet, CNN, VGG, MobileNet, AlexNet, Inception, and DenseNet appeared more frequently than transformer-based models, suggesting that most evaluations focused on convolutional or derived architectures. This distribution matters because optimizers may behave differently across convolutional architectures, attention-based networks, and hybrid models.

3.5 Optimizers evaluated and best-performance rates

Table 5 presents how often each optimizer was evaluated in the included articles, along with its best-performance rate. The latter was defined as the percentage of studies in which an optimizer was reported as the best-performing one, considering only those in which that optimizer was evaluated and taking as reference the main metric declared by the authors.

Table 5: Optimizers evaluated, comparators, and best-performance rates

Optimizer	Times evaluated	% of articles	Best-performance cases	Best-performance rate
Adam	77	97.5%	23	29.9%
SGD	71	89.9%	10	14.1%
RMSProp	60	75.9%	10	16.7%
AdaGrad	28	35.4%	10	35.7%
Nadam	19	24.1%	3	15.8%
AdamW	17	21.5%	11	64.7%
Adamax	14	17.7%	0	0.0%
RAdam	9	11.4%	0	0.0%
AMSGrad	8	10.1%	0	0.0%
Lion	5	6.3%	3	60.0%
AdaBelief	4	5.1%	0	0.0%
AdaCB	1	1.3%	1	100.0%
MRGDAdam	1	1.3%	1	100.0%
HDAdam	1	1.3%	0	0.0%
Tie/mixed	—	—	5	—
Not reported (NR)	—	—	2	—

Note. Rate = (best-performance cases/times evaluated) × 100. Highlighted: optimizers with ≥5 evaluations and a rate above 55%. Ties/mixed results (n = 5) and not-reported cases (NR, n = 2) count as no optimizer's win, but their evaluations remain in the denominator. Single-evaluation rates (AdaCB, MRGDAdam, HDAdam) are not interpretable; AdaCB and MRGDAdam were proposed by the original authors.

Adam was evaluated in 77 of the 79 included articles (97.5%), making it the most frequently referenced comparator in the analyzed set. It achieved the best relative performance in 23 of those evaluations (29.9%), which is close to the expected number if the optimizers compared in each study were equivalent (23.1 expected cases; see the reference below), so its wide adoption did not translate into a consistent advantage in the reported comparisons. AdamW, evaluated in 17 articles (21.5%), had the highest best-performance proportion among the optimizers with more than ten evaluations: 11 of 17 cases (64.7%).

Its best results were distributed across the medical domain (6 cases), general computer vision (3), remote sensing (1), and transportation (1), and were frequent in modern architectures, including those based on attention mechanisms. AdaGrad, with 28 evaluations (35.4%), obtained the best performance in 10 of them (35.7%), with five cases in general computer vision studies and isolated cases in agriculture, industrial imaging, remote sensing, transportation, and security, and none in the medical articles. Lion (Chen et al., 2023) appeared in five articles (6.3%) and was reported as the best-performing optimizer in three of them (60.0%).

Although the size of this subset was small, its relative performance positions Lion as an emerging optimizer of interest, especially in tasks such as cell nucleus segmentation (Chen et al., 2025), defect detection in photovoltaic panels (Elbedwehy et al., 2026), and hyperspectral classification (Song et al., 2023). In contrast, Adamax, RAdam, AMSGrad, and AdaBelief did not obtain the best performance in any of the articles in which they were evaluated, a result interpreted in Section 4.1.

As a descriptive reference, if the optimizers compared in each study were equivalent, the expected number of best-performance cases for each optimizer would be the sum, over the studies in which it was evaluated, of one divided by the number of optimizers compared in that study. Under this reference, the observed cases were close to the expected ones for Adam (23 observed, 23.1 expected) and Nadam (3 and 3.2), below them for SGD (10 and 19.6) and RMSProp (10 and 15.8), and above them for AdamW (11 and 4.1), AdaGrad (10 and 5.5), and Lion (3 and 1.9). This reference is not a statistical test and ignores differences in architectures, datasets, metrics, and configurations across studies; it is offered only to contextualize the proportions in Table 5.

AdaCB, MRGDAdam, and HDAdam appeared with a single evaluation each, so their proportions are not interpretable. Overall, these results show that the most widely used optimizers were not always those that reported the best relative performance. This difference takes on an additional dimension when the temporal and architectural patterns are analyzed, as developed in the following subsection.

3.6 Temporal trend of the best-performing optimizer

Table 2, presented in Section 3.2, does not suggest a single linear transition among the best-performing optimizers. In 2020, RMSProp accounted for most of the reported cases (3 of 5 articles), and in 2021 AdaGrad and Adam tied (two cases each).

From 2022, Adam led in the best-performing cases in three of the four full years (four cases in 2022, six in 2023, and five in 2025), which coincided with the frequent use of classic convolutional architectures.

AdamW led in 2024 (four cases) and also ranked among the top positions in 2023 (two cases), 2025 (three cases), and the first half of 2026 (two cases, tied with Adam and SGD). This pattern may be interpreted as a sign of the growing adoption of variants with explicit decoupling of regularization, especially in modern architectures and in scenarios where training is more sensitive to hyperparameter configuration.

However, the number of cases per year is small. As a methodological complement for interpreting these trends, the validation schemes reported by the included articles were reviewed. The train/test split was the most common scheme (n = 77; 97.5%), followed by an explicit validation set (n = 27; 34.2%) and k-fold cross-validation (n = 19; 24.1%). Only five articles used external validation on independent datasets (6.3%), which should be considered when interpreting the optimizer's reported generalization.

3.7 Synthesis by research question

This subsection integrates the findings of the previous sections with the five research questions that guided the systematic review.

RQ1. Which adaptive stochastic optimizers have been empirically evaluated in CV tasks with deep neural networks between January 2020 and June 2026?

The included articles identified fourteen distinct optimizers (Table 5). Adam (97.5%, n = 77), SGD (89.9%, n = 71), and RMSProp (75.9%, n = 60) appear in most articles and, in practice, serve as near-mandatory reference comparators in the experimental design of the reviewed studies. AdaGrad (35.4%, n = 28), Nadam (24.1%, n = 19), AdamW (21.5%, n = 17), and Adamax (17.7%, n = 14) appear with a notable but much smaller presence. At the opposite end, more recent variants such as Lion (6.3%, n = 5) and AdaBelief (5.1%, n = 4) are scarcely evaluated within the analyzed set. This asymmetric distribution suggests that the research community's experimental attention remains concentrated on classic optimizers. At the same time, more recent proposals, despite their theoretical grounding and growing adoption in other areas of DL, still lack a comparable empirical base in the specific domain of CV.

RQ2. Which optimizers report the best relative performance within the included articles?

Considering the proportion of articles in which each optimizer was reported as the best performer, defined in Section 2.5 as the ratio between the number of best-performance cases and the number of evaluations of each optimizer, AdamW shows the highest proportion (64.7%, 11 cases in 17 evaluations), followed by Lion (60.0%, 3 cases in 5 evaluations) and AdaGrad (35.7%, 10 cases in 28 evaluations) (Table 5).

Adam shows a lower proportion (29.9%) despite its near-universal evaluation, which is close to the proportion expected if all compared optimizers were equivalent, as examined in Section 4. These proportions come from different numbers of evaluations and heterogeneous studies, so they describe trends of the analyzed corpus and do not establish the superiority of any optimizer. Adamax, RAdam, AMSGrad, and AdaBelief did not achieve the best performance in any article in which they were evaluated, a result interpreted with caution in Section 4.1 given the small number of evaluations available for several of these optimizers.

RQ3. How is the evidence distributed across application domains, visual tasks, and network architectures?

The evidence is unevenly distributed across application domains, visual tasks, and network architectures (Tables 3 and 4). The medical field accounts for 41.8% of the articles (n = 33), followed by general vision (19.0%, n = 15), agriculture (13.9%, n = 11), remote sensing and geosciences (11.4%, n = 9), transportation/autonomous systems (6.3%, n = 5), industrial/engineering (5.1%, n = 4), and security/surveillance (2.5%, n = 2). By visual task, image classification predominates (78.5%, n = 62), followed by object detection (63.3%, n = 50), recognition (30.4%, n = 24), and semantic segmentation (15.2%, n = 12). By architecture, ResNet, generic CNNs, and VGG are the most frequent, while ViT appears in only 17.7% of the articles (n = 14) despite its growing influence in recent CV benchmarks and models. This uneven distribution has a direct implication for RQ2: given that AdamW concentrates its highest best-performance proportions in attention-based architectures, and that the medical domain is led by Adam, SGD, and AdamW, the available evidence does not allow determining whether the advantage of AdamW reflects an intrinsic property of the optimizer or the thematic concentration of the analyzed articles in those particular contexts.

RQ4. What temporal trends are observed in the evaluation of adaptive stochastic optimizers over the analyzed period?

The number of articles grew steadily from 2022 onward, reaching 16 publications in both 2022 and 2023 (Table 2). The distribution of the most frequent best-performing optimizer by year does not show a single linear transition: RMSProp led in 2020, AdaGrad and Adam tied in 2021, and Adam had the most best-performance cases in 2022, 2023, and 2025; AdamW led in 2024 and appears recurrently among the most frequent best-performing optimizers from 2023 onward, sharing the position with Adam and SGD in the eight articles corresponding to the first half of 2026.

This temporal progression may relate to the growing adoption of AdamW in training attention-based architectures (Liu et al., 2021; Touvron et al., 2021) and large-scale multimodal models (Radford et al., 2021). However, the reviewed articles do not establish a causal relationship between the two phenomena, only a temporal coincidence, which is discussed in more detail in Section 4.1.

RQ5. Which methodological gaps remain open for future research on adaptive optimization in CV?

From the preceding analysis, four methodological gaps are identified that could guide future research in this field. The first concerns the evaluation of optimizers in ViT and related architectures, which account for only 17.7% of the articles despite their growing role in current classification benchmarks; given that AdamW was most frequently reported as the best-performing optimizer in the few evaluations available for these architectures, extending this line of evidence would help confirm or qualify that association.

The second refers to Lion, which has only five evaluations across the articles, a number insufficient to support generalizable recommendations. However, it was reported as best-performing in three of those five evaluations.

The third is the scarcity of external validation: only 6.3% of the articles used independent datasets, limiting the ability to assess the generalization capacity of the reported results. The fourth gap is cross-cutting: heterogeneity in architectures, datasets, learning rates, learning rate schedulers, and validation schemes hinders direct comparison across articles, so greater standardization in reporting experimental configurations would facilitate future quantitative syntheses in this field.

3.8 Methodological quality and reporting assessment

The assessment showed that 92.4% of the included articles (n = 73) reached the high-quality level, 7.6% reached the moderate level (n = 6), and no article scored ≤ 7. These results reflect the completeness of methodological reporting and should not be interpreted as a strict estimate of risk of bias. The mean score was 13.3/15. The items with the lowest compliance were 12, 4, and 15, related mainly to identifying study limitations, describing the image dataset used in detail, and linking the findings to prior literature in the discussion section, respectively. The full per-article detail is presented in Supplementary Material (Appendix C).

4. Discussion

The central finding is that frequency of use does not coincide with relative performance. Adam is the most evaluated optimizer in the set. Yet, it was reported as the best-performing optimizer in fewer than a third of its evaluations (29.9%), a proportion close to what would be expected if the compared optimizers were equivalent. This does not imply that Adam is ineffective; in the reviewed literature, it appears to serve mainly as a reference comparator.

Moreover, with an average of about four optimizers compared per article, Adam's 23 best-performance cases (29.9%) are close to the number expected if all optimizers were equivalent (23.1), so its rate does not, by itself, indicate inferiority or superiority. In other words, Adam is a reasonable starting point, but not necessarily the most competitive alternative under specific architecture, domain, and metric conditions.

In contrast, AdamW shows the most favorable relative results among the optimizers with a reasonable number of evaluations (64.7%), followed by AdaGrad (35.7%). This difference suggests that optimizer selection should not be treated as a secondary or routine decision in CV publications. Rather, the data suggest that the optimizer may influence final model performance, especially when combined with modern architectures, specialized datasets, or specific regularization and learning-rate scheduling schemes. However, the heterogeneity of the included studies prevents quantifying that influence.

4.1 Interpretation in the context of the literature and experimental practice

The findings align with prior debates about the limitations of adaptive methods. Although Adam has been widely adopted since its original formulation (Kingma & Ba, 2015), previous research has pointed out that adaptive optimizers do not always generalize better than simpler or explicitly regularized alternatives (Wilson et al., 2017). In this sense, the relative advantage observed for AdamW is coherent with the proposal to decouple weight decay from the adaptive gradient update, which allows more controlled regularization during training (Loshchilov & Hutter, 2019).

The prominent presence of AdamW in ViT, Swin Transformer, and ConvNeXt is also relevant. Although the number of articles on these architectures is still small, the pattern suggests that AdamW may be especially competitive in modern models sensitive to regularization and hyperparameter fine-tuning. However, this association must be interpreted with caution: the available evidence does not allow claiming causality, since the articles differ in datasets, sample sizes, schedulers, number of epochs, learning rates, and evaluation criteria.

AdaGrad also deserves attention. Although its mechanism of historical gradient accumulation can progressively reduce the effective learning rate (Duchi et al., 2011), it obtained the best result in 10 of 28 evaluations (35.7%), above the proportion expected under equivalence (19.5%), but with cases dispersed across general computer vision, agriculture, industrial, remote sensing, transportation, and security studies, and none in the medical articles.

This dispersion, together with the heterogeneity of the studies, does not allow identifying the conditions under which AdaGrad is competitive, and any interpretation requires controlled experimental validation. Adamax, RAdam, AMSGrad, and AdaBelief were never reported as the best performer in any article where they were evaluated (14, 9, 8, and 4 evaluations, respectively). This should be read with caution: they are usually included as secondary comparators, with few evaluations each, and their performance depends on each study's hyperparameter configuration.

Therefore, we cannot conclude that they are inferior to Adam or AdamW in CV. From a practical perspective, the results suggest no universally superior optimizer for CV. In medical, agricultural, industrial, or remote sensing applications, researchers should justify the optimizer choice empirically rather than defaulting to Adam.

For researchers and developers, this means reporting explicit comparisons, hyperparameters, schedulers, validation schemes, and metrics for each optimizer so results are reproducible and comparable.

4.2 Limitations of the evidence and potential biases

The synthesized evidence has strengths but also important limitations. The first is the methodological heterogeneity of the included articles. They differ in architecture, domain, dataset size, train/test split, main metric, and optimizer configuration.

This variability prevents direct quantitative comparisons across articles and limits the ability to formulate universal recommendations. A second limitation is the scarcity of external validation. Although most articles used train/test partitions, only a small proportion used independent datasets. This limits the ability to assess whether the reported advantages hold outside the original experimental set. In highly sensitive domains such as medical imaging, this limitation is especially relevant because internal performance may not adequately reflect clinical or institutional generalization.

Possible publication bias must also be considered. Articles in which a new or less conventional optimizer outperforms Adam are likely to be reported more often than those in which no relevant differences are observed. Therefore, Adam ranking as the best performer in a minority of comparisons (29.9%) should not be interpreted in isolation as definitive evidence of inferiority, but as an indication that its widespread adoption does not guarantee empirical superiority in all scenarios.

This systematic review was limited to WoS, IEEE Xplore, and SpringerLink, and to English-language articles published between January 2020 and June 2026. Excluding other databases such as Scopus, ACM Digital Library, or ScienceDirect may have omitted relevant publications. In addition, the definition of "best performance" depended on the main metric reported in each article, introducing variability across domains and tasks.

Moreover, 261 of the 398 articles sought (65.6%) could not be retrieved in full text and therefore could not be assessed for eligibility. If these results differ systematically from those of the 137 retrieved, the findings may be affected by selection bias, and the proportions reported here should be interpreted as trends in the retrieved corpus.

4.3 Implications and future directions

The results have theoretical and practical implications. Theoretically, they reinforce the need to study interactions among the optimizer, architecture, and application domain, rather than evaluating optimizers in isolation. The evidence suggests that AdamW could be particularly relevant in modern architectures and that Adam remains a competitive baseline in classic convolutional architectures.

Still, both observations require more controlled comparative studies. In practical terms, future research should avoid reporting the optimizer as an implementation detail.

The training configuration should be presented in sufficient detail, including learning rate, batch size, number of epochs, scheduler, regularization, best-model selection criterion, and validation scheme.

This would allow results to be compared more rigorously and would move the field toward more solid recommendations for specific CV tasks. Four priority research lines are identified. First, expand the evaluation of optimizers on ViT, Swin Transformer, ConvNeXt, and hybrid architectures, where evidence remains limited.

Second, studying emerging optimizers such as Lion in greater depth, whose relative performance was high but is based on few evaluations. Third, incorporating external validation and multicenter testing, especially in medical imaging. Fourth, promoting standardized experimental protocols that allow optimizers to be compared under controlled conditions.

5. Conclusions

This systematic review synthesized the empirical evidence on adaptive stochastic optimizers in CV with deep neural networks from 79 articles published between 2020 and June 2026, identified following the PRISMA statement in WoS, IEEE Xplore, and SpringerLink. The main findings are as follows. Adam is the most evaluated optimizer (97.5% of the articles) and obtains the best performance in 29.9% of its evaluations, a proportion close to the one expected if the optimizers compared in each study were equivalent (about 30%, with an average of four optimizers per article), so its widespread adoption does not appear to reflect a consistent empirical advantage according to the reviewed evidence. AdamW stands out with the highest best-performance proportion (64.7%), followed by Lion (60.0%, few evaluations) and AdaGrad (35.7%); these proportions come from different sets of studies and should be read as trends of the analyzed corpus.

AdamW was most frequently reported as best-performing in attention-based architectures (ViT and Swin Transformer) and in all three ConvNeXt evaluations, a modernized CNN with a transformer-inspired design; since 2023, it has appeared recurrently among the best-performing optimizers (leading in 2024), though it shares positions with Adam or SGD depending on the year. Lion was reported as best-performing in three of its five evaluations (60.0%); given how few evaluations exist, this is a gap in the available evidence.

The medical domain is the largest category, with 41.8% of included articles; within it, Adam, SGD, and AdamW are the optimizers most frequently reported as best, whereas in agriculture Adam and RMSProp compete more evenly. ViT appears in only 17.7% of articles despite being the reference architecture in current benchmarks, so evaluating optimizers on ViT and its variants is a further gap in the available evidence. From a practical perspective, the results suggest considering domain-specific empirical evidence, the architecture, and dataset characteristics before adopting Adam as the default configuration.

Future research should include AdamW as an additional baseline alongside Adam, systematically expand the evaluation of Lion across multiple domains and architectures, incorporate external validation schemes, and standardize the reporting of experimental configurations to facilitate quantitative synthesis.

The main conclusion is not that a universally superior optimizer exists, but that performance depends on interactions among architecture, domain, data, and experimental configuration.

Acknowledgements

The authors gratefully acknowledge the Secretariat of Science, Humanities, Technology and Innovation (SECIHTI) for the financial support provided through the doctoral scholarship awarded to the first author (CVU: 1131812) and for the resources contributed to the development of this research.

Data availability

Appendices A (excluded studies with reasons for exclusion), B (search strings by database), C (methodological quality assessment per article), D (list of the 79 included studies), and E (articles not retrieved in full text), together with the complete audited extraction matrix, are available as supplementary material.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest related to this article.

Author contributions

Marcela de los Ángeles Yanes-Pérez: conceptualization, methodology, investigation, data curation, formal analysis, visualization, writing – original draft, and writing – review and editing. José Adán Hernández-Nolasco: conceptualization, methodology, supervision, and writing – review and editing. Miguel A. Wister: conceptualization, methodology, supervision, and writing – review and editing. All authors have read and agreed to the final version of the manuscript.

Ethics approval

Not applicable. This investigation analyzed published literature and involved no human participants or sensitive data.

Declaration on the use of AI tools

The authors did not use generative artificial intelligence tools to produce the content of this article.

6. References

Aly, M., Ghallab, A., & Fathi, I. S. (2024). Tumor ViT-GRU-XAI: Advanced brain tumor diagnosis framework: Vision transformer and GRU integration for improved MRI analysis: A case study of Egypt. IEEE Access, 12, 184726–184754. https://doi.org/10.1109/access.2024.3513235

Athira, P. S., & Hemalatha, S. (2026). Cosine annealing scheduler added with momentum factor: Classification of tomato plant diseases. Ain Shams Engineering Journal, 17(7), Article 104218. https://doi.org/10.1016/j.asej.2026.104218

Campbell, M., McKenzie, J. E., Sowden, A., Katikireddi, S. V., Brennan, S. E., Ellis, S., Hartmann-Boyce, J., Ryan, R., Shepperd, S., Thomas, J., Welch, V., & Thomson, H. (2020). Synthesis without meta-analysis (SWiM) in systematic reviews: Reporting guideline. BMJ, 368, Article l6890. https://doi.org/10.1136/bmj.l6890

Cenet, R., Ünsal, E., & Canbaz, O. (2025). Classification of hydrothermal alteration types from thin-section images using deep convolutional neural networks. Applied Sciences, *15*(22), Article 12274. https://doi.org/10.3390/app152212274

Chen, X., Liang, C., Huang, D., Real, E., Wang, K., Pham, H., Dong, X., Luong, T., Hsieh, C.-J., Lu, Y., & Le, Q. V. (2023). Symbolic discovery of optimization algorithms. Advances in Neural Information Processing Systems, 36, 49205–49233. https://doi.org/10.52202/075280-2140

Chen, Z. P., Peng, S. L., Yang, R., Zhao, M., & Zhang, C. L. (2025). AL-Net: Adaptive learning for enhanced cell nucleus segmentation in pathological images. Electronics, 14(17), Article 3507. https://doi.org/10.3390/electronics14173507

Choi, D., Shallue, C. J., Nado, Z., Lee, J., Maddison, C. J., & Dahl, G. E. (2019). On empirical comparisons of optimizers for deep learning. arXiv. https://arxiv.org/abs/1910.05446

Deng, J., Dong, W., Socher, R., Li, L.-J., Li, K., & Fei-Fei, L. (2009). ImageNet: A large-scale hierarchical image database. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) (pp. 248–255). https://doi.org/10.1109/CVPR.2009.5206848

Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2021). An image is worth 16×16 words: Transformers for image recognition at scale. In Proceedings of the International Conference on Learning Representations (ICLR 2021).

Duchi, J., Hazan, E., & Singer, Y. (2011). Adaptive subgradient methods for online learning and stochastic optimization. Journal of Machine Learning Research, 12, 2121–2159.

Elbedwehy, S., Turki-Hadj Alouane, M., Hassan, E., & Tarek, Z. (2026). LiCPV: Hybrid deep learning for PV fault detection. Ain Shams Engineering Journal, 17(3), Article 104041. https://doi.org/10.1016/j.asej.2026.104041

Jagdev, S., Sundararaman, B., Khatri, N., Gaur, P., & Mewada, H. (2025). SqueezeNet-based deep learning framework for accurate tomato (Solanum lycopersicum) leaf disease diagnosis and classification. International Journal of Computational Intelligence Systems, 18(1), Article 229. https://doi.org/10.1007/s44196-025-00978-2

Jawahar, M., Anbarasi, L. J., Jasmine, S. G., Daya, J. L. F., Ravi, V., & Chakrabarti, P. (2023). TRS-Net: Tropical revolving storm disasters analysis and classification based on multispectral images using 2-D deep convolutional neural network. Multimedia Tools and Applications, 82(30), 46651–46671. https://doi.org/10.1007/s11042-023-15450-6

Jozi, N. S., & Al-Suhail, G. A. (2025). LCxNet: An explainable CNN framework for lung cancer detection in CT images using multi-optimizer and visual interpretability. Applied System Innovation, 8(5), Article 153. https://doi.org/10.3390/asi8050153

Kingma, D. P., & Ba, J. (2015). Adam: A method for stochastic optimization. In Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR 2015). https://arxiv.org/abs/1412.6980

LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y., & Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. Proceedings of the IEEE, 86(11), 2278–2324. https://doi.org/10.1109/5.726791

Li, D. Y., Zhao, J. J., & Ma, J. Y. (2022). Experimental studies on rock thin-section image classification by deep learning-based approaches. Mathematics, 10(13), Article 2317. https://doi.org/10.3390/math10132317

Liu, L., Jiang, H., He, P., Chen, W., Liu, X., Gao, J., & Han, J. (2020). On the variance of the adaptive learning rate and beyond. In Proceedings of the 8th International Conference on Learning Representations (ICLR 2020).

Liu, Z., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., Wei, Y., Zhang, Z., Lin, S., & Guo, B. (2021). Swin Transformer: Hierarchical vision transformer using shifted windows. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision (ICCV) (pp. 9992–10002). https://doi.org/10.1109/ICCV48922.2021.00986

Loshchilov, I., & Hutter, F. (2019). Decoupled weight decay regularization. In Proceedings of the 7th International Conference on Learning Representations (ICLR 2019).

Mehmood, F., Mehmood, A., & Whangbo, T. K. (2025). Alzheimer's disease detection in various brain anatomies based on optimized vision transformer. Mathematics, 13(12), Article 1927. https://doi.org/10.3390/math13121927

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021a). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, 372, Article n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Page, M. J., Moher, D., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … McKenzie, J. E. (2021b). PRISMA 2020 explanation and elaboration: Updated guidance and exemplars for reporting systematic reviews. BMJ, 372, Article n160. https://doi.org/10.1136/bmj.n160

Polat, O., Polat, A., & Ekici, T. (2021). Automatic classification of volcanic rocks from thin section images using transfer learning networks. Neural Computing and Applications, 33(18), 11531–11540. https://doi.org/10.1007/s00521-021-05849-3

Polyak, B. T. (1964). Some methods of speeding up the convergence of iteration methods. USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, 4(5), 1–17.

Qureshi, M. N., Umar, M. S., & Shahab, S. (2022). A transfer-learning-based novel convolution neural network for melanoma classification. Computers, 11(5), Article 64. https://doi.org/10.3390/computers11050064

Radford, A., Kim, J. W., Hallacy, C., Ramesh, A., Goh, G., Agarwal, S., Sastry, G., Askell, A., Mishkin, P., Clark, J., Krueger, G., & Sutskever, I. (2021). Learning transferable visual models from natural language supervision. In Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML), PMLR 139, pp. 8748–8763.

Raiaan, M. A. K., Fatema, K., Khan, I. U., Azam, S., Rashid, M. R. U., Mukta, M. S. H., Jonkman, M., & De Boer, F. (2023). A lightweight robust deep learning model gained high accuracy in classifying a wide range of diabetic retinopathy images. IEEE Access, 11, 42361–42388. https://doi.org/10.1109/access.2023.3272228

Reddi, S. J., Kale, S., & Kumar, S. (2018). On the convergence of Adam and beyond. In Proceedings of the 6th International Conference on Learning Representations (ICLR 2018).

Robbins, H., & Monro, S. (1951). A stochastic approximation method. The Annals of Mathematical Statistics, 22(3), 400–407.

Saedi, S. I., & Khosravi, H. (2020). A deep neural network approach towards real-time on-branch fruit recognition for precision horticulture. Expert Systems with Applications, 159, Article 113594. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113594

Saranya, T., Deisy, C., Sridevi, S., & Anbananthen, K. S. M. (2023). A comparative study of deep learning and Internet of Things for precision agriculture. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 122, Article 106034. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106034

Schmidt, R. M., Schneider, F., & Hennig, P. (2021). Descending through a crowded valley — Benchmarking deep learning optimizers. In Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML 2021), PMLR 139, pp. 9367–9376.

Shabrina, N. H., Lika, R. A., & Indarti, S. (2023). Deep learning models for automatic identification of plant-parasitic nematode. Artificial Intelligence in Agriculture, 7, 1–12. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2022.12.002

Song, Y. L., Wang, A. L., Zhao, Y., Wu, H. B., & Iwahori, Y. J. (2023). Multi-scale spatial-spectral attention-based neural architecture search for hyperspectral image classification. Electronics, 12(17), Article 3641. https://doi.org/10.3390/electronics12173641

Tieleman, T., & Hinton, G. (2012). Lecture 6.5 — RMSProp: Divide the gradient by a running average of its recent magnitude. COURSERA: Neural Networks for Machine Learning, 4(2), 26–31.

Touvron, H., Cord, M., Douze, M., Massa, F., Sablayrolles, A., & Jégou, H. (2021). Training data-efficient image transformers & distillation through attention. In Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning (ICML), PMLR 139, pp. 10347–10357.

Wang, J., Li, Y., Feng, H., Ren, L., Du, X., & Wu, J. (2020). Common pests image recognition based on deep convolutional neural network. Computers and Electronics in Agriculture, 179, Article 105834. https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105834

Wilson, A. C., Roelofs, R., Stern, M., Srebro, N., & Recht, B. (2017). The marginal value of adaptive gradient methods in machine learning. Advances in Neural Information Processing Systems, 30, 4148–4158.

Yang, W., Li, A., Zhang, L., & Qin, X. (2026). Deep learning-based intelligent analysis of rock thin sections: From cross-scale lithology classification to grain segmentation for quantitative fabric characterization. Electronics, 15(7), Article 1509. https://doi.org/10.3390/electronics15071509

Zhuang, J., Tang, T., Ding, Y., Tatikonda, S. C., Dvornek, N., Papademetris, X., & Duncan, J. (2020). AdaBelief optimizer: Adapting stepsizes by the belief in observed gradients. Advances in Neural Information Processing Systems, 33, 18795–18806.

DESDE 2023
https://rictrevista.org

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Publicación Semestral RICT Vol. 4 No. 8 (2026) P. 100-106

ISSN: 2992-7315

Nanotecnología aplicada al área médica: panorama general de las patentes concedidas en México en el periodo 2000-2025

Nanotechnology applied to medicine: an overview of patents granted in Mexico from 2000 to 2025

Roberto Soto-Vázquez[1,*], Edgar Záyago Lau[1]

[1] *Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica en Estudios del Desarrollo. Zacatecas, México.*

Resumen

La nanotecnología aplicada al sector salud, también conocida como nanomedicina, ha producido innovaciones notables en el diagnóstico, monitoreo y tratamiento de enfermedades. El objetivo de este trabajo es explorar los avances que ha tenido México en este campo a través de un análisis de patentes. La metodología de esta investigación incluyó las siguientes etapas: (1) búsqueda de patentes en la base de datos del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial, (2) registro y procesamiento de datos patentométricos en Microsoft Excel y (3) revisión del contenido de las patentes con el software Orange Data Mining. Como resultado, se identificaron 441 patentes de nanomedicina otorgadas en México durante el periodo 2000-2025, de las cuales el 75.51% son de propietarios extranjeros y el 24.49% de mexicanos. Asimismo, más de la mitad de las patentes versan sobre medicamentos y administración de agentes terapéuticos, aunque también se abordan otras áreas como diagnóstico, medicina regenerativa, dispositivos médicos y vacunas. Se concluye que la nanomedicina tiene un potencial enorme para atender los problemas de salud del país y por ello es necesario seguir fortaleciendo las capacidades tecnológicas de México en este campo.

Palabras clave: nanotecnología, medicina, nanomedicina, análisis patentométrico

Abstract

Nanotechnology applied to the healthcare sector, also known as nanomedicine, has led to remarkable innovations in the diagnosis, monitoring, and treatment of diseases. The objective of this study is to explore Mexico's progress in this field through a patent analysis. The methodology for this research included the following stages: (1) conducting a patent search in the Mexican Institute of Industrial Property database, (2) recording and processing patentometric data in Microsoft Excel, and (3) reviewing the content of the patents using Orange Data Mining software. As a result, 441 nanomedicine patents granted in Mexico during the 2000–2025 period were identified, of which 75.51% are held by foreign owners and 24.49% by Mexican owners. More than half of the patents are related to medicines and delivery systems for therapeutic agents; however, other areas, such as diagnostics, regenerative medicine, medical devices, and vaccines, are also covered. The study concludes that nanomedicine has enormous potential to address the country's health needs, and therefore it is necessary to continue strengthening Mexico's technological capabilities in this field.

Keywords: nanotechnology, medicine, nanomedicine, patentometric analysis.

1. Introducción

La nanotecnología representa uno de los avances científicos y tecnológicos más relevantes de las últimas décadas. Sus orígenes se remontan a la segunda mitad del siglo XX; el término "nanotecnología" se introdujo en 1974, y su establecimiento como nuevo campo disciplinario ocurrió entre las décadas de 1980 y 1990 [1]. La nanotecnología consiste en la aplicación de conocimientos científicos para la creación de nuevos materiales y dispositivos con dimensiones que rondan los 100 nanómetros (nm) [2]. Cuando los

*Autor para la correspondencia: Roberto Soto-Vázquez
Correo electrónico: robertosotova@gmail.com

Historial del manuscrito: recibido el 9/10/2026, última versión-revisada recibida el 13/11/2026, aceptado el 14/11/2026, publicado el 24/11/2026. **DOI:** https://doi.org/10.5281/zenodo.24504130

materiales se procesan en tamaños tan diminutos, sus propiedades físicas, químicas, eléctricas, ópticas y biológicas se modifican drásticamente [3]. Dicha escala hace que los nanomateriales puedan aplicarse a una multitud de propósitos en campos tan variados como la electrónica, la agricultura, la industria automotriz, manufactura, y la producción de energía [4]. Algunas de sus aplicaciones más sobresalientes ocurren en el campo de la salud, lo que ha dado origen a una nueva disciplina conocida como nanomedicina [5].

La nanomedicina puede definirse como el uso de la nanotecnología en la prevención, diagnóstico, monitoreo y tratamiento de enfermedades [6], empleando dispositivos y sistemas a nanoescala que permiten mejorar la eficacia de los medicamentos, realizar diagnósticos más precisos, y disminuir los efectos adversos de los procedimientos médicos convencionales [7,8]. En la literatura científica se distinguen diferentes áreas donde ha incidido la nanomedicina, las cuales se describen a continuación [9–11]:

Medicamentos y sistemas de administración de agentes terapéuticos. Los medicamentos basados en nanopartículas, en comparación con los medicamentos comunes, tienen mayor solubilidad, biodisponibilidad y selectividad [12]. En este contexto, la liberación y administración de fármacos (*drug delivery*) constituye uno de los principales campos de aplicación de la nanomedicina, ya que los sistemas nanoestructurados permiten transportar y dirigir agentes terapéuticos hacia tejidos y células específicos [13]. Estos sistemas incluyen estructuras tales como liposomas, micelas, dendrímeros y nanopartículas (en conjunto llamados nanoportadores o *nanocarriers*) que pueden transportar sustancias terapéuticas como fármacos, proteínas, péptidos y ácidos nucleicos [14,15]. Una aplicación de esto se encuentra en los nanomedicamentos oncológicos como el Doxil® [16] que, a través de formulaciones liposomales, actúan directamente sobre las células cancerosas, con lo cual se obtienen mejores resultados terapéuticos y se reducen los efectos adversos asociados a la quimioterapia convencional [17].

Terapia. La nanotecnología es fundamental en ciertos tipos de terapia médica. En fototerapia se emplean nanopartículas de oro que, al absorber luz, producen calor y destruyen las células cancerosas [18]. En radioterapia, las nanopartículas de óxido de hafnio (HfO_2) incrementan la absorción de la radiación dentro de los tumores, lo que mejora la destrucción de células cancerosas y reduce los daños a tejidos sanos [19]. En la hipertermia magnética se usan nanopartículas de óxido de hierro (Fe_xO_x) que al someterse a campos magnéticos producen calor y destruyen células tumorales [20].

Diagnóstico. Existen biosensores con componentes nanoestructurados que detectan enfermedades de forma rápida y precisa. Esto se debe a que los nanomateriales tienen mayor área superficial y reaccionan fácilmente con ácidos nucleicos, proteínas, patógenos y metabolitos [21]. Asimismo, en imagenología médica se usan agentes de contraste a base de nanopartículas que mejoran la resolución de las imágenes y permiten diagnósticos más tempranos y certeros [22].

Dispositivos médicos. La incorporación de nanomateriales en los dispositivos médicos mejora las propiedades mecánicas, produce actividad antimicrobiana y antiviral, y aumenta la biocompatibilidad. Ejemplo de esto son los implantes ortopédicos e instrumental quirúrgico con recubrimientos de nanopartículas de plata, los cuales tienen propiedades bactericidas que reducen los riesgos por infección y tienen una mayor vida útil [23].

Medicina regenerativa e ingeniería de tejidos. La nanotecnología es útil en la regeneración de tejidos y órganos, ya que varias estructuras biológicas operan en la escala nanométrica. En este sentido, los nanomateriales pueden usarse en la fabricación de andamios (*scaffolds*) que imitan la matriz extracelular, los cuales proporcionan un soporte estructural y bioquímico para el crecimiento y la diferenciación celular durante la regeneración de tejidos [24].

Vacunas. El uso de nanopartículas lipídicas o poliméricas en las vacunas permite transportar de manera eficiente antígenos o material genético hacia el interior de las células del sistema inmunitario. Estas nanopartículas protegen al componente activo para que no se degrade, aumentan la captación por parte de las células inmunitarias y pueden desencadenar respuestas inmunes más potentes [25]. El ejemplo más emblemático de esto son algunas vacunas para COVID-19, como la BNT162b2 de Pfizer-BioNTech y la mRNA-1273 de Moderna, que se desarrollaron con nanotecnología [26,27].

En este contexto, México es uno de los países líderes en investigación y desarrollo (I+D) sobre nanotecnología en América Latina, situándose solo por debajo de Brasil [28]. Esto se puede apreciar en la cantidad de publicaciones científicas de nanotecnología a nivel regional: Brasil está en primer lugar con 10326 publicaciones, seguido por México con 5532, Argentina con 2422, Chile con 1369 y Colombia con 1150 (datos obtenidos de Web of Science el 10 de noviembre de 2026 mediante la cadena de búsqueda “WC= Nanoscience & Nanotechnology” y posterior filtrado de resultados por países). Esta posición de México en el sector nanotecnológico representa una oportunidad para que nuestro país impulse la nanomedicina y la utilice para atender las necesidades de salud de la población mexicana. Por ello, es necesario indagar los progresos de México en este campo, y una forma de hacerlo es mediante un análisis de patentes.

Las patentes son documentos legales que se otorgan a personas y empresas para proteger nuevos inventos, productos o procesos. Su función es conferir derechos exclusivos a los inventores para que puedan usar, producir y comercializar sus invenciones durante un tiempo determinado [29]. Las patentes son especialmente útiles para analizar los avances tecnológicos, ya que proporcionan información detallada sobre nuevas invenciones. En este sentido, los análisis patentométricos y bibliométricos constituyen herramientas metodológicas que permiten examinar sistemáticamente la producción de conocimiento y la actividad inventiva, identificar patrones de desarrollo tecnológico y visualizar trayectorias de innovación científica y tecnológica [30,31].

El objetivo de este trabajo es explorar los avances de México en el campo de la nanomedicina, a través un análisis de las patentes concedidas en el país durante el periodo 2000-2025.

2. Materiales y Métodos

Se consultó el Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial (SIGA) del Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial (IMPI) (https://siga.impi.gob.mx/). En esta plataforma se ingresaron los parámetros que se indican en la Tabla 1. La búsqueda se limitó exclusivamente a patentes concedidas; no se tomaron en cuenta solicitudes de patentes. La delimitación del periodo 2000-2025 respondió a dos criterios. En primer lugar, se consideró el año 2000 como punto de partida, ya que a partir de ese momento el patentamiento en nanomedicina comenzó a despuntar a nivel internacional [32]. En segundo lugar, aunque la búsqueda de patentes se realizó en noviembre de 2026, el límite superior del periodo se estableció en 2025 con el propósito de trabajar con información de años completos y evitar sesgos por incluir datos parciales de 2026. Se utilizó el término "nano*" para rastrear todas las patentes que contuvieran en sus títulos y resúmenes palabras derivadas del prefijo nano-. Esta estrategia se ha utilizado en trabajos previos para localizar literatura científica relacionada con nanotecnología y nanomedicina [33,26,11]. La ventaja de utilizar el término "nano*" es que arroja una multitud de resultados que incluyen términos nanotecnológicos como "nanotecnología", "nanopartículas", "nanomateriales", "nanoestructuras", etc., así como palabras vinculadas directamente con el área nanomédica, como "nanomedicina", "nanomedicamento", "nanofármaco", "nanodiagnóstico", "nanovacunas", etc.

Tabla 1. Parámetros utilizados en el Sistema de Información de la Gaceta de la Propiedad Industrial (SIGA) para la búsqueda de patentes.

Filtros	Parámetros utilizados
Fecha de consulta	10/11/2026
Tipo de búsqueda	Especializada
Área	Patentes
Fecha de puesta en circulación	01/01/2000 – 31/12/2025
Gacetas	Patentes, registros de modelos de utilidad y de diseños industriales
Secciones	Patentes
Términos de búsqueda	[Columna título: "nano*"] OR [Columna resumen: "nano*"]

Después, se revisaron manualmente los títulos y resúmenes de todas las patentes encontradas en el paso anterior, a fin de seleccionar únicamente las que guardaban relación directa con nanomedicina. Finalmente, los datos de las patentes se procesaron con Microsoft Excel para generar gráficos a partir de los principales indicadores de patentamiento; también se usó el software Orange Data Mining para explorar el contenido de las patentes mediante una nube de palabras.

3. Resultados

La búsqueda inicial en el SIGA arrojó un total de 1930 patentes; no obstante, después de revisar los títulos y resúmenes de cada una de ellas, se descartaron 1489 por no corresponder al tema. Resultado de lo anterior, la colección final se redujo a 441 patentes de nanomedicina, cifra que incluye patentes de titulares mexicanos, así como de extranjeros que han patentado en México. En la Figura 1 se muestra la distribución anual de estas patentes a lo largo del periodo 2000-2025, según su fecha de concesión. Se aprecia que durante la primera década el patentamiento fue casi nulo, pero en los siguientes años hubo un crecimiento bastante pronunciado que alcanzó su punto máximo en 2021. Después de 2022, la cantidad de patentes disminuyó de manera importante, con un ligero repunte en 2025.

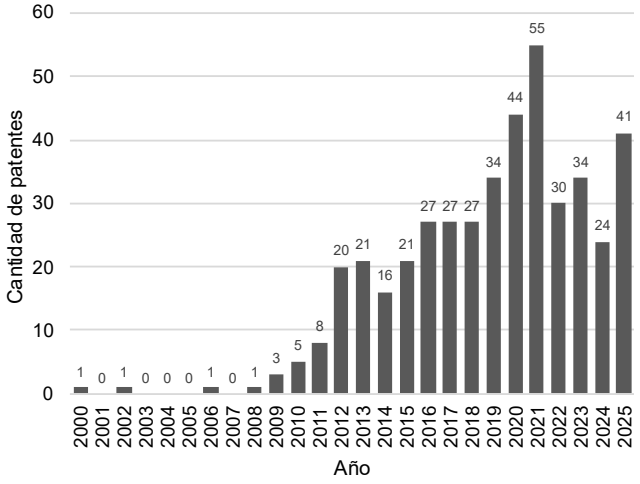


Figura 1. Patentes de nanomedicina concedidas en México entre 2000 y 2025. Se incluyen patentes de titulares mexicanos, así como de extranjeros que han patentado en México.

La Figura 2 muestra la clasificación temática de las patentes, considerando las áreas de la nanomedicina mencionadas en la introducción. Se puede observar que el área de medicamentos y administración de agentes terapéuticos concentra la mayor cantidad de patentes con el 62% del total. El resto de las áreas (terapia, diagnóstico, dispositivos médicos, vacunas y medicina regenerativa / ingeniería de tejidos) tienen una menor representación en las patentes, con porcentajes que van del 3 al 10%.

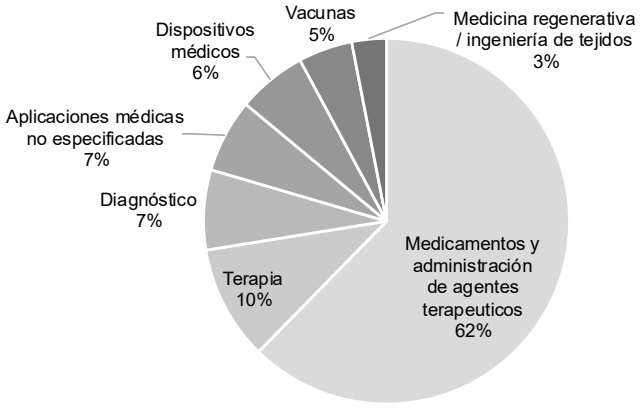


Figura 2. Áreas temáticas de las patentes de nanomedicina concedidas en México entre 2000 y 2025.

La Figura 3 muestra las patentes de nanomedicina registradas en México categorizadas por nacionalidad; solo el 24.49% pertenece a titulares mexicanos, mientras que la gran mayoría (76.51%) es de titulares extranjeros.

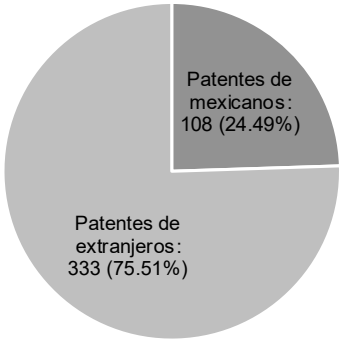


Figura 3. Distribución por nacionalidad de las patentes de nanomedicina concedidas en México en el periodo 2000-2025.

La Figura 4 exhibe las principales nacionalidades de los titulares. Se aprecia que los titulares procedentes de Estados Unidos tienen la mayor cantidad de patentes.

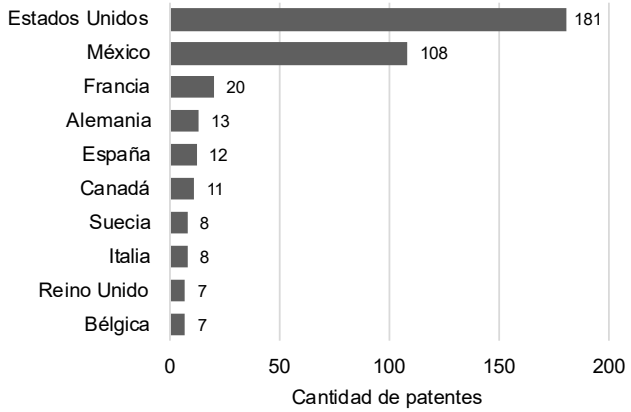


Figura 4. Principales nacionalidades de los titulares de patentes de nanomedicina en México, periodo 2000-2025.

La Figura 5 reúne los diez titulares con más patentes de nanomedicina en México. A la cabeza se encuentran dos empresas estadounidenses: Abraxis Bioscience y Selecta Biosciences. La primera tiene 31 patentes, las cuales se enfocan principalmente en la formulación de medicamentos para tratar distintos tipos de cáncer como el de páncreas [34], de vejiga [35], melanoma [36], y carcinoma hepatocelular [37]. La segunda empresa, Selecta Biosciences, posee 20 patentes relacionadas con nanopartículas para vacunas y otros usos [38]. En la misma figura también se visualizan algunas instituciones mexicanas, entre las que destacan la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL). Las patentes de la UNAM incluyen nanorrecubrimientos para implantes médicos [39], agentes antimicrobianos de aplicación tópica[40], y composiciones farmacéuticas a base de nanopartículas de plata para el tratamiento de distintos tipos de cáncer [41]. La UANL, por su parte, ha patentado nanomateriales para aplicaciones óseas y dentales [42,43], así como una formulación nanoestructurada para la regeneración de heridas diabéticas [44].

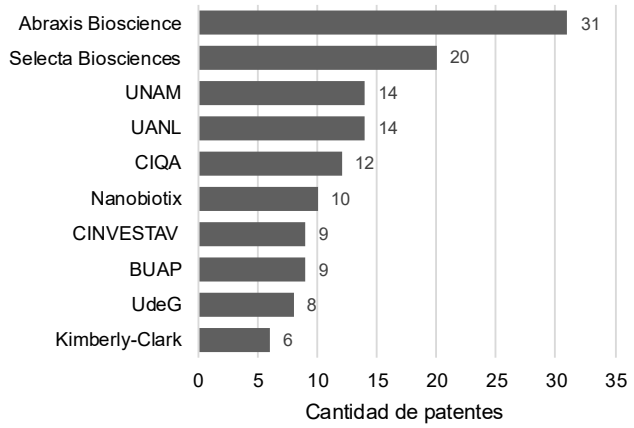


Figura 5. Empresas e instituciones con más patentes de nanomedicina en México.

Para tener una perspectiva más amplia sobre el contenido de las patentes se elaboró una nube de palabras, es decir, una representación visual de los términos más frecuentes, lo que resulta de gran utilidad para identificar los temas clave en conjuntos grandes de documentos [45]. En este caso, la nube se generó con los títulos y resúmenes de todas las patentes y el resultado se muestra en la Figura 6. A partir de los términos de mayor tamaño en la nube se puede notar que las patentes se han orientado principalmente en tratamientos contra el cáncer y en nanoportadores para la administración de fármacos.



Figura 6. Términos más frecuentes en los títulos y resúmenes de las patentes. Nube de palabras elaborada con el software Orange Data Mining.

4. Discusión

Durante las dos primeras décadas del presente siglo el patentamiento en México en el campo de la nanomedicina creció considerablemente; sin embargo, a partir de 2022 se produjo una desaceleración (Figura 1), lo que podría estar relacionado con la pandemia de COVID-19. Algunos estudios muestran que la pandemia afectó el patentamiento por varios motivos: interrupción de las labores de I+D por el cierre de laboratorios y espacios de trabajo, reducción de inversiones por la incertidumbre económica, redireccionamiento de los recursos hacia la atención de necesidades inmediatas, y retrasos administrativos e institucionales en las oficinas de

patentes [46,47]. Si bien es cierto que la pandemia tuvo sus efectos más drásticos durante 2020 y 2021, los impactos en el patentamiento se empezaron a notar a partir de 2022 debido al desfase temporal que existe entre las solicitudes y el otorgamiento de las patentes.

Más de la mitad de las patentes se enfocan en medicamentos y administración de agentes terapéuticos (Figura 2). Trabajos previos que han explorado el desarrollo de la nanomedicina a nivel internacional muestran este mismo comportamiento en la producción científica [48,49]. La predominancia de patentes en esta área podría deberse a que la formulación de medicamentos mediante nanotecnología fue precisamente uno de los temas pioneros de la nanomedicina. Desde los años noventa se han hecho investigaciones sobre el uso de nanopartículas en la liberación y administración de fármacos [50], lo que ha permitido que esta área tenga más tiempo para madurar y fructificar en productos patentables.

Del total de patentes de nanomedicina concedidas en México apenas el 24.49% es de propietarios mexicanos y el 75.51% pertenece a extranjeros (Figura 3), lo que puede explicarse por varios motivos. En primer lugar, los científicos mexicanos se enfrentan a varias limitaciones para patentar, entre las que se pueden mencionar la falta de recursos económicos, el desconocimiento sobre temas de propiedad intelectual y pocos incentivos para patentar dentro del ámbito académico [51]. En segundo lugar, México tiene un marco regulatorio que es atractivo para las inversiones en el sector farmacéutico, lo que ha propiciado que varias empresas extranjeras patenten en el país [52]. Por otra parte, la reducida participación de mexicanos en el patentamiento no es un fenómeno exclusivo del campo de la nanomedicina, sino que se observa a nivel general. De acuerdo con las cifras más recientes del IMPI, desde 1993 hasta el primer trimestre de 2026, se han otorgado 266747 patentes en México, de las cuales solo 10285 son de titulares mexicanos, lo que representa apenas el 4% del total [53]. Esto indica que las capacidades tecnológicas de México aún son limitadas y que la mayor parte del conocimiento e innovación tecnológica se produce en los países desarrollados.

La nacionalidad predominante entre los propietarios de las patentes es la estadounidense (Figura 4), lo cual refleja el liderazgo de Estados Unidos en nanomedicina a nivel global [48]. El papel tan sobresaliente de Estados Unidos en este campo se debe principalmente al financiamiento e impulso institucional que ha recibido el sector nanotecnológico en dicho país, especialmente a través de la Iniciativa Nacional de Nanotecnología [54]. Se trata de un programa gubernamental que promueve la investigación y desarrollo nanotecnológico en Estados Unidos, y que desde su fundación en 2001 hasta 2026 ha recibido un financiamiento acumulado de casi 47000 millones de dólares [55]. En consecuencia, no es de extrañar que las empresas con más patentes de nanomedicina identificadas en este estudio (Abraxis Bioscience y Selecta Biosciences) sean precisamente estadounidenses (Figura 5).

Finalmente, el análisis del contenido de las patentes reveló que uno de los temas centrales de la innovación nanomédica en México ha sido el desarrollo de tratamientos contra el cáncer (Figura 6). Este hecho es relevante para el contexto mexicano, ya que el cáncer es una de las principales causas de muerte en el país [56].

5. Conclusiones

El presente estudio permitió identificar 441 patentes de nanomedicina concedidas en México entre 2000 y 2025. Más de tres cuartas partes de estas patentes pertenecen a titulares extranjeros, lo que evidencia la fuerte presencia de empresas transnacionales que patentan en México para expandir su mercado, así como las limitaciones que enfrenan los científicos e inventores mexicanos para patentar. Un tema central en las patentes ha sido la formulación de nanomedicamentos para el cáncer, lo cual es de destacar ya que esta enfermedad es una de las principales causas de muerte en la población mexicana. Esto pone de manifiesto el potencial que puede tener la nanomedicina para atender los problemas de salud que afectan al país, y por esta razón es necesario incrementar la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación en este campo.

6. Agradecimientos

El primer autor agradece a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo otorgado para realizar esta investigación.

7. Referencias

[1] Bayda, S., Adeel, M., Tuccinardi, T., Cordani, M., & Rizzolio, F. (2020). The History of Nanoscience and Nanotechnology: From Chemical–Physical Applications to Nanomedicine. *Molecules*, *25*(1), 112. https://doi.org/10.3390/molecules25010112

[2] Soto-Vázquez, R., & Záyago Lau, E. (2025). Nanotecnología en la conservación de bienes culturales. *Uni ver sita ria*, *9*(58), 63-65. https://revistauniversitaria.uaemex.mx/article/view/26845

[3] Soto-Vázquez, R., & Záyago Lau, E. (2026). Nanotechnology for the conservation of wooden cultural heritage: A bibliometric analysis. *Momento*, (73), 40-68. https://doi.org/10.15446/mo.n73.120700

[4] Malik, S., Muhammad, K., & Waheed, Y. (2023). Nanotechnology: A Revolution in Modern Industry. *Molecules*, *28*(2), 661. https://doi.org/10.3390/molecules28020661

[5] Soto-Vázquez, R., Záyago Lau, E., & Maldonado López, L. A. (2021). Gobernanza de la nanomedicina: Una revisión sistemática. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria en Nanociencias y Nanotecnología*, *15*(28), 1e-25e. https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2022.28.69682

[6] Soto-Vázquez, R. (2023). La nanomedicina en México: Un análisis de las actividades de investigación y desarrollo. *Revista Avance y Perspectiva*. https://ayp.cinvestav.mx/la-nanomedicina-en-mexico-un-analisis-de-las-actividades-de-investigacion-y-desarrollo/

[7] Soto-Vázquez, R., & Foladori, G. (2023). La nanomedicina en México desde el punto de vista de los investigadores. *Temas de Ciencia y Tecnología*, *27*(80), 55-58. https://www.utm.mx/edi_anteriores/temas80/T80_N01_nanomedicina_mexico.pdf

[8] Foladori, G., Soto-Vázquez, R., Arteaga Figueroa, E., Záyago Lau, E., & Ortiz Espinoza, Á. (2024). Capítulo 14. Las nanomedicinas. En *Perspectivas sociales de las nanotecnologías en México* (1.ª ed., pp. 211-226). Tirant Lo Blanch. https://editorial.tirant.com/mex/ebook/perspectivas-sociales-de-las-nanotecnologias-en-mexico-guillermo-foladori-9788411836838

[9] Wagner, V., Dullaart, A., Bock, A.-K., & Zweck, A. (2006). The emerging nanomedicine landscape. *Nature Biotechnology*, *24*(10), 1211-1217. https://doi.org/10.1038/nbt1006-1211

[10] Pelaz, B., Alexiou, C., Alvarez-Puebla, R. A., Alves, F., Andrews, A. M., Ashraf, S., Balogh, L. P., Ballerini, L., Bestetti, A., Brendel, C., Bosi, S., Carril, M., Chan, W. C. W., Chen, C., Chen, X., Chen, X., Cheng, Z., Cui, D., Du, J., … Parak, W. J. (2017). Diverse Applications of Nanomedicine. *ACS Nano*, *11*(3), 2313-2381. https://doi.org/10.1021/acsnano.6b06040

[11] Soto-Vázquez, R. (2023). *Análisis de la investigación y desarrollo de la nanomedicina en México*. Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV). https://doi.org/10.5281/zenodo.21382439

[12] Liu, Q., Zou, J., Chen, Z., He, W., & Wu, W. (2023). Current research trends of nanomedicines. *Acta Pharmaceutica Sinica B*, *13*(11), 4391-4416. https://doi.org/10.1016/j.apsb.2023.05.018

[13] Mirza, A. Z., & Siddiqui, F. A. (2014). Nanomedicine and drug delivery: A mini review. *International Nano Letters*, *4*(1), 94. https://doi.org/10.1007/s40089-014-0094-7

[14] Alshawwa, S. Z., Kassem, A. A., Farid, R. M., Mostafa, S. K., & Labib, G. S. (2022). Nanocarrier Drug Delivery Systems: Characterization, Limitations, Future Perspectives and Implementation of Artificial Intelligence. *Pharmaceutics*, *14*(4), 883. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics14040883

[15] Shah, L., Yadav, S., & Amiji, M. (2013). Nanotechnology for CNS delivery of bio-therapeutic agents. *Drug Delivery and Translational Research*, *3*(4), 336-351. https://doi.org/10.1007/s13346-013-0133-3

[16] Barenholz, Y. (Chezy). (2012). Doxil® — The first FDA-approved nano-drug: Lessons learned. *Journal of Controlled Release, Past, current and future applications of liposomes - Grand Challenges and Opportunities in Nanomedicine*, *160*(2), 117-134. https://doi.org/10.1016/j.jconrel.2012.03.020

[17] Giri, P. M., Banerjee, A., & Layek, B. (2023). A Recent Review on Cancer Nanomedicine. *Cancers*, *15*(8), 2256. https://doi.org/10.3390/cancers15082256

[18] Yao, C., Zhang, L., Wang, J., He, Y., Xin, J., Wang, S., Xu, H., & Zhang, Z. (2016). Gold Nanoparticle Mediated Phototherapy for Cancer. *Journal of Nanomaterials*, *2016*(1), 5497136. https://doi.org/10.1155/2016/5497136

[19] Maggiorella, L., Barouch, G., Devaux, C., Pottier, A., Deutsch, E., Bourhis, J., Borghi, E., & Levy, L. (2012). Nanoscale Radiotherapy with Hafnium Oxide Nanoparticles. *Future Oncology*, *8*(9), 1167-1181. https://doi.org/10.2217/fon.12.96

[20] Bañobre-López, M., Teijeiro, A., & Rivas, J. (2013). Magnetic nanoparticle-based hyperthermia for cancer treatment. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy, Selected Papers Presented at the XVII SEOR Congress, Vigo, 18—21 June 2013*, *18*(6), 397-400. https://doi.org/10.1016/j.rpor.2013.09.011

[21] Chamorro-Garcia, A., & Merkoçi, A. (2016). Nanobiosensors in diagnostics. *Nanobiomedicine*, *3*, 1849543516663574. https://doi.org/10.1177/1849543516663574

[22] Gao, Z., Ma, T., Zhao, E., Docter, D., Yang, W., Stauber, R. H., & Gao, M. (2016). Small is Smarter: Nano MRI Contrast Agents – Advantages and Recent Achievements. *Small*, *12*(5), 556-576. https://doi.org/10.1002/smll.201502309

[23] Chaloupka, K., Malam, Y., & Seifalian, A. M. (2010). Nanosilver as a new generation of nanoproduct in biomedical applications. *Trends in Biotechnology*, *28*(11), 580-588. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2010.07.006

[24] Deepika, B., Gopikrishna, A., Girigoswami, A., Banu, M. N., & Girigoswami, K. (2022). Applications of Nanoscaffolds in Tissue Engineering. *Current Pharmacology Reports*, *8*(3), 171-187. https://doi.org/10.1007/s40495-022-00284-x

[25] Zaman, M., Good, M. F., & Toth, I. (2013). Nanovaccines and their mode of action. *Methods, Nanotechology and vaccine development: methods to study and manipulate the interaction of nanoparticles with the immune system*, *60*(3), 226-231. https://doi.org/10.1016/j.ymeth.2013.04.014

[26] Soto-Vázquez, R., Zayago Lau, E., & Maldonado-López, L. (2022). Nanomedicina para enfrentar la pandemia de COVID-19: Un análisis bibliométrico de las publicaciones de Web of Science con la herramienta Bibliometrix de R. *Revista Cubana de Información en Ciencias de la Salud*, *33*, e1880. https://doi.org/10.5281/zenodo.21330653

[27] Záyago Lau, E., León Silva, S., & Soto-Vázquez, R. (2021). Nanotechnology and Covid: Technical Solutions in the Hunt for Inequality. En *Impacts of COVID-19 on Societies and Economies* (1.ª ed.). IJOPEC. http://www.ijopec.co.uk/wp-content/uploads/2022/01/2021_08.pdf#page=234

[28] Záyago Lau, E., Invernizzi, N., & Foladori, G. (Eds.). (2020). *Relevancia social de las nanotecnologías en América Latina* (1.ª ed.). Miguel Ángel Porrúa.

[29] World Intellectual Property Organization (Ed.). (2023). *WIPO Patent Drafting Manual* (2.ª ed.). World Intellectual Property Organization. https://doi.org/10.34667/tind.44657

[30] Conceição, P. C. G., de Assunção, L. M., Araújo, L. A. N., de Jesus Mota, Z., Pessoa, C. T., Jesus Assis, D. de, da Silva, J. B. A., de Souza, C. O., & Cardoso, L. G. (2026). Mapping the green biosynthesis of silver nanoparticles: A bibliometric and patentometric analysis of scientific production and technological evolution. *World Patent Information*, *86*, 102475. https://doi.org/10.1016/j.wpi.2026.102475

[31] Soto-Vázquez, R. (2025). Life-cycle assessment in mining and mineral processing: A bibliometric overview. *Green and Smart Mining Engineering*, *2*(1), 73-83. https://doi.org/10.1016/j.gsme.2025.02.001

[32] Choi, Y., & Hong, S. (2020). Qualitative and quantitative analysis of patent data in nanomedicine for bridging the gap between research activities and practical applications. *World Patent Information*, *60*, 101943. https://doi.org/10.1016/j.wpi.2019.101943

[33] Invernizzi, N., Foladori, G., Robles-Belmont, E., Záyago Lau, E., Figueroa, E. A., Bagattolli, C., Carrozza, T. J., Chiancone, A., & Urquijo, W. (2015). Nanotechnology for social needs: Contributions from Latin American research in the areas of health, energy and water. *Journal of Nanoparticle Research*, *17*(5), 233. https://doi.org/10.1007/s11051-015-3037-y

[34] Renschler, M., & Desai, N. P. (2021). *Métodos para el tratamiento de cáncer pancreático*. Patente MX 382017 B.

[35] Soon-Shiong, P., & Desai, N. P. (2016). *Métodos de tratamiento de cáncer de vejiga*. Patente MX 343671 B.

[36] Renschler, M., & Desai, N. P. (2020). *Métodos para tratamiento del melanoma*. Patente MX 377729 B.

[37] Wong, N., & Yeo, W. (2018). *Métodos de tratamiento de carcinoma hepatocelular*. Patente MX 359413 B.

[38] Johnston, L., Lipford, G. B., Bratzler, R. L., & Zepp, C. (2017). *Vacunas multivalentes de nanovehiculos sintéticos*. Patente MX 352324 B.

[39] Almaguer Flores, A., Rodil Posada, S. E., & García Pérez, V. I. (2021). *Diseño y uso de un nanorecubrimiento de óxido de titanio con estructura atómica amorfa en superficies de dispositivos biomédicos microestructurados con potencial efecto en la respuesta biológica de células mesenquimales humanas*. Patente MX 385246 B.

[40] Santos Cruz, J., Acosta Torres, L. S., Argueta Figueroa, L., Arenas Arrocena, M. C., & Nuñez Anita, R. E. (2021). *Proceso de síntesis coloidal de nanocristales de disulfuro de hierro y uso de los mismos como antimicrobianos tópicos, no tóxicos para células somáticas*. Patente MX 387037 B.

[41] Pestryakov, A., Castell Rodríguez, A. E., Juárez Moreno, K. O., García García, M. R., Bogdanchikova, N., Burmistrov, V., & Toledano Magaña, Y. (2022). *Composición farmacéutica de nanopartículas de plata y uso de la misma en el tratamiento de cáncer sin efectos genotóxicos*. Patente MX 390732 B.

[42] Chávez Montes, A., González Horta, A., Sierra García, G. D., Lara Arias, J., Castro Ríos, R., & Peña Martínez, V. M. (2020). *Formulación de nanopartículas biodegradables con un extracto de aloe vera y su incorporación en un injerto de hueso para mejor efecto osteogénico*. Patente MX 378079 B.

[43] Flores Villarreal, A. M., Moreno Cortez, I. E., Garza Navarro, M. A., de la Garza Ramos, M. A., Martínez Rodríguez, M. de los Á., Lucio Porto, R., & Tachiquin Zamorano, S. A. (2019). *Proceso para la síntesis de materiales nanofibrosos basados en alcohol polivinílico y compósitos de carboximetil-celulosa y nanopartículas de plata, material y su uso como relleno de chimenea en implantes dentales*. Patente MX 370365 B.

[44] Rodríguez Padilla, C., Zárate Triviño, D. G., & Hernández Martínez, S. P. (2022). *Formulación farmacéutica a base de nanopartículas de oro y calreticulina y su uso como agente regenerativo de heridas diabéticas*. Patente MX 393905 B.

[45] Soto-Vázquez, R. (2025). Contributions of geography to the study of mining in Latin America: A bibliometric analysis. *GeoJournal*, *90*(4), 198. https://doi.org/10.1007/s10708-025-11444-z

[46] Cope, J. A. (2022). *Has COVID-19 Affected Patenting in The United States?* [Thesis, Brigham Young University]. https://scholarsarchive.byu.edu/etd/9691

[47] Terrazas-Santamaria, D. (2024). Tendencias tecnológicas post COVID-19 en México. *Análisis económico*, *39*(100), 137-163. https://doi.org/10.24275/uam/azc/dcsh/ae/2024v39n100/terrazas

[48] Wang, J., Zhao, W., Zhang, Z., Liu, X., Xie, T., Wang, L., Xue, Y., & Zhang, Y. (2024). A Journey of Challenges and Victories: A Bibliometric Worldview of Nanomedicine since the 21st Century. *Advanced Materials*, *36*(15), 2308915. https://doi.org/10.1002/adma.202308915

[49] Dündar, M., Mechler, A., Alcaraz, J., Henehan, G., Prakash, S., Lal, R., & Martin, D. (2020). Reflections on Emerging Technologies in Nanomedicine. *Journal of Clinical Practice and Research*, *42*(4), 370. https://doi.org/10.14744/etd.2020.68542

[50] Kreuter, J. (1991). Nanoparticle-based drug delivery systems. *Journal of Controlled Release*, *16*(1), 169-176. https://doi.org/10.1016/0168-3659(91)90040-K

[51] Soto-Vázquez, R., Foladori, G., & Záyago Lau, E. (2024). Desafíos de la investigación nanomédica en México. *Entreciencias: Diálogos en la Sociedad del Conocimiento*, *12*(26), 1-21. https://doi.org/10.22201/enesl.20078064e.2024.26.87497

[52] Arcudia Hernández, C. E., & Hernández Morejón, V. (2021). Las patentes farmacéuticas en México: De la prohibición a su potenciación por el T-MEC. *Revista La Propiedad Inmaterial*, (31), Article 31. https://doi.org/10.18601/16571959.n31.04

[53] IMPI. (s. f.). *IMPI en cifras*. Recuperado 8 de mayo de 2026, de https://www.gob.mx/impi/documentos/instituto-mexicano-de-la-propiedad-industrial-en-cifras-impi-en-cifras

[54] Roco, M. C. (2023). National Nanotechnology Initiative at 20 years: Enabling new horizons. *Journal of Nanoparticle Research*, *25*(10), 197. https://doi.org/10.1007/s11051-023-05829-9

[55] National Nanotechnology Initiative. (2026). *NNI Supplement to the President's 2026 Budget*. https://www.nano.gov/2026budgetsupplement/

[56] INEGI. (2026). *Comunicado de prensa 3/26. Estadísticas de defunciones registradas (EDR)*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2026/edr/edr2025_CP_en-jun.pdf

RICT Revista de Investigación Científica, Tecnológica e Innovación

Edición semestral volumen 4, número 8, julio-diciembre 2026



