

# INTERFACES





# IN TERE FASEs

—

*Interfases*

Revista de la Carrera de Ingeniería de Sistemas de la Facultad de Ingeniería  
de la Universidad de Lima

N.º 21, julio, 2025

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021>

Lima, Perú

© Universidad de Lima  
Fondo Editorial  
Av. Javier Prado Este 4600  
Urb. Fundo Monterrico Chico  
Santiago de Surco, Lima, Perú  
Código postal 15023  
Teléfono (511) 437-6767, anexo 30131  
[fondoeditorial@ulima.edu.pe](mailto:fondoeditorial@ulima.edu.pe)  
[www.ulima.edu.pe](http://www.ulima.edu.pe)

Edición, diseño y diagramación: Fondo Editorial de la Universidad de Lima.

Correspondencia:  
[interfases@ulima.edu.pe](mailto:interfases@ulima.edu.pe)

Las opiniones expresadas en los artículos firmados son de exclusiva responsabilidad de los autores.  
Los contenidos de la revista *Interfases* son de acceso abierto y se publican bajo los términos de la  
licencia Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).

Periodicidad: semestral  
Arbitraje editorial: revisión por pares doble ciego  
Directorios y catálogos: Redalyc, CrossRef, Dialnet, Latindex y DOAJ

ISSN (en línea): 1993-4912

Hecho el depósito legal en la Biblioteca Nacional del Perú n.º 2020-09967

## DIRECTORA

Dra. Nadia Katherine Rodríguez Rodríguez  
Universidad de Lima, Perú

## EDITOR

Dr. Hernán Nina Hanco  
Universidad de Lima, Perú

## EDITOR ASOCIADO

Dr. Juan Gutiérrez-Cárdenas  
Universidad de Lima, Perú

## ASISTENTE DE GESTIÓN EDITORIAL

Erick Dmitri Valderrama Urbay  
Universidad de Lima, Perú

## COMITÉ EDITORIAL

Dr. Cristiano Maciel, Universidade Federal de Mato Grosso, Brasil  
Dra. Effie Lai-Chong Law, Durham University, Inglaterra  
Dr. Enrique Arias Antúnez, Universidad de Castilla - La Mancha, España  
Dr. Guillermo Antonio Dávila Calle, Universidad de Lima, Perú  
Dra. Indira Guzman, California State Polytechnic University, Estados Unidos  
Dr. Marcos Dias de Paula, Centro Universitario Alves Faria (UNIALFA), Brasil  
Dr. Marco Antonio Sotelo Monge, Indra, España  
Dra. Maria Florencia Pollo Cattaneo, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina  
Dr. Michael Dorin, University of St. Thomas, Estados Unidos  
Dra. Nelly Condori Fernández, Universidad Santiago de Compostela, España  
Dra. Ruth María Reátegui Rojas, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador

## REVISORES CIENTÍFICOS

Dra. Paola Daniela Budan, Universidad Nacional del Chaco Austral, Argentina  
Dr. Wilson Andrés Castillo Rojas, Universidad de Atacama, Chile  
Dr. Hans Harley Ccacyahuilca Bejar, Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco, Perú  
Mag. Maria Cristina Cervera Quijano, Tecnológico Nacional de México, México  
Dr. Michael Dorin, University of St. Thomas, Estados Unidos  
Dr. Dario Francisco Dueñas Bustinza, Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú  
Dr. Juan Manuel Gutiérrez Cárdenas, Universidad de Lima, Perú  
Dr. Julio Huarachi, Universidad de Lima, Perú

Mag. Jorge Luis Ireya Nuñez, Universidad de Lima, Perú  
Mag. Cesar Stuardo Lucho Romero, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú  
Dra. Florencia Pollo Cattaneo, Universidad Tecnológica Nacional, Argentina  
Mag. Hernan Alejandro Quintana Cruz, Universidad de Lima, Perú  
Mag. Lourdes Ramirez Cerna, Universidad de Lima, Perú  
Dra. Ruth María Reátegui Rojas, Universidad Técnica Particular de Loja, Ecuador  
Dr. José Antonio Rodríguez Melquiades, Universidad Nacional de Trujillo, Perú  
Dra. Aurea Rossy Soriano Vargas, Universidad de Ingeniería y Tecnología - UTEC, Perú  
Dra. María de Lourdes Tiburcio Sánchez, Universidad de Guanajuato, México  
Dr. Ronny Villafuerte Serna, Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Perú

# ÍNDICE

PRESENTACIÓN	9
<i>Nadia Katherine Rodríguez Rodríguez</i>	
ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN	13
Transformación digital y el avance de la industria 4.0 en las empresas peruanas	15
<i>Bertha Haydeé Díaz-Garay</i>	
<i>Maria Teresa Noriega-Aranibar</i>	
<i>Abel Antonio Martin Reaño Vera</i>	
<i>Ruth Vásquez Rivas Plata</i>	
<i>Edgardo Roberto Montero Sarmiento</i>	
<i>Pablo Alberto Rojas Jaén</i>	
Creando asistentes, agentes y plataformas colaborativas de inteligencia artificial	35
<i>Olda Bustillos Ortega</i>	
<i>Jorge Murillo Gamboa</i>	
<i>Olman Núñez Peralta</i>	
<i>Fabián Rodríguez Sibaja</i>	
Clasificación automatizada de superficies citrícolas mediante SVM y patrones temporales de NDVI: aplicaciones para agricultura de precisión y gestión logística	59
<i>Fabiola Sánchez-Galván</i>	
<i>Rogelio García-Rodríguez</i>	
<i>Paulino Salas Martínez</i>	
<i>María Xóchitl Altamirano Herrera</i>	
<i>Horacio Bautista-Santos</i>	

Underwater Plastic Waste Detection with YOLO and Vision Transformer Models	81
<i>Jonathan Bruce Cárdenas Rondoño</i>	
<i>Ners Armando Vasquez Espinoza</i>	
<i>Edwin Jonathan Escobedo Cárdenas</i>	
El árbol de ciberseguridad: una propuesta de formación al ciudadano, a las instituciones y a la sociedad	101
<i>Olda Bustillos Ortega</i>	
<i>Jorge Murillo Gamboa</i>	
<i>Daniel Mena Bocker</i>	
<i>Carlos De la O Fonseca</i>	
Análisis de aplicaciones móviles para el aprendizaje de la electrónica en México	125
<i>Irene Aguilar Juárez</i>	
<i>Leslie Jasiel Sánchez Cortés</i>	
ARTÍCULOS DE REVISIÓN	147
Abstracción de tecnología subyacente y gestión de dominios en <i>frameworks</i> de desarrollo: revisión sistemática de literatura	149
<i>Nicolás Simoncini</i>	
<i>Pablo Pytel</i>	
Una revisión sistemática de sistemas de generación automática de rutas	179
<i>Gian Paul Iparraguirre Leyva</i>	
<i>Marco Antonio Coral Ygnacio</i>	
DATOS DE LOS AUTORES	209



# PRESENTACIÓN

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.8049>

La revista *Interfases*, en su edición 21, presenta ocho artículos que abordan temas relevantes sobre inteligencia artificial, ciberseguridad y educación en computación. Estos tópicos se encuentran dentro de las áreas de alcance de la revista, como ciencias de la computación, ingeniería de *software*, sistemas de información, tecnologías de la información, ciberseguridad, ciencia de datos, entre otros. Los artículos incluidos fueron seleccionados tras un riguroso proceso de revisión por pares ciegos.

Queremos agradecer a todos los autores que sometieron sus trabajos a revisión. Este proceso no solo permitió la evaluación académica, sino también propició un valioso espacio de interacción entre autores y revisores, lo que generó un entorno de aprendizaje y enriquecimiento mutuo. Resaltamos este hecho, ya que la publicación de un número representa un proceso intenso de trabajo académico que refleja los desafíos que enfrentan actualmente las publicaciones científicas, especialmente en un contexto marcado por la inteligencia artificial y las tecnologías emergentes. Estos desafíos nos impulsan a adaptar continuamente nuestras políticas editoriales y a trabajar en estrecha colaboración con nuestras indexadoras aliadas (Redalyc, Latindex, DOAJ y Dialnet), las cuales nos brindan actualizaciones sobre políticas editoriales y estrategias para afrontar los cambios fundamentales de esta nueva sociedad digital.

En esta edición, agradecemos especialmente las contribuciones provenientes de Argentina, Costa Rica, México y Perú. Desde Argentina, recibimos una destacada contribución titulada "Abstracción de tecnología subyacente y gestión de dominios en *frameworks* de desarrollo: revisión sistemática de literatura", presentada por Nicolás Simoncini y Pablo Pytel de la Facultad Regional Buenos Aires de la Universidad Tecnológica Nacional.

Desde Costa Rica, investigadores de la Universidad Internacional de las Américas (San José) —Olda Bustillos Ortega, Jorge Murillo Gamboa, Olman Núñez Peralta, Fabián Rodríguez Sibaja, Daniel Mena Bocker y Carlos De la O Fonseca— presentaron dos artículos: "Creando asistentes, agentes y plataformas colaborativas de inteligencia artificial: instituciones y sociedad" y "El árbol de ciberseguridad: una propuesta de formación al

ciudadano, a las instituciones y a la sociedad". Ambos contribuyen significativamente en los campos de la inteligencia artificial y la ciberseguridad, desde un enfoque educativo.

Desde México, se incluyen dos trabajos relevantes. El primero, desarrollado por investigadores del Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca —Fabiola Sánchez-Galván, Rogelio García-Rodríguez, Paulino Salas Martínez, María Xóchitl Altamirano Herrera y Horacio Bautista-Santos—, se titula "Clasificación automatizada de superficies cítricas mediante SVM y patrones temporales de NDVI: aplicaciones para agricultura de precisión y gestión logística". El segundo artículo, de la Universidad Autónoma del Estado de México, fue elaborado por Irene Aguilar Juárez y Leslie Jasiel Sánchez Cortés, y lleva por título "Análisis de aplicaciones móviles para el aprendizaje de la electrónica en México", una valiosa aportación en el campo de la educación en computación.

Desde Perú, contamos con tres importantes contribuciones. La primera, desarrollada por investigadores de la Universidad de Lima —Bertha Díaz-Garay, María Noriega-Aranibar, Abel Antonio Reaño Vera, Ruth Vásquez Rivas Plata, Edgardo Roberto Montero Sarmiento y Pablo Rojas—, se titula "Transformación digital y el avance de la industria 4.0 en las empresas peruanas". Este estudio, sin duda, servirá como referente para empresas que buscan adaptarse al entorno digital actual. La segunda contribución, también de la Universidad de Lima, corresponde a los autores Jonathan Bruce Cárdenas Rondoño, Ners Armando Vásquez Espinoza y Edwin Jonathan Escobedo Cárdenas, con el artículo "Underwater Plastic Waste Detection with YOLO and Vision Transformer Models". Esta es una propuesta innovadora que combina inteligencia artificial y sostenibilidad, y ofrece una herramienta para mitigar los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas marinos. La tercera investigación, "Una revisión sistemática de sistemas de generación automática de rutas", presentada por Gian Paul Iparraguirre Leyva y Marco Antonio Coral Ygnacio, de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, brinda nuevas perspectivas para futuras líneas de investigación que propongan la generación de algoritmos y propuestas de solución que incluyan tecnologías, como el uso de drones o sensores autónomos, en la generación automática de rutas.

Como se puede apreciar, esta edición reúne contribuciones valiosas que fortalecen el contenido científico de nuestra revista. Agradecemos profundamente a los autores por confiar en *Interfases* como plataforma de difusión de sus investigaciones. También extendemos nuestro agradecimiento a los revisores que participaron en el proceso de evaluación, quienes evaluaron un total de veintiséis artículos, de los cuales se seleccionaron ocho. Cabe resaltar que este proceso selectivo garantiza la calidad de nuestras publicaciones. Nuestros revisores pertenecen a diversas instituciones académicas: Universidad Nacional del Chaco Austral (Argentina), Universidad de Atacama (Chile), Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (Perú), Tecnológico Nacional

de México (México), University of St. Thomas (Estados Unidos), Universidad Nacional Federico Villarreal (Perú), Universidad de Lima (Perú), Pontificia Universidad Católica del Perú (Perú), Universidad Tecnológica Nacional (Argentina), Universidad Técnica Particular de Loja (Ecuador), Universidad Nacional de Trujillo (Perú), Universidad de Ingeniería y Tecnología (Perú) y Universidad de Guanajuato (México).

Finalmente, expresamos nuestro más sincero agradecimiento al Fondo Editorial y al Área de Colecciones de la Biblioteca de la Universidad de Lima, por su invaluable soporte técnico en los procesos de revisión de estilo, diagramación y publicación de esta edición 21 de *Interfases*.

Dra. Nadia Katherine Rodríguez Rodríguez  
Directora de *Interfases*



## ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN



# TRANSFORMACIÓN DIGITAL Y EL AVANCE DE LA INDUSTRIA 4.0 EN LAS EMPRESAS PERUANAS

BERTHA HAYDEÉ DÍAZ-GARAY

<https://orcid.org/0000-0002-8409-3210>

[bdiaz@ulima.edu.pe](mailto:bdiaz@ulima.edu.pe)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

MARIA TERESA NORIEGA-ARANIBAR

<https://orcid.org/0000-0001-6824-1415>

[manorieg@ulima.edu.pe](mailto:manorieg@ulima.edu.pe)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

ABEL ANTONIO MARTIN REAÑO VERA

<https://orcid.org/0000-0002-9024-4986>

[arvera@ulima.edu.pe](mailto:arvera@ulima.edu.pe)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

RUTH VÁSQUEZ RIVAS PLATA

<https://orcid.org/0000-0003-4372-6015>

[Rvasquez@ulima.edu.pe](mailto:Rvasquez@ulima.edu.pe)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

EDGARDO ROBERTO MONTERO SARMIENTO

<https://orcid.org/0000-0002-7803-9912>

[Emontero@ulima.edu.pe](mailto:Emontero@ulima.edu.pe)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

PABLO ALBERTO ROJAS JAÉN

<https://orcid.org/0000-0002-9955-6740>

[Projasj@ulima.edu.pe](mailto:Projasj@ulima.edu.pe)

Facultad de Ingeniería, Universidad de Lima, Perú

Recibido: 15 de enero del 2025 / Aceptado: 25 de marzo del 2025

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.7706>

**RESUMEN.** La transformación digital y la industria 4.0 representan una revolución en los modelos de negocio, los procesos productivos y la gestión de la información, impulsada por tecnologías avanzadas. En este artículo se propone explorar la transformación digital en empresas peruanas desde la perspectiva de sus líderes. El alcance de la investigación fue de tipo exploratorio y descriptivo, con un enfoque mixto, y se identificó el avance

en el proceso de transformación digital de las organizaciones peruanas. Para la investigación se consideró una muestra de dieciocho grandes empresas de la región Lima y dos de la sierra. A través de una encuesta, se analizaron sus modelos de gestión, el talento humano, las metodologías y las tecnologías que utilizan. Los resultados revelaron que la madurez digital de una empresa está estrechamente vinculada al equipo humano, las metodologías digitales y las tecnologías que emplean. También se encontró que el impacto de la transformación digital depende en gran medida de la madurez digital y del talento de las personas involucradas. Las empresas que lideran este cambio lograron mejores resultados, especialmente en el enfoque hacia el cliente y la eficiencia en sus procesos. Las áreas clave en las que se aplican más las tecnologías digitales están en la toma de decisiones basada en datos, el aprendizaje colaborativo, la exploración de nuevas oportunidades digitales y la ciberseguridad.

PALABRAS CLAVE: impacto tecnológico / modelo de transformación digital / tecnologías digitales / mipymes peruanas / pymes peruanas

## DIGITAL TRANSFORMATION AND THE ADVANCEMENT OF INDUSTRY 4.0 IN PERUVIAN COMPANIES

ABSTRACT. Digital transformation and Industry 4.0 represent a revolution in business models, production processes, and information management, driven by the development and application of advanced technologies. This study aimed to explore the state of digital transformation in Peruvian companies from the perspective of their leaders. The research had an exploratory and descriptive scope, with a mixed-methods approach, and focused on identifying the progress of digital transformation processes within organizations. A sample of 20 large companies was considered: 18 located in the Lima region and 2 in the highlands. Through a survey, their management models, human talent, methodologies, and technologies used were analyzed. The results revealed that a company's digital maturity is closely linked to its human capital, digital methodologies, and the technologies it employs. It was also found that the impact of digital transformation largely depends on the organization's digital maturity and the capabilities of the people involved. Companies leading this change have achieved better outcomes, particularly in customer focus and process efficiency. The key areas where digital technologies are most applied include data-driven decision-making, collaborative learning, the exploration of new digital opportunities, and cybersecurity.

KEYWORDS: technological impact / digital transformation model / digital technologies / Peruvian MSMEs / Peruvian SMEs



## INTRODUCCIÓN

América Latina, debido a su entorno económico, acelera su crecimiento hacia el aumento de la productividad; lo que lleva a las empresas a agilizar el desarrollo de la digitalización empujadas en gran medida por las condiciones que suscitó la pandemia de COVID-19. Sin embargo, hay aspectos que todavía se deben trabajar, como el de fortalecer la relación universidad-empresa, disminuir la brecha digital, efectuar cambios en las estructuras de gestión, inversión, financiamiento, entre otros aspectos (Trujillo Valdiviezo et al., 2022). El problema no radica en la falta de tecnología en cada país, sino en la necesidad de consolidar una cultura digital que forme una comunidad fortalecida en la revolución 4.0. Para lograrlo, las empresas deben invertir en proyectos de innovación científica, lo que a su vez mejorará la economía del país (Soori et al., 2024).

Estudios indican que, en algunos sectores de América Latina, la difusión de tecnologías digitales ha tenido un impacto limitado en la productividad y la inclusión social, debido a la heterogeneidad estructural y la escasa presencia de industrias intensivas en conocimiento. Sin embargo, se han implementado acciones que han acumulado capacidades tecnológicas y organizativas para desarrollar esquemas de apoyo institucional y formar recursos humanos altamente calificados como nuevas oportunidades de negocio mediante la innovación, lo que puede transformar la realidad de los países de la región (Brixner et al., 2020).

De acuerdo con el índice de evolución digital de la *Harvard Business Review*, se reconoce que, en ciertos países de América Latina, como México, Colombia y Bolivia, existe una gran velocidad en la evolución de una innovación impulsada por la tecnología digital, mientras que Chile sobresale en temas de innovación y digitalización (Zalla, 2020). Adicionalmente, destacan Chile y Perú en el impacto en el escenario del emprendimiento para llegar a un desempeño superior (Romero Garibello et al., 2020). Colombia, desde el 2016, ya trabaja con un programa de transformación productiva para mejorar la competitividad de las empresas, mientras que Chile, desde el 2015, cuenta con un programa estratégico de industrias inteligentes (PEII) (Bongomin et al., 2020).

La transformación digital ha llevado a las empresas a cambiar su enfoque con el fin de usar tecnologías digitales y así mejorar su negocio. Por ello, como indican Gatica-Neira et al. (2024), es importante que el líder empresarial tenga conocimiento de transformación digital 4.0 y que cuente con un capital humano especializado y una cultura organizacional dispuesta a innovar. Flores et al. (2022) concluyeron que los gerentes digitales deben adaptar un pensamiento disruptivo y prospectivo, mirar hacia el futuro para encontrar en sus aliados tecnológicos conocimiento, recursos y prácticas para mejorar e innovar sus procesos. Borges et al. (2024) indicaron que la incorporación de metodologías y conceptos de transformación digital en las organizaciones son un soporte que impulsa la mejora de los procesos de gestión de la innovación.

Esta revolución industrial mundial se puede presenciar en diferentes formas e iniciativas. Por ejemplo, el Foro Económico Mundial ha logrado crear conciencia sobre el impacto de la transformación digital en más de 220 organizaciones en todo el mundo (Amaral & Peças, 2021). La transformación digital ha marcado una nueva etapa en el desarrollo industrial denominada industria 4.0, la cual incorpora la fabricación virtual para optimizar los procesos con datos en tiempo real y lograr tiempos de fabricación más cortos, mejor calidad y precios más competitivos (Soori et al., 2024). Así también, Çınar et al. (2021) establecieron la necesidad de un modelo de madurez para evaluar la adopción de la industria 4.0, por lo que definieron a este modelo como una herramienta que evalúa el nivel de desarrollo o preparación de una organización. En específico, evaluaron variables como la integración tecnológica, los sistemas de fabricación ágiles, el flujo de material continuo, la producción autónoma, los servicios basados en datos y el modelado digital.

En su modelo de maduración digital, Murat et al. (2021) describieron las tecnologías y herramientas de transformación digital a través de cuatro dimensiones: industria 4.0, logística 4.0, operaciones 4.0 y gestión 4.0. El objetivo de este modelo es aumentar la participación de la inteligencia artificial (IA) en los procesos de producción y crear fábricas inteligentes que sean más flexibles, adaptables y productivas (Dantas & Macêdo, 2021). Además, las tecnologías de transformación digital contribuyen en facilitar la sostenibilidad ambiental, económica y social de las empresas (Zafar & Alsabban, 2023).

Algunas organizaciones han iniciado la transformación digital optimizando su sitio web con un enfoque para mejorar la experiencia del usuario (*user experience*, UX), elevar la eficiencia, y reducir los costos de desarrollo y fomentar la innovación. Sin embargo, para su evaluación, es necesario e importante construir una cultura digital bajo el liderazgo de los altos ejecutivos y directivos, y hacer hincapié en estrategias, recursos humanos, tecnologías y gestión de sistemas (Delgado Fernández, 2020; Rocha-Jácome et al., 2022).

Según el estudio de Maliqueo et al. (2021), se evidenció que, en el campo de la gestión de recursos humanos, las tecnologías digitales tradicionales se utilizan principalmente para procesos operativos básicos a través del *software* de evaluación del desempeño, los sistemas de nómina y los beneficios sociales. Según Cazares (2023), algunas empresas en México han enfrentado dificultades que obstaculizaron su transformación digital, a pesar de los esfuerzos significativos para mejorar su eficiencia y capacidad de respuesta ante desafíos globales, porque la resolución de estos problemas recae en el Gobierno. Para introducir la excelencia operativa y la industria 4.0 en sus procesos, las empresas requieren un modelo estratégico que considere su madurez digital y proporcione una hoja de ruta; pero también es crucial gestionar eficazmente los recursos clave, como las tecnologías de la información (TI), las tecnologías operativas y los recursos humanos (Facchini et al., 2020; Rocha-Jácome et al., 2022).

Se cuentan también estudios relacionados con las mipymes (micro, pequeña y mediana empresa) y las pymes (pequeña y mediana empresa). Una encuesta a 49 gerentes de mipymes manufactureras peruanas identificó varios factores que afectan al desarrollo de tecnologías facilitadoras, como la falta de capacidad financiera para inversiones, tecnología avanzada, visión general y mano de obra cualificada (Vuksanović et al., 2020). No obstante, los resultados de una encuesta a 307 líderes empresariales en el Perú mostraron que la transformación digital y las competencias digitales influyen significativamente en la gestión digital de recursos humanos, a través de la promoción de prácticas sostenibles, lo que redefine la cultura organizacional (Espina-Romero et al., 2024). Cabe resaltar que la capacitación en habilidades digitales por sí sola no influye en el nivel de desarrollo de las pymes (Gonzalez-Tamayo et al., 2023).

Las pequeñas empresas (ventas anuales superiores a 150 UIT y hasta el monto máximo de 1700 UIT) y medianas empresas (ventas anuales superiores a 1700 UIT y hasta el monto máximo de 2300 UIT), generalmente, tienen una visión de corto plazo y están enfocadas en cumplir con sus clientes y superar las dificultades de mercado. Según Muñoz Moreira et al. (2020), es importante la transformación digital en las pymes para su crecimiento empresarial. Sin embargo, es necesario diseñar una buena planificación para su implementación, mediante el análisis y la definición de objetivos estratégicos. Rahamaddulla et al. (2021) proponen un modelo de preparación que incluye al hombre, la máquina, el método y la gestión para ayudar a las pequeñas y medianas empresas a cumplir con los requisitos de la fabricación inteligente y la industria 4.0.

Entonces, el propósito de esta investigación es explorar el avance de la transformación digital en las empresas peruanas, a través de las opiniones de sus líderes empresariales. El estudio buscó identificar los modelos de gestión, capacidades humanas, metodologías, herramientas y tecnologías digitales utilizadas en sus procesos. La justificación práctica de este estudio es que los resultados contribuirán a la toma de decisiones estratégicas y al diseño de políticas que fomenten una transición efectiva hacia la industria del futuro.

Asimismo, se definieron las siguientes hipótesis: la madurez digital y el equipo humano contribuyen al nivel de impacto de la transformación digital, así como el equipo humano, las metodologías digitales y las tecnologías habilitadoras influyen en la madurez digital. Se busca examinar el nivel de impacto de la transformación digital cuando se correlaciona con la madurez digital y el equipo humano, y comprobar la correlación entre la madurez digital y el equipo humano, las metodologías digitales y las tecnologías facilitadoras.

## METODOLOGÍA

El alcance de la investigación fue de tipo exploratorio y descriptivo con un enfoque mixto (cualitativo y cuantitativo) y se identificó el avance en el proceso de transformación digital de las organizaciones peruanas. Como instrumento se utilizó un cuestionario que permitió evaluar el avance a nivel de tres componentes importantes: modelo de gestión para la transformación digital, competencias del equipo humano y tecnologías digitales. Esto permitió explorar las expectativas de las empresas en relación con el tiempo de aplicación de herramientas digitales o tecnologías habilitadoras para lograr una transición al modelo de industria 4.0. También se llevó a cabo un estudio piloto a un grupo de empresas.

El cuestionario fue validado por cinco expertos en el tema. Las preguntas del cuestionario se organizaron en siete dimensiones: modelo de gestión, dimensiones digitales, madurez digital, capacidades del equipo humano, metodologías digitales, tecnologías habilitadoras, herramientas digitales y nivel de impacto. La descripción de cada una de ellas se muestra en la Tabla 1. Para ello, se realizó la validación alfa de Cronbach (George & Mallery, 2003).

**Tabla 1**

*Validación alfa de Cronbach del instrumento de investigación*

Dimensión	Descripción	Alfa de Cronbach	Interpretación
Modelo de gestión	1. La transformación digital en los negocios requiere un modelo de gestión que facilite e impulse el cambio. Indique el nivel de desarrollo de cada uno de los siguientes aspectos de la gestión de su empresa.	0,8921	Buena confiabilidad
Dimensiones digitales	2. Se identifican algunas dimensiones digitales clave en las organizaciones, las cuales se presentan a continuación. Califique el comportamiento de su organización en cada una de ellas.	0,8896	Buena confiabilidad
Madurez digital	3. Cuando una empresa ha logrado un alto nivel de madurez en transformación digital presenta algunas características específicas. Indique el nivel en el cual considera está su empresa en cada una de las características siguientes.	0,8640	Buena confiabilidad
Capacidades del equipo humano	4. Para que una organización impulse la transformación digital, es necesario lograr una transformación cultural y desarrollar competencias del equipo humano. Indique el nivel de habilidades y competencias que ha logrado desarrollar en su organización.	0,8696	Buena confiabilidad

*(continúa)*

(continuación)

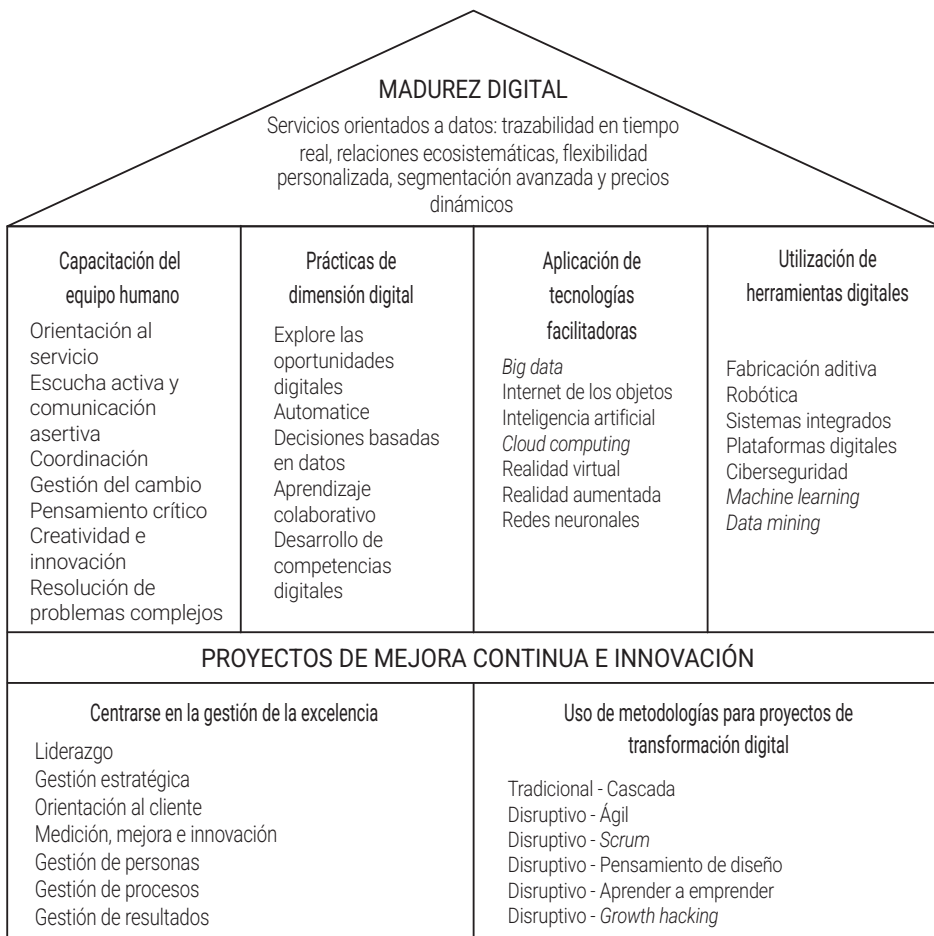
Dimensión	Descripción	Alfa de Cronbach	Interpretación
Metodologías digitales	6. ¿Qué metodologías está empleando en los procesos de su organización para los proyectos de transformación digital? Por favor, marque las respuestas que correspondan.	0,6315	Confiabilidad cuestionable
Tecnologías habilitadoras	7. ¿Qué tecnologías habilitadoras está utilizando su organización para los proyectos de transformación digital y cuál es su nivel de aplicación? Por favor, marque las respuestas que correspondan.	0,8084	Buena confiabilidad
Herramientas digitales	8. ¿Qué herramientas digitales está utilizando su organización para los proyectos de transformación digital y cuál es su nivel de aplicación? Por favor, marque las respuestas que correspondan.	0,7510	Confiabilidad aceptable
Nivel de impacto	11. ¿Cuál es el nivel de impacto de los resultados generados por la transformación digital? Califique el nivel de impacto con la escala (básico, intermedio, avanzado).	0,9074	Confiabilidad excelente

El cuestionario se aplicó a 35 empresas peruanas, de las cuales un 70,58 % de ellas fueron medianas y grandes; el resto (29,41 %) fueron micro y pequeñas empresas. Las preguntas abarcaron ítems como el modelo de gestión para la transformación digital, competencias del equipo humano, tecnologías digitales, avances en la implementación de transformación digital y proyección hacia la industrial 4.0.

Para la comprobación de las hipótesis planteadas, se requirió de los datos resultantes del cuestionario y se utilizó la prueba estadística de regresión múltiple, con los cuales se halló el valor de p y los intervalos de confianza. Para el análisis de las características de las organizaciones que tienen un avance en la transformación digital del negocio, se consideró solamente a veinte empresas categorizadas como gran empresa, las que contestaron cada una de las preguntas. Asimismo, se esbozó un esquema de presentación de las variables objeto de análisis en este estudio, tal y como se muestra en la Figura 1. Para la digitalización de los datos se utilizó Excel y para el procesamiento estadístico Minitab 21 para determinar la correlación o relación entre tales variables. La significación estadística se determinó a través de la regresión lineal múltiple.

**Figura 1**

Presentación de variables de la transformación digital



**RESULTADOS**

Se aplicó la calificación a cada una de las veinte empresas (gran empresa de ventas anuales superiores a 2300 UIT) y se encontraron los resultados expuestos en el Anexo 1. En la revisión sistemática de la literatura, no se ha encontrado material acerca de modelos explicativos sobre la madurez digital en las empresas, de tal forma que puedan replicarse en esta investigación, por lo que se decidió realizar una exploración sobre estas variables respuesta y medir su contribución significativa a la madurez digital.

### Contribución significativa al nivel de impacto en la empresa

Para determinar la contribución al nivel de impacto en la empresa, se empleó la regresión lineal múltiple paso a paso y se detectaron dos variables: madurez digital y el equipo humano.

$$\hat{y} = -9,09 + 0,506 X_1 + 0,631 X_2$$

En la Tabla 2, se presentan los niveles de significación alcanzados por los predictores del modelo, tanto de la madurez digital como del equipo humano (valor p menor que 0,05). Asimismo, la significancia alcanzada del modelo estimado fue 0,001 (menor que 0,05).

**Tabla 2**

*Coefficientes de regresión estimados y significación alcanzada*

Coefficientes de regresión					
Término	Coef.	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	-9,090	3,900	-2,33	0,032	
Madurez digital	0,506	0,230	2,20	0,042	1,08
Equipo humano	0,631	0,202	3,12	0,006	1,08
Varianza del modelo de regresión múltiple					
Fuente	GL	SC ajust.	MC ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	2	173,27	86,636	9,84	0,001
Error	17	149,68	8,805		
Total	19	322,95			

También se determinó que el porcentaje de variación del nivel de impacto explicado por los predictores del modelo fue del 53,65 % (coeficiente de determinación), con lo que se alcanzó un nivel explicativo moderado.

### Contribución significativa a la madurez digital en la empresa

Se utilizó regresión lineal múltiple paso a paso para identificar las variables que contribuyen significativamente a la madurez digital. Se encontraron tres: equipo humano, metodologías digitales y tecnologías habilitadoras.

$$\widehat{X}_1 = 14,24 - (0,401)X_2 + (0,506)X_3 + (0,3622)X_4$$

En la Tabla 3, se presentan los niveles de significación de los predictores del modelo: equipo humano, metodologías digitales como tecnologías habilitadoras, todos significativos (valor p menor que 0,05). Asimismo, la significancia alcanzada del modelo estimado fue 0,000 (menor que 0,05).

**Tabla 3**

*Coefficientes de regresión estimados y significación alcanzada*

Coefficientes de regresión estimados					
Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	14,2400	2,3200	6,13	0,000	
Equipo humano	-0,4010	0,1540	-2,61	0,019	1,87
Metodologías digitales	0,5060	0,1800	2,80	0,013	1,58
Tecnologías habilitadoras	0,3622	0,0924	3,92	0,001	2,27
Varianza del modelo de regresión múltiple					
Fuente	GL	SC ajust.	MC ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	131,79	43,930	14,90	0,000
Equipo humano	1	20,05	20,052	6,80	0,019
Metodologías digitales	1	23,19	23,187	7,87	0,013
Tecnologías habilitadoras	1	45,32	45,320	15,38	0,001
Error	16	47,16	2,947		
Total	19	178,95			

Se determinó que el porcentaje de variación de la madurez digital explicado por los predictores del modelo fue del 73,65 %, lo que indica un buen nivel explicativo.

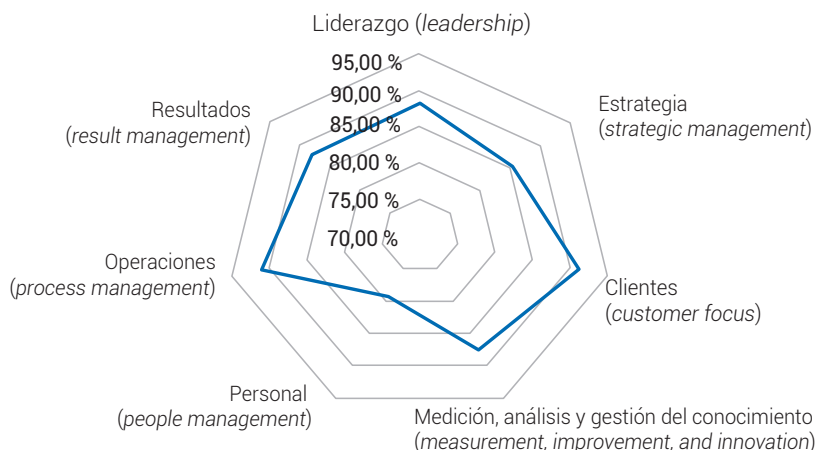
### **Modelo de gestión de las empresas**

Para esta muestra de gran empresa —según el artículo 5 de la Ley 30056 del 2 de julio del 2013, aquellas que declaran ventas anuales superiores a 2300 UIT—, se consideraron los criterios del modelo de excelencia en la gestión del Centro de Desarrollo Industrial (2025), aplicados a empresas que están implementando la transformación digital. Aquellos aspectos que tuvieron mayor nivel de desarrollo fueron la orientación al cliente y la gestión por procesos, tal como se muestra en la Figura 2.



**Figura 2**

*Nivel de desarrollo del modelo de gestión*



### **Sobre la transformación digital en las empresas**

Las respuestas sobre las características específicas que desarrollan las empresas para alcanzar un alto nivel de madurez en transformación digital se consolidaron (sumando el porcentaje en niveles intermedio y avanzado) en la gestión y administración de la información. Se resaltan la trazabilidad y gestión en tiempo real (85 %), la flexibilidad y personalización (80 %) y la segmentación basada en análisis de datos (80 %). En cuanto a las principales barreras para la transformación digital, estas son el desconocimiento o falta de entendimiento de las tecnologías, la inexistencia de una cultura digital del equipo humano y la falta de capacidades para desarrollar y supervisar estos proyectos.

Respecto al impacto de la transformación digital en los resultados del negocio, el 65 % de los encuestados manifestó que se tiene un impacto positivo que se situó entre intermedio y avanzado en los resultados comerciales y organizacionales; mientras que el 60 % manifestó la existencia de impactos a nivel financiero, operativo y organizacional.

### **Sobre el equipo humano**

Con respecto a las competencias del equipo humano (nivel intermedio y avanzado), destaca la coordinación y también la orientación al servicio, la escucha activa y comunicación asertiva, y la resolución de problemas complejos. Con referencia a las dimensiones digitales clave, se identificó que siempre —o la mayoría de las veces— utilizan la toma de decisiones basadas en datos, fomentan el aprendizaje colaborativo, exploran abiertamente las oportunidades digitales y aplican la ciberseguridad. Los encuestados mencionaron varias dificultades en su proceso de transformación digital, como la resistencia al cambio hacia una cultura organizacional digital, el

desconocimiento de nuevas tecnologías, las dificultades de acceso a líneas de financiamiento, así como la reducción de presupuesto por problemas de la pandemia.

### **Sobre las metodologías y tecnologías habilitadoras**

Dentro de las metodologías aplicadas en sus procesos (tales como cascada, *agile*, *scrum*, *design thinking*, *lean start up* y *growth hacking*), destacó la metodología tradicional en cascada, tanto en procesos operativos (39 %), de soporte (46 %) y estratégicos (41 %). Sin embargo, se reconoce la existencia de metodologías como *agile*, principalmente en procesos de soporte (25 %) y *design thinking* en estratégicos (26 %).

En tecnologías habilitadoras, destacó que el 95 % de las empresas ya aplicaba el *cloud computing* en proyectos de transformación digital (nivel prueba, desarrollo, completada, o expansión a toda la organización), seguido del internet de las cosas (60 %) y *big data* (55 %). Por el contrario, otras tecnologías alcanzaron niveles menores al 35 % (*blockchain*, realidad virtual, realidad aumentada, redes neuronales), como se muestra en la Tabla 4.

En cuanto a las herramientas digitales, las empresas confirmaron el uso de plataformas tecnológicas en sus proyectos de transformación digital, ya sea de manera integral o en procesos de expansión. Entre las plataformas utilizadas por la totalidad de las empresas, se encuentran Zoom, Microsoft Teams, Google Meet y de comercio electrónico (*e-commerce*). Así también, el 90 % de las empresas tienen implementadas tecnologías de ciberseguridad; un 60 % de ellas aseguró trabajar con robótica, minería de datos y aprendizaje automático. Finalmente, se registró una disminución en el uso de manufactura aditiva y sistemas embebidos (40 %).

**Tabla 4**

Porcentajes del nivel de aplicación de herramientas digitales y tecnologías habilitadoras

		Ninguna aplicación	Prueba	Desarrollo	Completada	Expansión	Suma horizontal
Tecnología de apoyo	Cloud computing	5	20	40	10	25	100
	Internet de las cosas	40	20	25	5	10	100
	Big data	45	10	30	5	10	100
	Blockchain	65	5	20	5	5	100
	Realidad virtual	70	15	5	5	5	100
	Realidad aumentada	75	10	0	5	10	100
	Redes neuronales	75	10	10	0	5	100
Herramientas digitales	Plataformas digitales (Zoom, Team, Meet, e-commerce u otros)	0	0	0	60	40	100
	Ciberseguridad	10	10	15	35	30	100
	Data mining	40	10	25	15	10	100
	Robótica	40	15	15	20	10	100
	Machine learning	40	20	15	15	10	100
	Manufactura aditiva (impresión 3D)	60	5	15	15	5	100
	Sistemas embebidos	60	15	5	15	5	100

Nota. Los colores corresponden a un mapa de calor o mapa Kelvin. Los tonos hacia el rojo reflejan un menor uso, mientras que los tonos hacia el verde indican un mayor uso o aplicación de las herramientas digitales y tecnologías habilitadoras.

Para iniciar la transición hacia el modelo industria 4.0 en las empresas, se recomienda lo siguiente: alta motivación del personal de soporte y su participación en los proyectos, una buena planificación con asesoría de especialistas, identificación de colaboradores con una cultura digital para integrarlos a los proyectos y aplicación de soluciones digitales y automatización de procesos.

## DISCUSIÓN

El estudio realizado por Miñan et al. (2023) concluyó que varias organizaciones latinoamericanas han aprovechado los modelos de transformación digital para impulsar la innovación, mejorar la competitividad, optimizar procesos, mejorar la experiencia del cliente y la sostenibilidad en el mercado. Del mismo modo, en los resultados de este estudio de empresas peruanas, el impacto de la transformación digital presentó un impacto positivo en los resultados comerciales, operativos y organizacionales.

Barrios et al. (2022) analizaron la información de la encuesta de transformación digital realizada por la Asociación Nacional de Industriales de Colombia (ANDI) e identificaron los retos que enfrentan las empresas en la transición de un modelo tradicional a uno digital. Además, mostraron que los factores que más influían eran el presupuesto para actividades digitales, la ausencia de una cultura digital, el desarrollo de habilidades digitales y la falta de un modelo de negocio digital. El estudio de Trujillo-Valdiviezo et al. (2021), realizado en Eslovenia, también destacó la insuficiencia de conocimientos, habilidades y competencias del equipo humano en materia de transformación digital. Las situaciones expresadas en estas investigaciones también se han reflejado en los resultados de este estudio sobre empresas peruanas.

Maliqueo et al. (2021) realizaron una encuesta a 91 representantes de empresas chilenas e identificaron barreras a la innovación en transformación digital en el área de gestión de personas. Sin embargo, el 82 % reportó incorporar tecnologías en evaluación de desempeño, reclutamiento, remuneración y capacitación, pero, debido a los altos costos y la falta de conocimiento, no han aplicado tecnologías más sofisticadas en sus procesos o proyectos. El estudio mostró que las empresas peruanas utilizan la tecnología digital para la coordinación del trabajo, la toma de decisiones, la formación y el control de las operaciones. Además, la tecnología digital se utiliza para el trabajo a distancia y los modelos de ciberseguridad.

Espinosa-Vélez & Armijos-Buitrón (2022) han señalado que el COVID-19 ha acelerado la digitalización en las empresas ecuatorianas. Sin embargo, aún existe un importante potencial de innovación y transformación digital en toda la cadena de valor para aumentar la competitividad y mantener la posición en el mercado. Por ello, se recomienda implementar estrategias enfocadas en la automatización y la experiencia del cliente, así como estrategias de gestión del cambio para potenciar las tecnologías como habilitadoras de la propuesta de valor. En cuanto a las empresas peruanas consideradas en este estudio, el 45 % de las grandes empresas declaró haber invertido menos del 1 % en los últimos cinco años. Sin embargo, el 10 % ha invertido más del 5 % de sus ventas en proyectos de transformación digital. En promedio, el 60 % planea invertir entre el 1 % y el 4 % de sus ventas en proyectos de transformación digital el próximo año, y solo el 5 % planea invertir más del 5 %.

## CONCLUSIONES

En la muestra de veinte grandes empresas peruanas encuestadas, se observa un importante avance en su transformación digital como transición al modelo 4.0. Sobre sus expectativas para los próximos dos años, un 30 % indicó que implementará operaciones inteligentes y un 25 % trabajará con servicios guiados por datos. Además, entre tres y cinco años, aproximadamente 40 % al 65 % de estas empresas esperan aplicar herramientas digitales o tecnologías habilitadoras en fabricación inteligente, productos inteligentes, operaciones inteligentes y servicios guiados por datos.

Es destacable reconocer que aún las tecnologías disruptivas (metodologías ágiles) no son empleadas mayoritariamente en las empresas, por lo que se mantiene el enfoque tradicional de proyectos en cascada. *Cloud computing* es la primera tecnología habilitadora en expansión en las empresas, lo que da una idea de que el primer paso hacia un proceso de transformación digital es virtualizar los servicios tecnológicos para tenerlos disponibles las veinticuatro horas. En segundo lugar, se encuentra en desarrollo el internet de las cosas, que consiste en conectar dispositivos como sensores o cámaras que ejecuten acciones basadas en dicha información, así como *big data*, que se utiliza para el manejo y gestión de información masiva proveniente de diferentes fuentes de datos.

En cuanto a las barreras para la transformación digital, el desconocimiento o falta de entendimiento de las tecnologías fue una de las barreras principales; en un segundo lugar, la falta de capacidades para desarrollar y supervisar estos avances; y, en tercer lugar, la falta de una cultura digital en el equipo humano. Es importante remarcar que la transformación digital es un proceso dinámico que no solo consiste en la adquisición de herramientas digitales, sino que requiere del desarrollo de habilidades digitales de los colaboradores para generar valor, y un proceso de adaptación de las culturas en los clientes externos e internos.

Es importante destacar que la encuesta realizada entre febrero y agosto del 2022, no tomó en cuenta la herramienta digital ChatGPT ni las tecnologías habilitadoras de IA, que han sido de conocimiento y despliegue masivo desde finales del 2022. Creemos que las ventajas de la IA impulsarán aún más el despliegue de la transformación digital a nivel mundial.

El análisis mostró una interesante correlación entre la madurez digital y el equipo humano, las metodologías digitales y las tecnologías habilitadoras. Asimismo, el nivel de impacto de la transformación digital estaría correlacionada con la madurez digital y el equipo humano. Estos dos resultados refuerzan la conclusión de la importancia del desarrollo del equipo humano para impulsar la transformación digital y el avance de la industria 4.0 en las organizaciones.

Finalmente, el estudio se realizó con un número limitado de empresas, principalmente grandes empresas, y ofrece una visión global de la transformación digital hacia la industria 4.0 en el Perú. Esto deja abierta la posibilidad de investigar por sectores para conocer su desarrollo.

## REFERENCIAS

- Amaral, A., & Peças, P. (2021). A framework for assessing manufacturing SMEs industry 4.0 maturity. *Applied Sciences*, 11(13), 6127. <https://doi.org/10.3390/app11136127>
- Barrios, I., Niebles, L., & Niebles, W. (2022). Análisis de la transformación digital de las empresas en Colombia: dinámicas globales y desafíos actuales. *Aglala*, 12(1), 129-141. <https://revistas.uninunez.edu.co/index.php/aglala/article/view/1864>
- Bongomin, O., Oyondi, E., Ramadhani, M., Hitiyise, E., & Tumusiime, G. (2020). Sustainable and dynamic competitiveness towards technological leadership of industry 4.0: Implications for East African community. *Journal of Engineering*, 2020(1), artículo 8545281. <https://doi.org/10.1155/2020/8545281>
- Borges, R. P., Bitte, M. F., Adorno, O. do A., & Nascimento, P. T. de S. (2024). Digital transformation as a driver of innovation management in established companies. *International Journal of Innovation*, 12(2), e25910. <https://doi.org/10.5585/2024.25910>
- Brixner, C., Isaak, P., Mochi, S., Ozono, M., Suárez, D., & Yoguel, G. (2020). Back to the future. Is industry 4.0 a new tecno-organizational paradigm? Implications for Latin American countries. *Economics of Innovation and New Technology*, 29(7), 705-719. <https://doi.org/10.1080/10438599.2020.1719642>
- Cazares, I. (2023). Impacto de factores exógenos en la transformación digital de las empresas. *Espacios*, 43(8), 73-87. <https://doi.org/10.48082/espacios-a23v44n08p06>
- Çınar, Z. M., Zeeshan, Q., & Korhan, O. (2021). A framework for industry 4.0 readiness and maturity of smart manufacturing enterprises: A case study. *Sustainability*, 13(12), 6659. <https://doi.org/10.3390/su13126659>
- Centro de Desarrollo Industrial. (2025). *Modelo de excelencia en la gestión. Bases 2025*. <https://www.cdi.org.pe/bases-pnc>
- Dantas, R., & Macêdo, S. (2021). The effect of islands of improvement on the maturity models for industry 4.0: The implementation of an inventory management system in a beverage factory. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 18(3), 1-17. <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2021.011>

- Delgado Fernández, T. (2020). Digital transformation taxonomy. *Cuban Magazine of Digital Transformation*, 1(1), 04-23. <https://rctd.uic.cu/rctd/article/view/62>
- Espinosa-Vélez, M.-P., & Armijos-Buitrón, V.-A. (2022). *Digital transformation and its impact on e-commerce in Ecuador*. En N. Callaos, J. Horne, E. F. Ruiz-Ledesma, N. Sánchez & A. Tremante (Eds.), *Memorias de la Décima Segunda Conferencia Iberoamericana de Complejidad, Informática y Cibernética* (pp. 169-174). <https://doi.org/10.54808/CICIC2022.01.169>
- Espina-Romero, L., Ríos, D., Gutiérrez, H., Peixoto, E., Arias-Montoya, F., Noroño-Sánchez, J., Talavera-Aguirre, R., Ramírez, J., & Vilchez, R. (2024). The role of digital transformation and digital competencies in organizational sustainability: A study of SMEs in Lima, Peru. *Sustainability*, 16(16), 6993. <https://doi.org/10.3390/su16166993>
- Flores, J., Urbano, C., & Zúñiga, I. (2022). Habilidades directivas que requieren los gerentes de empresas que operan en entornos digitales. *Semillas del Saber*, 1(1), 35-42. <https://revistas.unicatolica.edu.co/revista/index.php/semillas/article/view/426>
- Facchini, F., Oleśków-Szłapka, J., Ranieri, L., & Urbinati, A. (2020). A maturity model for logistics 4.0: An empirical analysis and a roadmap for future research. *Sustainability*, 12(1), 86. <https://doi.org/10.3390/su12010086>
- Gatica-Neira, F., Ramos-Maldonado, M., Ascuá, R., Revale, H., & Fernández, V. (2024). Digital technologies 4.0 in small and medium-sized manufacturing industries: Cases of the central region of Argentina and the Biobío region of Chile. *SAGE Open*, 14(2). <https://doi.org/10.1177/21582440241249285>
- George, D., & Mallery, P. (2003). *SPSS for Windows step by step: A simple guide and reference* (4.ª ed.). Allyn & Bacon.
- Gonzalez-Tamayo, L., Maheshwari, G., Bonomo-Odizzio, A., Herrera-Avilés, M., & Krauss-Delorme, C. (2023). Factors influencing small and medium size enterprises development and digital maturity in Latin America. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 9(2). <https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100069>
- Ley 30056 del 2013. Por la cual se establece la "Ley que modifica diversas leyes para facilitar la inversión, impulsar el desarrollo productivo y el crecimiento empresarial". 2 de julio de 2013. Diario Oficial El Peruano. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3017949/Ley%2030056.pdf?v=1649882208>
- Maliqueo, C., González, J., Mardones, R., & Ardiles, M. (2021). Gestión de personas y las barreras para innovar en la transformación digital. *Revista Venezolana de*

*Gerencia*, 26(94), 510-532. <https://www.redalyc.org/journal/290/29069612003/html/>

- Miñan, G., Pacheco, E., Rivas, M., Pulido L., & Contreras, L. (2023). Digital transformation in Latin America: A systematic literature review between 2019-2023. *International Journal of Applied Engineering and Technology*, 5(3), 25-32. <https://romanpub.com/resources/ijaet%20v5-3-2023-04.pdf>
- Muñoz Moreira, M. J., Vaca Ortega, M. C., Mina Palacios, E. B., & Torres Panezo, M. S. (2020). Claves para la transformación digital de las pymes. *Visionario Digital*, 4(1), 67-80. <https://doi.org/10.33262/visionariodigital.v4i1.1101>
- Murat, Z., Zeeshan, Q., & Korhan, O. (2021). A framework for industry 4.0 readiness and maturity of smart manufacturing enterprises: A case study. *Sustainability*, 13(12), 6659. <https://doi.org/10.3390/su13126659>
- Rahamaddulla, S., Leman, Z., Baharudin, B., & Ahmad, S. (2021). Conceptualizing smart manufacturing readiness-maturity model for small and medium enterprise (SME) in Malaysia. *Sustainability*, 13(17), 9793. <https://doi.org/10.3390/su13179793>
- Rocha-Jácome, C., González, R., Muñoz, F., Guevara-Cabezas, E., & Hidalgo, E. (2022). Industry 4.0: A proposal of paradigm organization schemes from a systematic literature review. *Sensors*, 22(1), 66. <https://doi.org/10.3390/s22010066>
- Romero Garibello, J. R., Barbosa Guerrero, L. M., & Martínez Amado, W. (2020). La IoT: una nueva ventana de oportunidad para pymes latinoamericanas en tiempos de la COVID-19. *Reto*, 8(1), 53-66. <https://doi.org/10.23850/reto.v8i1.2931>
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2024). Virtual manufacturing in industry 4.0: A review. *Data Science and Management*, 7(1), 47-63. <https://doi.org/10.1016/j.dsm.2023.10.006>
- Trujillo-Valdiviezo, G., Rodríguez-Alegre, L., Sunohara-Ramírez, P., & Sunohara-Ramírez, D. (2021). Tecnologías emergentes. ¿Una realidad u utopía en Peru? *Koinonía*, 6(1), 163-178. <https://doi.org/10.35381/r.k.v6i1.1221>
- Trujillo Valdiviezo, G., Rodríguez Alegre, L., Mejía Ayala, D., & López Padilla, R. (2022). Transformación digital en América Latina: una revisión sistemática. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(100), 1519-1536. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.100.15>
- Vuksanović, I., Kuč, V., Mijušković, V., & Herceg, T. (2020). Challenges and driving forces for industry 4.0 implementation. *Sustainability*, 12(10), 4208. <https://doi.org/10.3390/su12104208>



- Zafar, M., & Alsabban, A. (2023). Industry-4.0-enabled digital transformation: Prospects, instruments, challenges, and implications for business strategies. *Sustainability*, 15(11), 8553. <https://doi.org/10.3390/su15118553>
- Zalla, R. (2020). Industrial revolution 4.0: Where are we going? *Boletín Informativo del Grupo de Jóvenes Investigadores*, 2(8), 15-18. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/103050>

**ANEXOS**

**Anexo 1**

*Resultados de la calificación por criterios en cada una de las empresas*

Empresas	Modelo de gestión	Dimensiones digitales	Madurez digital	Capacidades del equipo humano	Metodologías digitales	Tecnologías habilitadoras	Herramientas digitales	Nivel de impacto
1	18	23	15	19	6	17	17	9
2	12	10	7	14	0	1	6	4
3	16	14	10	16	4	3	9	5
4	15	18	12	16	2	4	9	10
5	18	17	11	16	6	6	11	9
6	12	25	13	16	7	9	16	2
7	18	24	7	18	1	3	9	3
8	19	19	13	16	3	1	7	4
9	15	23	13	15	4	7	18	13
10	14	16	12	16	0	6	10	10
11	0	11	8	15	1	3	6	6
12	15	16	12	19	6	3	8	10
13	20	27	17	23	7	21	26	15
14	17	19	13	21	4	9	11	12
15	14	14	8	14	0	0	6	0
16	21	20	10	22	7	7	13	10
17	9	13	17	9	6	5	9	4
18	20	27	16	23	6	23	22	12
19	15	18	12	18	5	6	10	11
20	17	22	15	21	9	12	19	10
Máximo	21	28	18	27	18	28	28	15

# CREANDO ASISTENTES, AGENTES Y PLATAFORMAS COLABORATIVAS DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

OLDA BUSTILLOS ORTEGA

<https://orcid.org/0000-0003-2822-3428>

obustillos@uia.ac.cr

Escuela de Ingeniería Informática, Universidad Internacional de las Américas,  
Costa Rica

JORGE MURILLO GAMBOA

<https://orcid.org/0000-0001-5548-8283>

jmurillo@uia.ac.cr

Escuela de Ingeniería Informática, Universidad Internacional de las Américas,  
Costa Rica

OLMAN NÚÑEZ PERALTA

<https://orcid.org/0000-0001-6780-022X>

onunez@uia.ac.cr

Escuela de Ingeniería Informática, Universidad Internacional de las Américas,  
Costa Rica

FABIÁN RODRÍGUEZ SIBAJA

<https://orcid.org/0009-0008-3276-9865>

frodriguez@uia.ac.cr

Escuela de Ingeniería Informática, Universidad Internacional de las Américas,  
Costa Rica

Recibido: 6 de febrero del 2025 / Aprobado: 21 de abril del 2025

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.7801>

**RESUMEN.** Este artículo explora el desarrollo y la aplicación de inteligencia artificial en la creación de asistentes, agentes y plataformas colaborativas. Se analizan diversas aplicaciones y usos de la inteligencia artificial destacando su impacto en la educación, industria, atención al cliente, gestión de proyectos y en la experiencia del usuario. Se contrastan tres analogías para describir y comprender la aplicación de la inteligencia artificial en una organización: el chef de cocina, el modelo de madurez CMMI y la cadena de suministro. Se examinan métodos y tecnologías para el desarrollo de estos sistemas, así como desafíos técnicos, riesgos y consideraciones éticas en su implementación. Iniciativas de asistentes de inteligencia artificial diseñados para docentes universitarios y de agentes de IA en procesos para la industria son analizadas, explorando sus funcionalidades

y beneficios. Se elaboran figuras y cuadros resumen sobre los hallazgos y se brindan recomendaciones para implementación de agentes y asistentes de IA en la academia, instituciones y empresas.

PALABRAS CLAVE: agentes / asistentes / educación / inteligencia artificial / tecnología

## DEVELOPING AI ASSISTANTS, AGENTS, AND COLLABORATIVE PLATFORMS

ABSTRACT. This article explores the development and application of artificial intelligence (AI) in the creation of assistants, agents, and collaborative platforms. Various applications and uses of AI are analyzed, highlighting their impact on education, industry, customer service, project management, and user experience. Three analogies are contrasted to describe and understand the application of AI in an organization: the Chef de Cuisine, the CMMI maturity model, and the Supply Chain. Methods and technologies for the development of these systems are examined, as well as technical challenges, risks, and ethical considerations in their implementation. Initiatives for AI assistants designed for university professors and AI agents in industrial processes are analyzed, exploring their functionalities and benefits. Figures and tables summarize the findings, and recommendations are provided for the implementation of AI Agents and Assistants in academia, institutions, and companies.

KEYWORDS: agents / artificial intelligence / assistants / education / technology

## INTRODUCCIÓN

### Definiciones y objeto de estudio

Podemos definir a la inteligencia artificial (IA) como un ámbito de estudio y desarrollo de sistemas computacionales capaces de llevar a cabo tareas con destrezas cognitivas semejantes a las de los seres humanos. También, la IA tiene como objetivo diseñar máquinas que puedan simular funciones cognitivas humanas que les permitan resolver problemas de manera eficiente.

En este artículo se analizan los agentes, asistentes y plataformas de IA que están cambiando el panorama de diferentes sectores en términos de eficiencia, personalización y colaboración de las computadoras en actividades humanas. Un agente de IA puede operar en un entorno al detectar cambios con sensores y provocar modificaciones en ese entorno (Coloma Garofalo et al., 2021).

Con respecto a la precisión y veracidad de las respuestas de estas herramientas de IA, podemos usar un ejemplo concreto para ilustrarlo. Si le preguntamos a un agente de IA cuántos días libres de vacaciones tenemos para aprovechar este año, es de esperar que no vaya a responder adecuadamente, porque no tiene acceso a nuestra información personal ni de nuestros trabajos. Para resolver este asunto, se le redactan instrucciones específicas para que acceda a una base de datos en la que se encuentra esta información. Procedemos a reformular de nuevo la pregunta, pero con la diferencia de que ahora se le pide al agente que acceda a una base de datos específica y que extraiga de allí la información. Es de esperar que pueda brindarnos una respuesta precisa y veraz. Este es un ejemplo que ilustra un entrenamiento básico a un agente de IA para que se enfoque en utilizar cierta información para aumentar la probabilidad de tener respuestas más certeras y confiables.

En el ámbito educativo, los asistentes de IA vienen desempeñando un papel crucial, pues los profesores universitarios se apoyan en ellos para la gestión de clases, automatizar la gestión de evaluaciones y otras tareas administrativas. No solo ayudan a reducir la carga de trabajo, sino que también facilitan el progreso estudiantil al ofrecer retroalimentación en tiempo real, lo que mejora la experiencia de aprendizaje. Además, proporcionan recursos académicos generados como casos y ejercicios personalizados, lo que es una asistencia valiosa para los docentes. Los estudiantes, por su lado, utilizan la IA para explorar y crear soluciones personalizadas y adaptativas de acuerdo con las necesidades y habilidades individuales (Casas Tolentino, 2023).

Al comparar asistentes, agentes y plataformas de IA, podemos entender a los asistentes de IA como aquellas herramientas informáticas cuyo propósito es simplificar nuestras tareas diarias. Una forma de interactuar con ellos es generando preguntas a través de comandos específicos; entonces, los asistentes de IA nos proporcionan

respuestas rápidas y precisas a diversas consultas. Los agentes inteligentes no solo responden a comandos simples, sino que también aprenden y se adaptan a las necesidades de los usuarios. Por otro lado, existen plataformas colaborativas basadas en *big data* y aprendizaje automático que optimizan procesos complejos como la gestión de proyectos y mejoran la colaboración entre equipos. Estas herramientas aumentan la eficiencia y la productividad de manera innovadora y efectiva; sin embargo, su aprovechamiento pleno requiere una adecuada alfabetización digital (Cotrina-Aliaga et al., 2021).

Llevar a cabo el desarrollo y la implementación de asistentes, agentes y plataformas de IA conlleva una serie de desafíos y riesgos, incluida la necesidad de garantizar la precisión y fiabilidad de las respuestas proporcionadas por estos sistemas. Además, se presenta el reto de integrar eficazmente estas tecnologías con las infraestructuras existentes de sistemas automatizados en la organización. Sin embargo, también surgen riesgos importantes, como la privacidad y seguridad de los datos, el posible sesgo en los algoritmos de IA y las implicaciones éticas asociadas a su uso (Ubal Camacho et al., 2023).

En el ámbito de la educación media y superior, tanto las instituciones como los docentes deben estar preparados para desempeñar un papel clave en la adopción de la IA en sus clases. El verdadero desafío no radica solo en la adquisición o implementación de tecnologías de IA, sino en su comprensión, desarrollo y adaptación efectiva dentro de las aulas. Esto permitirá una integración más significativa y pertinente, tanto en el ámbito académico como en la investigación (Cotrina-Aliaga et al., 2021).

### Analogías sobre la IA

Para comprender la interacción entre agentes y asistentes, se presentan en este estudio tres analogías funcionales entre ellos para contrastar su interacción y se añade el rol de un orquestador de IA como coordinador de nivel superior. Posteriormente, se ampliarán estas tres analogías:

- a. El chef de cocina y la brigada de asistentes: consiste en una comunidad de agentes y asistentes de IA orquestados por el chef ejecutivo con el rol de manejar la relación y la comunicación entre los diferentes actores en la cocina.
- b. El modelo de integración de modelos de madurez de capacidades (*capability maturity model integration*, CMMI): consiste en un modelo enfocado en la mejora y validación de procesos. En el contexto de este artículo, se utiliza para medir el nivel de madurez de una organización en cuanto al uso de agentes, asistentes y orquestadores de IA.
- c. La cadena de suministro (*supply chain*): es una tecnología que gestiona a los contratistas, proveedores, almacenes de materia prima y producto

terminado, canales de distribución, mayoristas, minoristas hasta llegar al cliente final. Al definir los procesos relacionados con la cadena de suministro, se introducen agentes y asistentes de IA entrenados en tareas específicas de la cadena. Esta analogía ubica los roles de asistentes y agentes de IA como elementos activos dentro de la cadena de suministro usualmente gestionada por humanos.

Con estas tres analogías funcionales, se plantea al lector, a manera de relato, la funcionalidad de agentes y asistentes de IA dentro de una organización. En los tres casos, se brindan ejemplos, a manera de guía, aplicables para el diseño, desarrollo e implementación de soluciones automatizadas apoyadas en asistentes, agentes y plataformas de IA.

Una vez que una organización comience a automatizar con IA sus procesos y a poner en funcionamiento a los agentes y asistentes con tareas puntuales, se abre la oportunidad de introducir un nivel superior que realice la coordinación. Aquí aparece el orquestador de IA, quien crea flujos de trabajo inteligentes sistematizando a los demás actores. Un orquestador, como un ente más evolucionado y entrenado, apoyado en la experiencia generada, podría analizar el entorno e ir asignando tareas específicas a los demás agentes y asistentes de IA, incluso podría gestionar los cuellos de botella desde un nivel superior. Más adelante, se explorarán en detalle estas tres analogías.

## OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

Como objetivo principal, se busca analizar los aspectos técnicos del desarrollo de asistentes y agentes de IA, su impacto en la experiencia del usuario y su posible aplicación en distintos contextos. En el ámbito educativo, se busca describir las funciones que la IA puede ofrecer a través de la exploración de nuevas oportunidades para mejorar y transformar los procesos de enseñanza y aprendizaje.

Dentro de los objetivos específicos de la investigación, se consideran los siguientes:

- a. examinar el entorno de la IA con respecto a la introducción de asistentes virtuales, agentes inteligentes y plataformas colaborativas
- b. analizar herramientas y aplicaciones de IA utilizadas en sistemas y procesos
- c. comparar el uso de asistentes y agentes de IA, así como el impacto en la experiencia del usuario en diversos contextos, incluyendo la formación académica
- d. organizar los resultados en tablas de resumen que muestren las analogías de IA: el chef de cocina, el modelo de madurez CMMI y la cadena de suministro

Como producto final de la investigación, se presenta un resumen de hallazgos y recomendaciones para futuras investigaciones en el campo de la IA.

## **METODOLOGÍA**

Para este estudio, se aplicó un enfoque mixto que combinó tanto métodos cualitativos como cuantitativos. Se excluyeron temas de artículos relacionados con asistentes de investigación, educación, leyes, agentes de información y gestores de información en internet. A continuación, se describe cada componente de la metodología.

### **Revisión de literatura (análisis de documentos)**

Se realizó una revisión de literatura utilizando los criterios de búsqueda "asistentes y agentes de IA". Se accedió a diferentes bases de datos, tales como Google Académico, ProQuest Digital Dissertation and Theses, IEEE Xplore y Academia.edu. Adicionalmente, se examinaron publicaciones sobre IA aplicada a la creación de asistentes, agentes y plataformas colaborativas, implementaciones de sistemas de IA, sus aplicaciones en diversos sectores y las implicaciones éticas asociadas.

### **Sesiones de trabajo**

Se llevaron a cabo reuniones con expertos, como arquitectos de IA y desarrolladores de aplicaciones de IA, con el objetivo de discutir y plantear analogías sobre el uso de agentes y asistentes de IA, así como obtener retroalimentación respecto al uso de orquestadores y plataformas colaborativas.

### **Análisis comparativo**

Los hallazgos obtenidos fueron analizados a través de la comparación con estudios previos y la consulta con expertos en el campo. Se presentaron los resultados sobre la efectividad de los asistentes y agentes de IA, así como recomendaciones para su implementación y mejora futura. Gracias a las analogías, se comprendió cómo la IA facilitó la definición y creación de herramientas colaborativas con impacto en la industria, la educación y la colaboración en línea.

Los resultados se agruparon en las siguientes áreas: herramientas y aplicaciones de IA, asistentes y agentes de IA, plataformas colaborativas de IA y experiencia del usuario.



## RESULTADOS

### Usos de la inteligencia artificial

#### *Herramientas y aplicaciones de la inteligencia artificial*

Un primer ejemplo del uso de IA lo tenemos en el área de recursos humanos, con una solución para ayudar a que los trabajadores más vulnerables puedan encontrar nuevas oportunidades laborales o desarrollar sus carreras. La aplicación de IA Create Your Own Future (CYOF) es un conjunto de herramientas diseñadas para fomentar la empleabilidad, para lo cual brinda apoyo en la búsqueda de un empleo sostenible. Además, ayuda a identificar la personalidad vocacional de los usuarios mediante la creación de una hoja de ruta personalizada, pues facilita tanto el progreso en su carrera actual como también ofrece la perspectiva de un nuevo camino laboral (Grosso et al., 2022).

En educación, los tutores inteligentes están siendo cada vez más utilizados para la enseñanza de ciencias, matemáticas, idiomas y otras disciplinas. Junto con la robótica educativa, facilitan que los estudiantes se familiaricen con la mecánica, la electrónica, la electricidad y la informática, lo que promueve el desarrollo de ciencias como la física y las matemáticas (León Rodríguez & Viña Brito, 2017). Asimismo, la IA se integra a través de diversas herramientas diseñadas para optimizar los procesos de enseñanza y aprendizaje. Estas incluyen sistemas de tutoría inteligente, *software* de evaluación y retroalimentación automática, asistentes virtuales y plataformas de chatbots educativos (Ferreira Beni et al., 2023).

En el plano de la educación, algunos temen que la IA pueda eventualmente reemplazar a los docentes. Sin embargo, un estudio de Ka Yuk Chan y Tsi (2023) indica que la mayoría de los participantes sostienen que los docentes humanos poseen cualidades únicas, como el pensamiento crítico, la creatividad y las emociones, lo que los hacen irremplazables, sobre todo en las competencias socioemocionales desarrolladas a través de interacciones humanas, que las tecnologías de IA no pueden replicar actualmente. Por ello, los profesores deben integrar la IA para mejorar la enseñanza y el aprendizaje y no considerarla como un reemplazo. Los docentes son llamados a comprender cómo la IA puede funcionar entre ellos y los estudiantes. Asimismo, es fundamental incluir la alfabetización en IA, enfocándose en aspectos prácticos como la protección de datos, la ética y la privacidad. Un estudio señala que, a pesar de la creciente presencia de la IA en la educación, los estudiantes continúan valorando y respetando a los profesores humanos (Ka Yuk Chan & Tsi, 2023).

Otro estudio de Amyatun y Kholis (2023) sobre la IA en la academia consistió en una prueba de escritura en la que se utilizó la aplicación QuillBot AI como apoyo educativo para veinte estudiantes de undécimo grado con el objeto de desarrollar habilidades en

la creación de textos expositivos. Se aplicó una prueba de escritura a los estudiantes sin utilizar la herramienta. Luego, el investigador enseñó a los estudiantes a utilizar Quillbot AI durante varias sesiones. Después del entrenamiento, los participantes redactaron un nuevo ensayo y ambos textos fueron analizados de manera comparativa. Los resultados mostraron que el uso de QuillBot AI mejoró significativamente las habilidades de escritura, con una puntuación media de 53,55 en la primera evaluación y de 78,9 tras utilizar la herramienta de IA (Amyatun & Kholis, 2023).

Otro ejemplo se encuentra en el desarrollo de videojuegos. En los últimos años, han surgido diversos proyectos de investigación, como Pogamut 3, una plataforma de código abierto diseñada para la creación rápida de agentes virtuales en un entorno 3D dentro del videojuego Unreal Tournament 2004. El Pogamut 3 fue desarrollado para su uso tanto en la investigación como en la educación y en proyectos de desarrollo de videojuego (Gemrot et al., 2009).

En un aula donde hay contacto físico, los estudiantes se reúnen e interactúan con sus amigos con el objetivo de estudiar, contrario al aprendizaje a distancia, donde no es fácil generar esas experiencias y los estudiantes tienden a aburrirse durante los estudios. El estudio de Silva et al. (2021) señala que la mayoría de las aplicaciones actuales de aprendizaje electrónico no incorpora el factor motivacional. Como resultado, con el tiempo, los estudiantes perdieron interés en los cursos, redujeron su rendimiento e, incluso, experimentaron retrocesos en su aprendizaje (Silva et al., 2021).

Para la redacción y elaboración de artículos, ya existen programas informáticos impulsados por inteligencia artificial diseñados para generar contenido escrito con capacidades de procesamiento del lenguaje natural, lo que permite analizar y comprender textos, así como producir resultados escritos similares a los humanos. Un caso específico consiste en redactar ensayos apoyados con la IA, en el que el uso de la tecnología no reemplaza la creatividad ni el intelecto de los escritores humanos, sino que la IA se convierte en una herramienta de asistencia poderosa que permite mejorar y agilizar el proceso. Se han documentado experiencias con IA que permiten ayudar a los estudiantes en varios aspectos de la redacción, desde la lluvia de ideas hasta la corrección y edición (Wood, 2023).

### *Asistentes y agentes de inteligencia artificial*

En el campo de la industria, las empresas emergentes enfrentan una explosión de crecimiento de solicitudes a la hora de registrar nuevos usuarios en línea, por lo que una revisión individual podría requerir de varias personas y, por ser manual, no sería precisa. Los empleados humanos tienden a cansarse y pueden cometer errores luego de varias horas haciendo prácticamente la misma tarea. Este es un caso potencial para incorporar un asistente de IA, el cual se encargaría de llevar a cabo esta revisión de solicitudes, pero de forma automática, validando la información de los nuevos usuarios

contra plantillas guía preparadas de antemano, pero dejándole al humano la toma de decisión, es decir, si acepta o rechaza la solicitud.

La tecnología de *deep learning* o aprendizaje profundo provee una mejora en los algoritmos. Aquí el modelo entrena primero a un asistente de IA con una gran cantidad de datos etiquetados con base en patrones generales tomados de las series de datos que le permite ajustarse y, posteriormente, llevar a cabo una tarea específica (Que & Pan, 2022).

A la hora de diseñar agentes de IA, hay dos factores cruciales que se deben tener en cuenta: sus funcionalidades y sus características sociales. La funcionalidad se refiere a la capacidad de agentes de IA para brindar apoyo, ser empáticos o actuar de manera similar a los humanos. En un caso estudiado, respecto a una interacción social remota, los agentes de inteligencia artificial ofrecieron un gran potencial para respaldar la conectividad social en línea y la conexión social. Sin embargo, también se presentó una preocupación con respecto a las expresiones de opiniones o preferencias de los agentes. Los participantes en línea esperaron o requirieron que el agente de IA siguiera una etiqueta social y que sea consciente dentro del contexto de la interacción social del grupo, además de considerar aspectos relacionados con la privacidad, la carga emocional y las malas interpretaciones de los diálogos (Wang et al., 2022).

Otra experiencia ocurrió con empresas que utilizaron agentes inteligentes útiles para atender a clientes y usuarios, y proveerles de guías para resolver solicitudes diarias que usualmente son tediosas y aburridas. Por ejemplo, al entrenar un agente IA para gestionar solicitudes de vacaciones, se le da una cantidad de días requeridos y el agente IA completa la solicitud con datos personales y fechas sugeridas, luego la envía al superior para revisión y aprobación. Una situación similar ocurre ante los reportes de incidentes de un proveedor de servicios de tecnologías de la información y comunicaciones (TIC), con la usual queja "mi internet está muy lento". Tradicionalmente, estas llamadas las atiende un agente (humano) de un centro de atención al cliente, quien procede a realizar una serie de preguntas para lograr reestablecer la conexión de manera confiable. La experiencia acumulada por los agentes humanos permite definir con precisión los procedimientos para resolver este tipo de incidentes. Esto no solo facilita el entrenamiento especializado de nuevos agentes humanos, sino que también posibilita la capacitación de un agente de IA que pueda apoyar al equipo humano. Un agente de IA ayudaría al centro de soporte técnico atendiendo las llamadas sobre problemas de conexión a internet usando la misma guía de soluciones que los agentes humanos.

Siguiendo con el ejemplo del manejo de incidentes usando agentes de IA, algunas empresas ya están empezando a resolver cerca del 70 % de situaciones comunes y repetitivas de manera efectiva. Sin embargo, los clientes han podido adivinar que no es un humano aquel con quien interactúan y, entonces, tratan de entablar conversación

fuera del contexto técnico del incidente. Incluso, le preguntan al agente robótico con respecto a conocimiento sobre la cuenta del cliente y hasta le solicitan nuevos servicios, le piden descuentos o hasta tratan de negociar mejoras en el servicio sin incrementar el monto del pago de su suscripción. Esto pone en jaque al agente de IA, que está poco entrenado en el área de ventas. Cuando el agente de IA no puede resolver un problema técnico, propone al cliente ser transferido a ventas o programar una visita de un técnico. Si el cliente acepta, la IA genera una solicitud electrónica y la envía al equipo humano de técnicos para coordinar la visita.

Otro caso es el de agentes de IA entrenados específicamente en manejar un catálogo de ventas. Cuando un cliente llama, el agente de IA verifica su registro, ofrece promociones del catálogo, sugiere combos o kits según la conversación, calcula el precio con descuentos y, si el cliente acepta, realiza la factura de venta y la envía al cliente.

Ya existen versiones de agentes de IA bastante efectivos haciendo este tipo de labores predeterminadas y siguiendo pasos muy claros y repetitivos, a la vez que se van entrenando con cada llamada que atienden. Se espera que estos sistemas evolucionen gradualmente y añadan cada vez mayores capacidades de atención y resolución de problemas tanto técnicos como en la comunicación con los humanos, sin dejar de ofrecer una asistencia más efectiva y de mayor calidad y mejorar así la experiencia del usuario.

### *Plataformas colaborativas de inteligencia artificial*

El patrimonio cultural se preserva en archivos históricos y guarda la memoria colectiva. Con la digitalización, estos fragmentos se han trasladado a plataformas tecnológicas, especialmente en instituciones públicas que antes los exhibían manualmente en bibliotecas. Por ejemplo, los cuentos escritos son un ejemplo de excelentes medios para la difusión de la cultura. Sin embargo, el procesamiento de datos utilizando máquinas con inteligencia artificial está ampliando las posibilidades de enriquecer las colecciones al agregar archivos comunitarios informales. Un estudio de Almeida et al. (2024) muestra que la plataforma de IA promueve experiencias digitales enriquecedoras a través de visualizaciones interactivas y narrativas, en las que integran eventos culturales con datos patrimoniales a través de recursos multimedia aunado a testimonios compartidos de personas.

Es importante considerar que la IA también puede generar desinformación, pues se pueden crear falsificaciones que comprometan la confiabilidad de la información. Para contrarrestarlo, la IA se utiliza para verificar la autenticidad del contenido y detectar desinformación en redes sociales (Schmitt et al., 2024).

### *Experiencia del usuario de inteligencia artificial*

Se realizaron experimentos para diseñar una interfaz del usuario basada en IA que responda a preguntas que buscan información adicional con el objeto de mejorar la experiencia del usuario. En un estudio sobre preferencias de utilizar interfaces, se reclutaron 106 participantes de diferentes canales sociales (como Slack y LinkedIn), usando 50 individuos menores de 35 años y 56 mayores de dicha edad. Se realizó el estudio con el objeto de comparar una interfaz de usuario basada en IA frente a la interfaz de usuario común. Los participantes respondieron claramente su preferencia hacia la interfaz de usuario basada en IA, con una puntuación media de 5,1 frente a 3,8 para los que prefieren una interfaz de usuario común (Boni et al., 2023). Los asistentes de IA, cuando interactúan con miembros de un equipo de trabajo humano, son percibidos como más capaces e íntegros, pero muestran menor benevolencia hacia sus compañeros. Un hallazgo del mismo estudio fue que la presencia de un miembro IA dentro del equipo resultó en una menor satisfacción con el proceso, pero esto no generó diferencias en cuanto a la confiabilidad o la disposición a trabajar (Dennis et al., 2023).

Otro experimento se refiere a la percepción de los humanos al usar modelos mentales sobre la IA. Estos modelos se han evaluado durante la ejecución de juegos cooperativos de adivinanzas de palabras, en la que los participantes interactuaron con un agente de IA en línea y luego respondieron una encuesta. Después del juego, se realizó una encuesta sobre el modelo mental. Los resultados mostraron que los humanos que ganaron con mayor frecuencia tenían mejores estimaciones de las habilidades del agente de IA (Gero et al., 2020).

La interacción humana con agentes y asistentes de IA busca mejorar la comprensión de los modelos de aprendizaje automático y obtener resultados como la depuración de modelos y la optimización de la toma de decisiones. Las intuiciones humanas son esenciales para analizar y evaluar las explicaciones de las máquinas sobre la toma de decisiones. Por ello, se vienen creando nuevos paradigmas para explicar el comportamiento de las tareas de decisión entre humanos y la IA (Chen et al., 2023).

Para lograr transparencia en los agentes de IA, es crucial considerar la confianza, utilidad y comprensibilidad. Esta transparencia requiere evaluar varios factores relacionados, incluyendo los algoritmos. Se agrega que existen herramientas que sirven de guía para que los diseñadores puedan definir y operacionalizar los atributos de transparencia que van a necesitar los agentes de IA (Zhou & Kankanhalli, 2021).

La Unión Europea ha introducido requisitos de transparencia en su reglamento general de protección de datos. Sin embargo, un estudio de Wulf y Seizov (2020) indica que, después de dos años, la eficacia de estas normas sigue siendo dudosa. Además, la explicación del funcionamiento de los algoritmos de IA sigue siendo complicada (Wulf & Seizov, 2020).

## Diseño de agentes y asistentes de inteligencia artificial

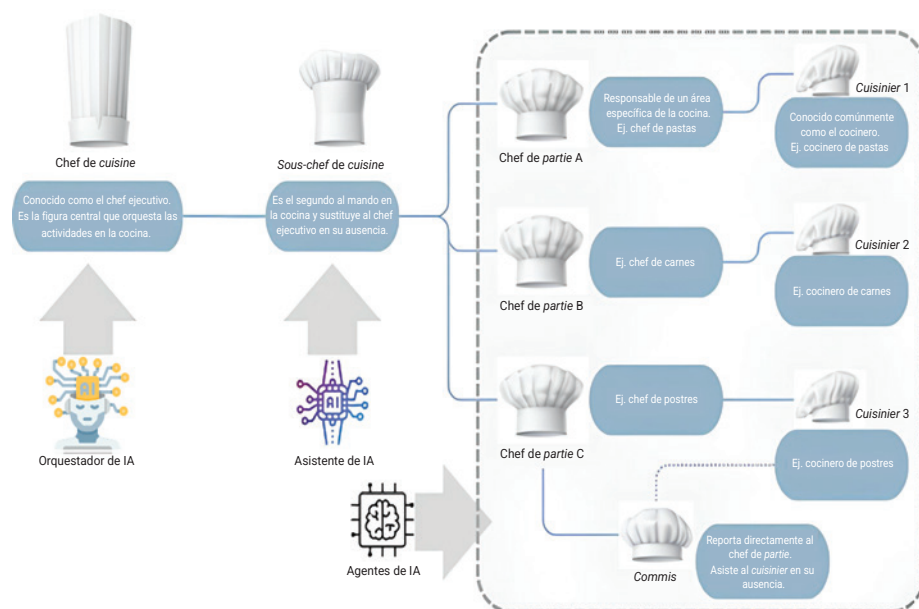
### Analogía del chef de cocina

Una forma de entender los agentes y asistentes de IA es mediante la analogía del chef y su equipo en una cocina tradicional o brigada de cocina. El chef de *cuisine* es el responsable de coordinar las actividades, mientras que el *sous-chef* asiste en la gestión. Los chefs de *partie* se especializan en los platillos (por ejemplo: pastas, carnes, postres), apoyados por cocineros (*cuisinier*) y sus asistentes (*commis*). El chef ejecutivo inicia la cadena preparando el menú del día y dando instrucciones claras al chef de *partie* sobre la presentación de los diferentes platillos. El chef de *cuisine* detalla el menú y delega tareas al asistente de IA y a los agentes de IA según su especialidad.

Mediante esta analogía, los niveles de comunicación implican el envío de mensajes, la recepción de respuestas, su análisis y el reenvío de correcciones. Se requieren varias iteraciones para obtener resultados precisos, especificar tareas y verificar los resultados repetidamente hasta lograr el producto deseado. Incluso, se puede visualizar a agentes de IA desempeñando otros roles, como recogiendo pedidos de los clientes, respondiendo preguntas sobre el menú y recomendando las especialidades del día. En la Figura 1, se muestra la organización y roles en una brigada de cocina, además de las funciones sugeridas para introducir roles de inteligencia artificial.

Figura 1

Roles de una brigada de cocina con IA



Nota. Datos resumidos con el apoyo de expertos.

Esta analogía del chef de cocina ilustra cómo un orquestador de IA sincroniza su trabajo comunicándose con múltiples asistentes y agentes de IA de manera coherente. De manera más específica, en la Tabla 1 se proporciona una descripción detallada de los roles asignados a cada uno de los miembros de la brigada de la cocina.

**Tabla 1**

*Roles de una brigada de cocina con equivalente de IA*

Rol	Descripción del puesto	Funciones principales	IA
<i>Chef de cuisine</i>	Conocido como chef ejecutivo, desempeña un papel central en la orquestación de las actividades dentro de la cocina. Su influencia trasciende la mera preparación de alimentos y se extiende a áreas clave como la gestión operativa y el liderazgo del equipo. El liderazgo ejercido por el chef ejecutivo impactó directamente tanto en la calidad de los platos servidos como en la cohesión y eficiencia de la brigada de cocina.	Seleccionar y formar el personal, supervisar el buen funcionamiento de la cocina, la presentación y calidad de los platos a servir, hacer los pedidos, controlar los costos, la higiene, elaborar el menú, organizar los turnos de trabajo. Asesorar a la gerencia con base en su conocimiento gastronómico. A través de su visión y capacidad de organización, logra establecer un entorno de trabajo armónico y altamente productivo, y se consolida como una figura indispensable en el ámbito culinario.	Orquestador de IA
<i>Sous-chef de cuisine</i>	Es el segundo al mando en la cocina. Sustituye al chef ejecutivo en su ausencia y se asegura de que el buen funcionamiento siga adelante.	Se encarga de asegurar que el resto de la brigada de cocina cumpla con las órdenes directas del chef de <i>cuisine</i> .	Asistente de IA
<i>Chef de partie</i>	Responsable de un área específica de la cocina.	Se encarga de gestionar todo lo relacionado con la elaboración del plato específico. Pueden laborar varios chefs especialistas en pastas, carnes, postres, por ejemplo.	Agente de IA
<i>Cuisinier</i>	Conocido comúnmente como el cocinero.	Es el encargado de vigilar, con el apoyo del chef de <i>partie</i> , las cocciones y salidas de los platos preparados.	Agente de IA
<i>Commis</i>	Es el asistente del chef de <i>partie</i> y a quien debe reportar directamente. En el caso de que este último no esté, asistirá al <i>cuisinier</i> .	Es la persona que desempeña labores concretas dentro de un área específica de la cocina, guiada por el chef de <i>partie</i> o, en su ausencia, por el <i>cuisinier</i> .	Agente de IA

Nota. Datos resumidos con el apoyo de expertos.

### Analogía con el modelo de madurez

El CMMI es un modelo para la mejora y evaluación de procesos para el desarrollo, mantenimiento y operación de sistemas de *software*. Es administrado por el Instituto CMMI y fue desarrollado en la Universidad Carnegie Mellon. La versión 3.0 del CMMI se publicó en el 2023. El modelo se ha utilizado para guiar la mejora de procesos en un proyecto, división o una organización completa y define los siguientes niveles de madurez: inicial, repetible, definido, gestionado y optimizado (Information Systems Audit and Control Association, s. f.).

En el contexto de esta investigación, se utilizó el modelo CMMI y se relacionó con la IA, lo que sirvió como base para establecer un criterio y definir una métrica que permitiera ubicar el nivel de madurez en IA dentro de una organización. El modelo CMMI fue utilizado como referencia para medir el nivel de implementación de agentes, asistentes y herramientas de IA dentro de una organización. El uso de los niveles de madurez permitió trazar una ruta para el desarrollo e implementación de la IA, lo que mostró el camino a seguir y las metas que se buscaban alcanzar. Esta relación se puede observar en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Niveles de madurez CMMI y su relación con la inteligencia artificial*

Niveles de madurez CMMI v3	Descripción	Relación con IA
Nivel de madurez 0: incompleto o inexistente	<i>Ad hoc</i> y desconocido.	No utilizan herramientas ni asistentes de IA.
Nivel de madurez 1: inicial. No confiable, ambiente impredecible y reactivo.	El trabajo se completa, pero, a menudo, se retrasa y supera el presupuesto. Las organizaciones no tienen actividades de control y no están diseñadas.	Muy pocas herramientas. Muy pocos asistentes o agentes de IA se encuentran implementados en la organización.
Nivel de madurez 2: informal. Procesos a nivel de proyecto, documentación definida.	Las actividades de control existen, pero no se ponen en práctica. Los controles dependen básicamente de las personas. No hay un entrenamiento formal ni comunicación de las actividades de control.	Algunos asistentes o agentes de IA se implementan, pero están aislados como soluciones del tipo individual en pocas áreas o silos de la organización.

(continúa)



(continuación)

Niveles de madurez CMMI v3	Descripción	Relación con IA
Nivel de madurez 3: estandarizado, definido. Es más proactivo en lugar de reactivo.	Estandarización de los procesos en la organización y consistencia en los procesos. Las actividades de control que existen y están diseñadas han sido documentadas y comunicadas a los empleados. Las desviaciones de las actividades de control probablemente no se detecten. Los estándares de toda la organización proporcionan orientación para proyectos, programas y carteras.	Usos evidentes de asistentes y agentes de IA en varias áreas de la organización. Inicio de agentes y asistentes comunicándose entre sí. La organización posee agentes de IA entrenándose en procesos internos, por ejemplo, ventas, soporte al cliente, etcétera.
Nivel de madurez 4: monitoreado y gestionado cuantitativamente.	Se utilizan herramientas en una forma limitada para soportar las actividades de control. La organización está basada en datos con objetivos cuantitativos de mejora del rendimiento. Los procesos son predecibles y alineados para satisfacer las necesidades de las partes interesadas.	Automatización de sistemas incorporando agentes y asistentes de IA en muchas áreas de la organización. Uso de IA más extenso a nivel interno como externo interactuando con clientes y proveedores. Algunos pocos orquestadores de IA.
Nivel de madurez 5: optimización.	La organización está centrada en la mejora continua y está construida para pivotar y responder a las oportunidades y al cambio. Esta estabilidad proporciona una plataforma para la agilidad y la innovación.	Uso extensivo y mejorado de IA (con iteraciones). Mejora continua en los sistemas, usando agentes y asistentes de IA. Interacción con uno o varios orquestadores de IA.

Nota. Datos resumidos con el apoyo de expertos.

### *Analogía de la cadena de suministro*

La cadena de suministro también es conocida como cadena de abasto. Se entiende como la secuencia de eventos que cubren el ciclo de vida entero de un producto o servicio, es decir, desde que es concebido hasta que es consumido. Existen tres tipos de empresas: industriales, comercializadoras y de servicios. Todas ellas utilizan el modelo en estilos diferentes, por ejemplo, las empresas de servicios poseen una cadena de suministro más corta que las empresas industriales.

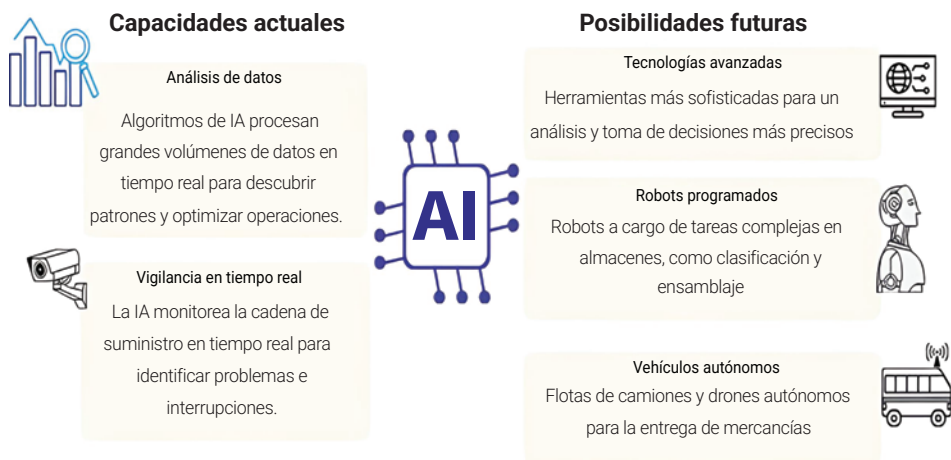
Las inversiones en inteligencia artificial dentro del sector logístico están ganando cada vez más relevancia en la industria. Los beneficios que la IA aporta a la cadena de suministro se hacen evidentes frente a la reducción de costos, mitigación de riesgos, mayor eficiencia operativa, mejores previsiones, entregas más rápidas gracias a la optimización de rutas y una personalización más efectiva para el cliente final (Azmi & Lamkuche, 2022).

En la cadena de suministro, las metodologías de inteligencia artificial y *big data analytics* están siendo aplicadas en diversas áreas de la organización, como mercadeo, finanzas, manufactura, gestión de almacenes, logística y transporte, así como en la relación con clientes y proveedores. Estas iniciativas contribuyen directamente al crecimiento de la empresa y a la expansión de sus actividades dentro de la cadena de suministro, lo que se refleja en un aumento de las ventas y de la base de clientes, pues optimiza la eficiencia logística en la oferta de productos y servicio (Azmi & Lamkuche, 2022).

En la Figura 2, se ilustra la cadena de suministro con el equilibrio entre las capacidades actuales (análisis de datos y vigilancia) y las posibilidades futuras (tecnologías avanzadas, robots y vehículos). La imagen sugiere que los avances en IA y automatización, como la robótica y los vehículos automatizados, deben equilibrarse con las técnicas actuales basadas en aplicaciones y datos para obtener una visión holística del progreso tecnológico a ser implementado en una organización que desee introducir o mejorar el uso de agentes y asistentes de IA dentro de su proceso de logística.

Figura 2

La IA en la cadena de suministro (supply chain)



Nota. Los datos proceden de "Use of big data and AI in supply chain management", de A. Azmi y H. Lamkuche, 2022, *AIP Conference Proceedings*, p. 8 (<https://doi.org/10.1063/5.0110780>).

Por otro lado, tenemos las consideraciones éticas sobre la seguridad, la transparencia, las violaciones a la propiedad intelectual y la privacidad en la implementación de la IA en la cadena de suministro. Se incluye la protección de datos confidenciales, así como la garantía de transparencia en las decisiones basadas en algoritmos y riesgos

relacionados con violaciones a la propiedad intelectual. Es fundamental capacitar a los empleados en el manejo responsable de los datos, priorizando en todo momento la protección de la información confidencial de la empresa (Khlie et al., 2024).

### *Sobre la educación asistida con inteligencia artificial*

En el campo de la educación, hay varios estudios recientes sobre el uso de herramientas y aplicaciones de IA en diferentes campos. En este artículo, se han mencionado métodos y tecnologías aplicadas en grupos de participantes en la academia, en los que se hace cada vez más frecuente explorar el uso de asistentes y agentes de IA.

Un ejemplo de lo anterior es que la introducción de asistentes de IA en la docencia ha permitido optimizar significativamente las tareas administrativas, generar casos y ejemplos para las clases, y explorar temas de investigación complejos, los cuales se pueden presentar como retos para su aplicación en el aula. Por parte de los alumnos, es posible crear sus propios asistentes para que les ayuden a repasar la materia, generar múltiples ejemplos del contenido visto, ejercicios de matemáticas e, incluso, preguntas aleatorias sobre un tema de examen previamente proporcionado al asistente de IA.

También, a nivel institucional, se introdujo el *deep learning* o aprendizaje profundo para mejorar los contenidos curriculares, con lo que se han incorporado más y mejores elementos investigativos. En el área financiera, ha permitido el seguimiento a los pagos recibidos y a las transacciones realizadas. Asimismo, en la gestión del registro estudiantil, facilitó el manejo de estadísticas en tiempo real sobre la matrícula, la elaboración de proyecciones y la provisión de información precisa y veraz para la toma de decisiones académicas.

## CONCLUSIONES

La analogía del chef de cocina, resumida en la Tabla 1 y en la Figura 1, es un buen ejemplo para analizar e incorporar en empresas y organizaciones. La simple asignación de tareas usualmente realizada por humanos se puede ir sustituyendo poco a poco por agentes o asistentes de IA. Esta analogía puede aplicarse para un proceso en particular y puntual donde existan actividades rutinarias que impliquen procesamiento de información, con posibilidades de cometer errores humanos como consecuencia del cansancio, enfermedad o cualquier otra razón. En tal sentido, la incorporación de IA se puede realizar de manera paulatina entrenando al agente junto al humano mediante la provisión de casos basados en experiencias reales de un único proceso o actividad, lo que permite mejorar su efectividad y precisión. Entonces, el humano valida y afina el instrumento, así como los comandos utilizados, hasta obtener resultados válidos y confiables.

La reproducción del rol del chef de cocina permite identificar, analizar y monitorear inexactitudes en los productos finales obtenidos, así como medir el riesgo de fallas. Posteriormente, se pueden incrementar las tareas asignadas al mismo agente o construir nuevos agentes para delegarles funciones específicas, lo que permite automatizar gradualmente grandes procesos como eslabones dentro de la cadena operativa de una organización.

El uso de la analogía de la cadena de suministro con IA, presentada en la Figura 2, permite analizar nuevas oportunidades para las organizaciones, donde los agentes y asistentes de IA pueden influir en el cambio, el desarrollo y el progreso, gracias a la capacidad de las computadoras para manejar grandes volúmenes de datos, identificar patrones y generar nuevos resultados, entre otras mejoras.

Asimismo, una IA entrenada dentro del modelo de la logística puede ayudarnos a optimizar el transporte y distribución de productos, afinar los procesos y mejorar los servicios al identificar los canales más adecuados y eficientes. Esto contribuye, adicionalmente, en disminuir el consumo de combustible y hasta las emisiones de carbono colaborando con la sociedad.

Usando el modelo de madurez CMMI como herramienta para medir el nivel de automatización actual en IA (véase la Tabla 2) nos da la posibilidad de plantear una estrategia gerencial con la meta de equilibrar las capacidades actuales de una organización (análisis de datos y vigilancia) con respecto a las posibilidades futuras (tecnologías avanzadas, robots y vehículos). De igual manera, al establecer una hoja de ruta estratégica, se puede integrar de manera progresiva diversos elementos de IA, comenzando desde una capacidad inexistente de automatización hasta alcanzar un nivel de optimización mediante el uso de la IA.

A manera de resumen, en la Tabla 3 se muestran los hallazgos recolectados, ordenados en temas, experiencias, investigaciones y reuniones con expertos realizadas.

**Tabla 3**

*Resumen de hallazgos sobre usos de la inteligencia artificial*

Herramientas y aplicaciones	Métodos y tecnologías	Asistentes y agentes	Experiencia del usuario
<p>Recursos humanos aplicando IA:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Caso CYOF. Incluye herramientas para mejorar la empleabilidad y ayudar a los trabajadores a encontrar y mantener nuevas oportunidades laborales.</li> </ul>	<p>Aprendizaje electrónico:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Un problema común es la falta de interacción social y motivación.</li> <li>• La ausencia de experiencias comparadas entre estudiantes puede llevar al aburrimiento, desánimo, menor rendimiento y retroceso en los estudios.</li> </ul>	<p>Agentes y asistentes de IA:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Para analizar datos muchas empresas emergentes enfrentan un rápido crecimiento en el registro de nuevos usuarios en línea.</li> <li>• La revisión manual de estos registros es ineficiente y propensa a errores.</li> <li>• Se sugiere utilizar un asistente de IA que automatice la validación de la información.</li> </ul>	<p>Diseño de interfaces de usuario con IA:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se crean interfaces que mejoran la experiencia del usuario con información adicional y formatos de lista.</li> <li>• Asistentes de IA en equipos de trabajo son vistos como más capaces y con mayor integridad, pero menos benevolentes.</li> </ul>
<p>En la academia:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Preocupación sobre si la IA reemplazara a los docentes, pero los docentes humanos poseen cualidades únicas como el pensamiento crítico, la creatividad y las emociones, que son irremplazables.</li> <li>• Los docentes deben integrar la IA para mejorar la enseñanza.</li> <li>• La aplicación QuillBot AI es recomendada para estudiantes de undécimo grado para mejorar habilidades de escritura.</li> </ul>	<p>Apoyo laboral y académico:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Existen programas informáticos impulsados por IA que ayudan en la redacción y elaboración usando lenguaje natural.</li> <li>• Nuevas propuestas y paradigmas sobre el comportamiento de las diferentes tareas de toma de decisiones entre los humanos y la IA.</li> </ul>	<p>Tecnología <i>deep learning</i>:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mejores algoritmos.</li> <li>• Los asistentes de IA pueden aprender a partir de grandes cantidades de datos y realizar tareas específicas con mayor precisión.</li> <li>• Al diseñar agentes de IA, es crucial considerar tanto sus funcionalidades como características sociales.</li> <li>• Los asistentes y agentes ofrecen apoyo social y mejoran la conectividad en interacciones remotas.</li> <li>• Empáticos y similares a los humanos.</li> </ul>	<p>Modelos mentales sobre la IA:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Se estudian las percepciones de las habilidades de un agente de IA en un juego cooperativo.</li> <li>• Aquellos que ganan más frecuentemente tienen una mejor estimación de las habilidades del agente de IA.</li> <li>• Las intuiciones humanas son importantes para producir y estudiar las justificaciones de las máquinas en la toma de decisiones entre humanos y la inteligencia artificial.</li> </ul>

(continúa)

(continuación)

Herramientas y aplicaciones	Métodos y tecnologías	Asistentes y agentes	Experiencia del usuario
Desarrollo de aplicaciones: • Caso Pogamut 3 es una plataforma de código abierto para el desarrollo rápido de agentes virtuales en el entorno 3D. • Programas diseñados para apoyar tanto la investigación como la educación y el desarrollo de proyectos como los videojuegos.	La IA versus el humano: • La IA no reemplaza la creatividad ni el intelecto humano. • La IA actúa como una herramienta que mejora y agiliza el proceso de redacción, apoyando a los estudiantes en tareas como la generación de ideas, corrección y edición.	Interacción con IA: • Preocupación por las opiniones o preferencias de los agentes de IA. • Preocupación sobre la privacidad, la carga emocional y la mala interpretación al interactuar. • Se espera que los agentes de IA sigan la etiqueta social y comprendan el contexto de la interacción.	Transparencia de los agentes de IA: • Claves la confianza, utilidad y comprensibilidad. • Guiar diseñadores en operacionalizar la transparencia. • La UE introduce requisitos sobre la transparencia en IA. • Aunque se han implementado, su eficacia sigue cuestionada.
		Plataformas de IA: • Colecciones digitales institucionales y archivos comunitarios informales con visualizaciones interactivas y narrativas en torno a eventos culturales y datos patrimoniales.	Riesgos de colaboración con la IA: • Aumenta el riesgo potencial de desinformación, falsificaciones y propagación de discursos. • Se compromete en gran medida la fiabilidad de los ecosistemas de información.

Finalmente, los autores recomiendan utilizar las figuras y tablas como referencia para apoyar la elaboración de programas de estudio que incorporen temas relacionados con la IA en la academia. Del mismo modo, estos pueden servir de guía base para la incorporación de agentes y asistentes de IA en instituciones gubernamentales y empresas, manteniendo siempre una visión ética y responsable, fundamental para una adopción segura de estas tecnologías.

## REFERENCIAS

- Almeida, P., Teixeira, A., Velhinho, A., Raposo, R., Silva, T., & Pedro, L. (2024). Remixing and repurposing cultural heritage archives through a collaborative and AI-generated storytelling digital platform. En *IMXw '24: Proceedings of the 2024 ACM International Conference on Interactive Media Experiences Workshops* (pp. 100-104). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3672406.3672419>
- Amyatun, R. L., & Kholis, A. (2023). Can artificial intelligence (AI) like QuillBot AI assist students' writing skills? Assisting learning to write texts using AI. *English*

- Language Education Reviews*, 3(2), 135-154. <https://doi.org/10.22515/elereviews.v3i2.7533>
- Azmi, A., & Lamkuche, H. (2022). Use of big data and AI in supply chain management. *AIP Conference Proceedings*, 2519(1). <https://doi.org/10.1063/5.0110780>
- Boni, O., Rosenthal, S., Peled Nakash, O., & Shmueli-Scheuer, M. (2023). Tell me more? Can AI enhance user experience for list answers? En *IUI '23 Companion: Companion Proceedings of the 28th International Conference on Intelligent User Interfaces* (pp. 134-137). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3581754.3584152>
- Casas Tolentino, N. J. (2023). *La inteligencia artificial (IA) como herramienta para los docentes de educación superior*. Academia. [https://www.academia.edu/99522864/La\\_inteligencia\\_artificial\\_IA\\_como\\_herramienta\\_para\\_los\\_docentes\\_de\\_educaci%C3%B3n\\_superior](https://www.academia.edu/99522864/La_inteligencia_artificial_IA_como_herramienta_para_los_docentes_de_educaci%C3%B3n_superior)
- Chan, C. K. Y., & Tsi, L. H. (2023). *The AI revolution in education: will AI replace or assist teachers in higher education?* arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.01185>
- Chen, C., Feng, S., Sharma, A., & Tan, C. (2023). Machine explanations and human understanding. En *FACCT '23: Proceedings of the 2023 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency* (p. 1). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3593013.3593970>
- Coloma Garofalo, J. A., Vargas Salazar, J. A., Sanaguano Guevara, C. A., & Rochina Chisag, Á. G. (2021). Inteligencia artificial, sistemas inteligentes, agentes inteligentes. *Recimundo. Revista Científica Mundo de la Investigación y el Conocimiento*, 4(2). [https://doi.org/10.26820/recimundo/4.\(2\).mayo.2020.16-30](https://doi.org/10.26820/recimundo/4.(2).mayo.2020.16-30)
- Cotrina-Aliaga, J. C., Vera-Flores, M. Á., Ortiz-Cotrina, W. C., & Sosa-Celi, P. (2021). Uso de la Inteligencia Artificial (IA) como estrategia en la educación superior. *Fd-Rie. Revista Iberoamericana de la Educación*, (1). <https://doi.org/10.31876/ie.vi.81>
- Dennis, A. R., Lakhiwal, A., & Sachdeva, A. (2023). AI agents as team members: Effects on satisfaction, conflict, trustworthiness, and willingness to work with. *Journal of Management Information Systems*, 40(2), 307-337. <https://doi.org/10.1080/07421222.2023.2196773>
- Ferreira Beni, P., Barone, D. A., & De Ortúzar, M. G. (2023). *Cuestiones éticas sobre la Inteligencia Artificial en la educación*. Memoria Académica. Repositorio Institucional FaHCE-UNLP. [https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/trab\\_eventos/ev.17321/ev.17321.pdf](https://www.memoria.fahce.unlp.edu.ar/trab_eventos/ev.17321/ev.17321.pdf)

- Gemrot, J., Kadlec, R., Bída, M., Burkert, O., Píbil, R., Havlípek, J., Zempák, L., Šimlovič, J., Vansa, R., Štolba, M., Plch, T., & Brom, C. (2009). Pogamut 3 can assist developers in building AI for their videogame agents. En F. Dignum, J. Bradshaw, B. Silverman & W. Doesburg, *Agents for games and simulations* (pp. 1-15). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-11198-3\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-642-11198-3_1)
- Gero, K. I., Ashktorab, Z., Dugan, C., Pan, Q., Johnson, J., Geyer, W., Ruiz, M., Miller, S., Millen, D. R., Campbell, M., Kumaravel, S., & Zhang, W. (2020). Mental models of AI agents in a cooperative game setting. En *CHI '20: Proceedings of the 2020 Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1-12). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3313831.3376316>
- Grosso, C., Sazen, N., & Boselli, R. (2022). AI-implemented toolkit to assist users with career "configuration": The case of Create Your Own Future. En *SPLC '22: Proceedings of the 26th ACM International Systems and Software Product Line Conference, Volume B* (pp. 158-165). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3503229.3547043>
- Information Systems Audit and Control Association. (s. f.). *CMMI*. <https://cmmiinstitute.com/cmmi>
- Khlie, K., Benmamoun, Z., Jebbor, I., & Serrou, D. (2024). Generative AI for enhanced operations and supply chain management. *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, 8(10), 6637. <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i10.6637>
- León Rodríguez, G. de la C., & Viña Brito, S. M. (2017). La inteligencia artificial en la educación superior. Oportunidades y amenazas. *Innova Research Journal*, 2(8.1), 412-422. <https://doi.org/10.33890/innova.v2.n8.1.2017.399>
- Que, X., & Pan, Y. (2022). A context-aware intelligent system to assist user profile filtering using AI and deep learning. En D. C. Wyld & D. Nagamalai (Eds.), *8th International Conference on Natural Language Processing (NATP 2022)* (pp. 65-75). <https://doi.org/10.5121/csit.2022.120105>
- Schmitt, V., Villa-Arenas, L. F., Feldhus, N., Meyer, J., Spang, R. P., & Möller, S. (2024). The role of explainability in collaborative human-AI disinformation detection. En *FACCT '24: Proceedings of the 2024 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency* (pp. 2157-2174). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3630106.3659031>
- Silva, P. H. D. D., Sudasinghe, S. A. V. D., Hansika, P. D. U., Gamage, M. P., & Gamage, M. P. A. W. (2021). AI base e-learning solution to motivate and assist primary school students. En *2021 3rd International Conference on Advancements in Computing. Conference Proceedings* (pp. 294-299). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICAC54203.2021.9671209>



- Ubal Camacho, M., Tambasco, P., Martínez, S., & García Correa, M. (2023). El impacto de la inteligencia artificial en la educación. Riesgos y potencialidades de la IA en el aula. *RiiTE. Revista Interuniversitaria de Investigación en Tecnología Educativa*, (15), 41-57. <https://doi.org/10.6018/riite.584501>
- Wang, Q., Jing, S., & Goel, A. K. (2022). Co-designing AI agents to support social connectedness among online learners: Functionalities, social characteristics, and ethical challenges. En F. Mueller, S. Greuter, R. A. Khot, P. Sweetser & M. Obrist, *DIS '2022: Proceedings of the 2022 ACM Designing Interactive Systems Conference* (pp. 541-556). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3532106.3533534>
- Wood, S. (2023). *How AI essay writer can assist students in writing essays? Guide-2023*. Academia. [https://www.academia.edu/106778059/How\\_AI\\_Essay\\_Writer\\_Can\\_Assist\\_Students\\_In\\_Writing\\_Essays\\_Guide\\_2023](https://www.academia.edu/106778059/How_AI_Essay_Writer_Can_Assist_Students_In_Writing_Essays_Guide_2023)
- Wulf, A. J., & Seizov, O. (2020). Artificial intelligence and transparency: A blueprint for improving the regulation of AI applications in the EU. *European Business Law Review*, 31(4), 611-640. <https://doi.org/10.54648/eulr2020024>
- Zhou, Y., & Kankanhalli, A. (2021). AI regulation for smart cities: Challenges and principles. En E. Estevez, T. Pardo & J. Scholl (Eds.), *Smart cities and smart governance*. Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61033-3\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61033-3_5)



# CLASIFICACIÓN AUTOMATIZADA DE SUPERFICIES CITRÍCOLAS MEDIANTE SVM Y PATRONES TEMPORALES DE NDVI: APLICACIONES PARA AGRICULTURA DE PRECISIÓN Y GESTIÓN LOGÍSTICA

FABIOLA SÁNCHEZ-GALVÁN

<https://orcid.org/0000-0002-6534-3210>

[fabiola.sanchez@itsta.edu.mx](mailto:fabiola.sanchez@itsta.edu.mx)

Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico  
Superior de Tantoyuca

ROGELIO GARCÍA-RODRÍGUEZ

<https://orcid.org/0000-0003-1526-4087>

[rogelio.garcia@itsta.edu.mx](mailto:rogelio.garcia@itsta.edu.mx)

Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico  
Superior de Tantoyuca

PAULINO SALAS MARTÍNEZ

<https://orcid.org/0009-0004-8118-3052>

[m223s0011@itsta.edu.mx](mailto:m223s0011@itsta.edu.mx)

Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico  
Superior de Tantoyuca

MARÍA XÓCHITL ALTAMIRANO HERRERA

<https://orcid.org/0009-0005-0742-2825>

[xochitl.altamirano@itsta.edu.mx](mailto:xochitl.altamirano@itsta.edu.mx)

Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico  
Superior de Tantoyuca

HORACIO BAUTISTA-SANTOS

<https://orcid.org/0000-0002-3925-2438>

[horacio.bautista@itsta.edu.mx](mailto:horacio.bautista@itsta.edu.mx)

Tecnológico Nacional de México, campus Instituto Tecnológico  
Superior de Tantoyuca

Recibido: 10 de abril del 2025 / Aprobado: 15 de mayo del 2025

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.7858>

**RESUMEN.** Este estudio desarrolló un modelo basado en máquinas de vectores de soporte (*support vector machines*, SVM) y series temporales del índice de vegetación de diferencia normalizada (*normalized difference vegetation index*, NDVI) para

clasificar superficies cítricas en Álamo, Veracruz, México. Se utilizaron imágenes MODIS (MOD13Q1, 250 m de resolución) de 2003 a 2022, procesadas mediante corrección radiométrica, filtrado de ruido y armonización temporal. Las zonas de entrenamiento se clasificaron en cuatro categorías (cítricos, vegetación natural, pastizales y áreas urbanas) y se utilizaron 3759 series temporales (50 % positivas para cítricos). El modelo SVM (*kernel* RBF:  $\gamma = 0,1$ ,  $C = 10$ ) alcanzó una precisión del 91,4 % mediante validación cruzada (cinco pliegues), con un 88 % de acierto en cítricos y 93,9 % en no cítricos. Los resultados mostraron un NDVI promedio de 0,74 para cítricos, diferenciable de la maleza (0,87), aunque con desafíos en parcelas pequeñas debido a la resolución espacial. Las estimaciones coincidieron con datos oficiales (SIACON) en 2021 (diferencia de 548 ha), aunque presentaron discrepancias en años con sequías (2007 y 2015) o cambios de manejo (2019 y 2020). Se identificó que factores climáticos y antropogénicos afectan la dinámica del NDVI, lo que evidencia la utilidad del modelo para monitoreo agrícola. Las limitaciones incluyen mezcla de píxeles en áreas heterogéneas. Este trabajo demuestra que el enfoque SVM-NDVI es robusto para la clasificación de superficies cítricas a escala regional con aplicaciones potenciales en gestión logística, como la optimización de rutas de transporte y la planificación de cosechas mediante patrones espaciotemporales de NDVI. Estos hallazgos abren oportunidades para integrar tele-detección y aprendizaje automático en cadenas de suministro agrícola sostenibles.

PALABRAS CLAVE: cadenas de suministro agrícolas sostenibles / agricultura de precisión / agrologística

## AUTOMATED CLASSIFICATION OF CITRUS AREAS USING SVM AND NDVI TEMPORAL PATTERNS: APPLICATIONS FOR PRECISION AGRICULTURE AND LOGISTICS MANAGEMENT

ABSTRACT. This study developed a model based on Support Vector Machines (SVM) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) time series to classify citrus areas in Álamo, Veracruz, Mexico. MODIS images (MOD13Q1, 250 m resolution) from 2003 to 2022 were used, processed using radiometric correction, noise filtering, and temporal harmonization. Training areas were classified into four categories: citrus, natural vegetation, grasslands, and urban areas, using 3,759 time series, 50 % of which were positive for citrus. The SVM model (RBF kernel:  $\gamma = 0.1$ ,  $C = 10$ ) achieved an accuracy of 91.4 % using 5-fold cross-validation, with 88% success in citrus and 93.9 % in non-citrus samples. The results showed an average NDVI of 0.74 for citrus, distinguishable from weeds (0.87), although with challenges in small plots due to spatial resolution. The estimates coincided with official data (SIACON) in 2021 (548 ha difference), although they presented discrepancies in years with droughts (2007, 2015) or management changes (2019-2020). Climatic and anthropogenic factors were identified as affecting NDVI dynamics, demonstrating the model's usefulness for agricultural monitoring.

Limitations include pixel mixing in heterogeneous areas. This work demonstrates that the SVM-NDVI approach is robust for classifying citrus areas at a regional scale, with potential applications in logistics management, such as transport route optimization and crop planning using spatiotemporal NDVI patterns. These findings open up opportunities to integrate remote sensing and machine learning into sustainable agricultural supply chains.

KEYWORDS: sustainable agricultural supply chains / precision agriculture / agrologistics

## INTRODUCCIÓN

Los cítricos representan uno de los cultivos frutícolas más importantes a nivel mundial, tanto por su valor económico como nutricional. México ocupa el quinto lugar como productor global, destacando en variedades como naranja (4 600 000 toneladas), limón (2 900 000 toneladas) y toronja (490 000 toneladas) (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria, 2022). A nivel nacional, el estado de Veracruz concentra el 75 % de la superficie cosechada de naranja con un valor de producción que supera los MXN 2 300 000 en el municipio de Álamo Temapache (Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023). Este cultivo no solo sustenta la economía local, sino que también enfrenta desafíos críticos, como la variabilidad climática y plagas, las cuales requieren métodos precisos de monitoreo para optimizar su manejo.

Tradicionalmente, la estimación de superficies agrícolas ha dependido de censos presenciales, métodos costosos y de baja frecuencia. Sin embargo, la teledetección satelital, combinada con técnicas de aprendizaje automático, emerge como una alternativa eficiente. Estudios recientes han demostrado el potencial del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para mapear coberturas vegetales (Kadhim et al., 2022, Khare et al., 2019), predecir sequías (Aguilar Lome, 2021; Choubin et al., 2019) e, incluso, caracterizar ciclos fenológicos (Testa et al., 2018). No obstante, su aplicación específica en cultivos cítricos enfrenta limitaciones, como la resolución espacial moderada<sup>1</sup> y la confusión espectral con malezas o vegetación natural (Girimonte & García, 2020), lo que reduce la precisión en estimaciones de superficie.

La teledetección ha revolucionado el monitoreo agrícola a través del NDVI, lo que ha demostrado su eficacia en aplicaciones como la evaluación de cobertura vegetal: las series temporales de NDVI han permitido mapear con precisión cambios en humedales (Mu et al., 2020) y bosques (Novo-Fernández et al., 2018). Este índice también facilita el análisis espaciotemporal para identificar patrones de crecimiento vegetal (Measho et al., 2019) y caracterizar fenologías de cultivos (Testa et al., 2018), donde sensores como MODIS han mostrado especial eficacia para seguimientos multianuales (Nolasco et al., 2023; Zúñiga-Vásquez et al., 2020).

En el ámbito de la agricultura de precisión, la teledetección combina NDVI y el aprendizaje automático para predecir sequías (Choubin et al., 2019) e identificar cultivos deteriorados (Girimonte et al., 2020). La integración con índices, como el índice de vegetación mejorado (*enhanced vegetation index*, EVI), mejora el análisis climático (Figueira Branco et al., 2019). Los sistemas de visión artificial aumentan la exactitud en estimaciones de rendimiento (Bautista et al., 2018).

---

<sup>1</sup> 250 m en espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (*moderate resolution imaging spectroradiometer*, Modis)

En este artículo se propone un modelo basado en máquinas de vectores de soporte (SVM) y series temporales de NDVI (2003-2022) para estimar hectáreas citrícolas en el municipio de Álamo Temapache, en el que se abordan tres etapas clave: clasificación precisa (diferenciación de cultivos citrícolas frente a otras coberturas vegetales mediante patrones temporales de NDVI), validación robusta (uso de datos oficiales<sup>2</sup> para cuantificar la precisión del modelo en un periodo de veinte años) y análisis de anomalías (identificación de factores externos, como las sequías y la pandemia de COVID-19, que han impactado la dinámica del NDVI). Aunque el SVM utilizado pertenece al módulo de *machine learning* de MATLAB y comparte principios de optimización con algunas arquitecturas de redes neuronales, su enfoque se centra en la maximización del margen entre clases mediante hiperplanos, lo que lo distingue de modelos basados en capas neuronales.

Este enfoque integral representa un avance significativo en la agricultura de precisión para cultivos perennes. También plantea que la clasificación automatizada de superficies citrícolas mediante SVM y patrones temporales de NDVI no solo optimiza el monitoreo agrícola, sino que también puede revolucionar la gestión logística en la cadena de suministro. Al identificar con precisión las áreas de cultivo y sus ciclos fenológicos, el modelo permite predecir volúmenes de cosecha, optimizar rutas de transporte y planificar almacenamiento, lo que reduce costos y mejora la eficiencia operativa. Esta integración de teledetección y aprendizaje automático ofrece un marco innovador para una logística agrícola sostenible y basada en datos (Bautista-Santos et. al., 2015; Fernández-Echeverría et. al., 2024).

## MÉTODOS, TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

### Caso de estudio

Álamo Temapache se ubica entre los paralelos desde 22° 28' 18" N hasta 17° 08' 13" N y desde 93° 36' 29" hasta 98° 40' 54" O, lo que abarca una región con una altitud que varía entre 10 y 500 metros sobre el nivel del mar. Al norte limita con Tepetzintla, Cerro Azul y Tamiahua; al este, con Tamiahua, Tuxpan y Tihuatlán; al sur, con Tihuatlán, Castillo de Teayo, el estado de Puebla e Ixhuatlán de Madero; y, al oeste, con Ixhuatlán de Madero, Chicontepec y Tepetzintla. En cuanto al clima, presenta una temperatura que oscila entre los 22 °C y 26 °C, con una precipitación anual de 1400 a 1600 mm, por lo que se caracteriza por un clima cálido subhúmedo con un 91,72 % de lluvias durante el verano y un 8,28 % de clima cálido húmedo. Estas condiciones favorecen el desarrollo de actividades agrícolas y el cultivo de diversas especies (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2010).

---

2 Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON).

Los suelos predominantes del municipio de Álamo-Temapache son vertisoles (60 % del área), es decir, aptos para cultivos perennes por su alta retención hídrica; luvisoles (25 %), presentes en zonas de lomeríos; y arenosoles (15 %) en áreas costeras. La cobertura vegetal no cultivada incluye: selva mediana subperennifolia (28 % del territorio), pastizales naturales (12 %) y zonas urbanas y cuerpos de agua (8 %). Esta área fue elegida por su homogeneidad citrícola (92% de la superficie agrícola dedicada a naranja), por la disponibilidad de datos (acceso a registros históricos del SIACON 2003-2022) y la variabilidad ambiental (gradiente altitudinal que permite evaluar el efecto microclimático en NDVI y su representatividad, pues es el principal productor de cítricos en Veracruz, con un 75 % de la superficie estatal).

El municipio de Álamo cuenta con un total aproximado de 128 172 ha que, para el año 2022, 47 648 ha sirvieron para cultivos cítricos —como el limón en 51 ha, la mandarina en 3055 ha, la naranja en 43 892 ha y la toronja en 650 ha—, mientras que el resto perteneció a cuerpos de agua, selva, ciudad entre otros (Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023). Ese mismo año, el municipio de Álamo Temapache generó un valor de producción de MXN 2 300 765, según el Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta<sup>3</sup>. Además, se registró un total de 47 648 ha sembradas (Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2023).

La delimitación espacial consideró unidades homogéneas (segmentación por tipo de cultivo y cobertura vegetal), accesibilidad (disponibilidad de imágenes MODIS completas del 2003 hasta el 2023), validación *in situ* (42 puntos de verificación distribuidos estratificadamente). Esta caracterización detallada proporciona el marco espacial y agroecológico necesario para el análisis de series temporales de NDVI, lo que garantiza la representatividad de los resultados.

## Metodología

La Figura 1 ilustra el flujo metodológico implementado para clasificar superficies cítricas mediante el análisis de series temporales de NDVI y el algoritmo de SVM. El proceso integra cuatro etapas principales: preprocesamiento de imágenes MODIS, generación de series temporales de NDVI, entrenamiento del modelo SVM y validación de resultados con datos oficiales. El algoritmo SVM fue seleccionado por su eficacia en problemas no lineales (mediante *kernel* RBF) y su capacidad para discriminar patrones temporales similares (NDVI cítricos = 0,74 vs 0,87 en maleza), lo que supera limitaciones de métodos basados en umbrales fijos.

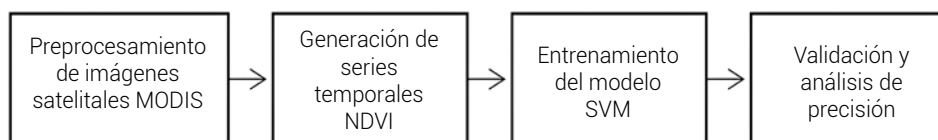
---

3 Herramienta electrónica del Gobierno de México que ofrece acceso a estadísticas anuales actualizadas de los subsectores agrícola, pecuario y pesquero, a través de un sistema de consulta dinámica.



**Figura 1**

*Metodología para la clasificación de superficie cítrica*



*Nota.* Esta metodología se realizó mediante el análisis de series temporales NDVI y el SVM.

### *Preprocesamiento de imágenes satelitales MODIS*

El preprocesamiento combinó tres etapas. Primero, la selección estratificada de áreas de entrenamiento mediante polígonos KML en Google Earth Pro, que abarcó las cuatro clases de interés (cítricos, vegetación natural, pastizales y zonas urbanas) con distribución 70/30 para entrenamiento/validación. Segundo, el procesamiento de 460 imágenes MOD13Q1.061 (2003-2022, 250 m) a través de la aplicación de corrección radiométrica mediante el campo QA (eliminando píxeles con nubes, aerosoles o baja calidad) y el filtrado de mediana  $3 \times 3$ . Tercero, la armonización temporal mediante interpolación con promedios interanuales por día juliano y suavizado con ventana móvil de 48 días. Este flujo generó series NDVI completas y consistentes para el análisis temporal preservando los patrones fenológicos característicos de cada clase de cobertura.

### *Generación de series temporales NDVI*

El proceso de generación de series temporales se estructuró en tres etapas fundamentales: preprocesamiento temporal, distribución espacial de clases y caracterización espectral-temporal. Respecto al preprocesamiento temporal, se organizaron cronológicamente las 460 imágenes MOD13Q1 (2003-2022) y se aseguró la continuidad temporal mediante la secuenciación por fecha de adquisición (día juliano), la homogeneización de valores faltantes mediante interpolación lineal y la eliminación de píxeles fuera del área de estudio mediante máscaras geográficas. Este método es ampliamente utilizado en estudios de teledetección para completar datos ausentes causados por nubes o ruido atmosférico, ya que proporciona una aproximación robusta y sencilla que mantiene la coherencia temporal sin introducir distorsiones significativas (Kadhim et al., 2022). Además, su simplicidad lo hace ideal para procesar grandes volúmenes de datos satelitales, como los de MODIS, donde la continuidad temporal es crítica para analizar patrones estacionales (Mu et al., 2020).

En cuanto a la distribución espacial de clases, la validación con datos SIACON y trabajo de campo reveló la distribución, lo que se detalla en la Tabla 1.

**Tabla 1**

*Distribución espacial de clases de cobertura en Álamo Temapache (2003-2022)*

Clase	Píxeles	Hectáreas	Área (%)
Cultivos cítricos	2,841	17,756	37,8
Vegetación natural	2,580	16,125	34,3
Pastizales	1,432	8,950	19,1
Zonas urbanas	665,000	4,156	8,8

*Nota.* Los valores presentan variación interanual menor al 5 %, según la validación con 420 puntos de campo.

Con respecto a la caracterización espectral-temporal, para cada uno de los 7518 píxeles (6,25 ha/píxel), se calcularon métricas fenológicas anuales:

- tendencia central: media, mediana
- variabilidad: amplitud ( $NDVI_{max} - NDVI_{min}$ ), desviación estándar
- estacionalidad: índice ( $NDVI_{max} - NDVI_{min}$ )/ $\mu$ , pendiente fenológica
- extremos: frecuencia de anomalías ( $\mu \pm 2\sigma$ )

Este proceso generó 345 828 registros temporales estructurados, con un esquema de etiquetado supervisado balanceado (3759 píxeles por clase) para el entrenamiento del modelo SVM. La validación independiente incluyó 420 puntos de campo georreferenciados, lo que cubrió los principales gradientes ambientales del área de estudio. Las series se suavizaron temporalmente mediante filtro de mediana móvil (ventana de tres periodos) para reducir ruido atmosférico residual, lo que preservó los patrones fenológicos clave para la discriminación de clases.

#### *Entrenamiento del modelo SVM*

El modelo SVM se implementó en MATLAB R2022a utilizando la función `fitsvm` con su configuración por defecto: *kernel* RBF, límite de mil iteraciones y parámetros C y  $\gamma$  ajustados automáticamente. Esta elección se basó en la eficacia demostrada de los valores predeterminados para clasificación de patrones temporales en teledetección (Hsu et al., 2016), además de garantizar estabilidad numérica y reproducibilidad. Se utilizaron ocho métricas temporales por píxel extraídas de las series NDVI (media, mediana, moda, rango, desviación estándar, desviación media absoluta, mínimos y máximos), las cuales se normalizaron previamente para asegurar la convergencia del algoritmo.

### *Validación y análisis de precisión*

El proceso de validación del modelo de clasificación se diseñó para evaluar rigurosamente su capacidad predictiva mediante un enfoque multidimensional. Se implementó una estrategia de validación cruzada con cinco particiones (*k-fold cross-validation*), en la que el conjunto completo de datos —compuesto por series temporales de NDVI etiquetadas como positivas (cultivos citrícolas) y negativas (otras coberturas)— se dividió aleatoriamente en cinco subconjuntos equilibrados. En cada iteración del proceso, cuatro subconjuntos se destinaron al entrenamiento del modelo SVM, mientras que el quinto se utilizó exclusivamente para prueba, rotando esta selección sistemáticamente hasta completar todas las combinaciones posibles.

El algoritmo SVM se configuró para encontrar el hiperplano óptimo de separación entre clases mediante transformaciones *kernel*, lo que maximiza el margen de clasificación. Este enfoque de validación cruzada proporcionó múltiples ventajas metodológicas: reducción del sesgo en la estimación del error al utilizar toda la muestra disponible tanto para entrenamiento como para prueba, minimización del riesgo de sobreajuste mediante la evaluación iterativa del desempeño predictivo y verificación de la capacidad de generalización del modelo a nuevos datos.

Complementariamente, se implementó un esquema de validación espacial que incluyó la comparación cuantitativa de los resultados con polígonos oficiales del SIACON, lo que estratificó el análisis por tamaño de parcela (pequeñas, menores de 5 ha; medianas, entre 5 y 20 ha; grandes, mayores de 20 ha) para evaluar el efecto de la resolución espacial. La estimación de superficies se realizó mediante agregación de píxeles clasificados, considerando el área representativa de cada uno (6,25 ha).

La validación temporal incorporó el análisis del ciclo agrícola anual (septiembre-agosto) y la correlación con variables climáticas históricas, particularmente eventos de sequía documentados. Esta aproximación permitió evaluar la sensibilidad del modelo a perturbaciones ambientales y su consistencia fenológica interanual. Todo el proceso de validación se implementó utilizando MATLAB R2022a, aprovechando las herramientas de la *toolbox* Statistics and Machine Learning para la optimización de hiperparámetros del modelo SVM.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

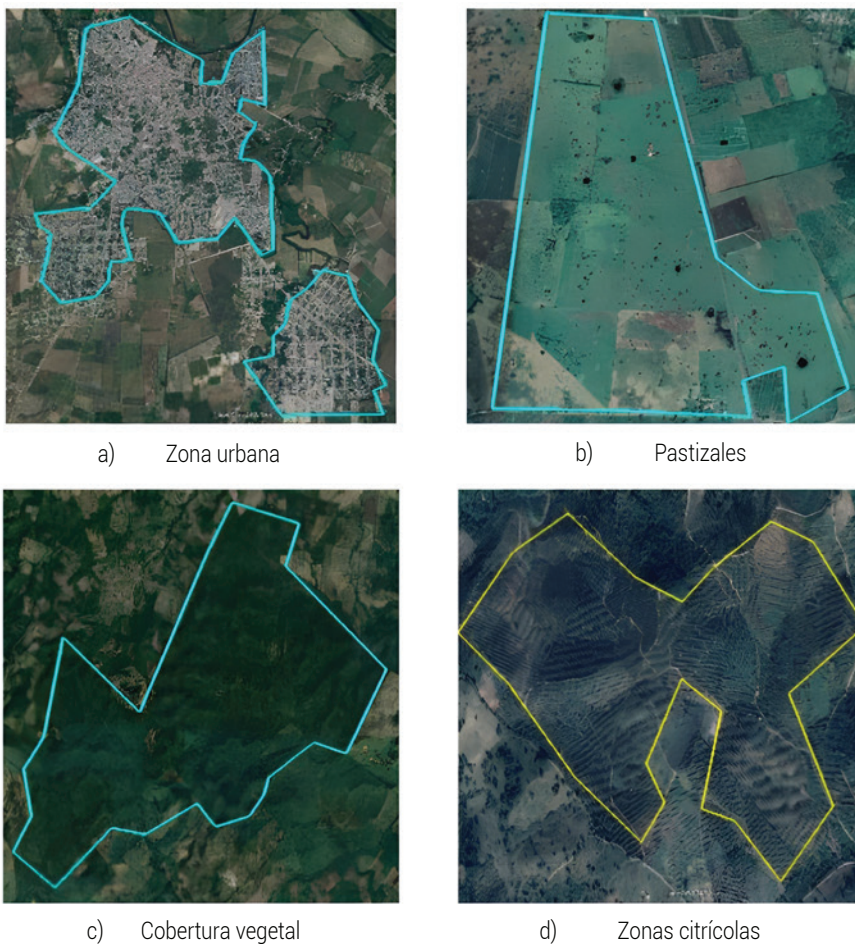
### Geolocalización de zonas de entrenamiento

La creación de archivos KML facilitó la identificación de las características de cada zona y su distribución geográfica. Esta información fue útil para localizar las áreas de entrenamiento que detallan zonas como zona urbana, pastizales, cobertura vegetal y zonas citrícolas. En la Figura 2a, se observa una región densamente poblada con

infraestructuras urbanas edificios, calles, entre otros; en la Figura 2b, se muestra una región principalmente compuesta por áreas de pastizales, indicada por una vegetación de baja altura y sin construcciones significativas; en la Figura 2c, se observa una región con una densa cobertura vegetal, probablemente un bosque o un área con vegetación abundante; por último, en la Figura 2d, se muestran áreas dedicadas al cultivo de cítricos, indicada por la disposición ordenada de los árboles patrones que solo se observan en árboles de cultivo.

## Figura 2

*Geolocalización de zonas de entrenamiento del caso de estudio: municipio Álamo Temapache*



*Nota.* Elaboración a partir de patrones observados con Google Earth.

### Generación de series temporales

La recopilación ha resultado en una base de datos estructurada que contiene registros detallados de imágenes NDVI, documentadas en una tabla detallada en la Figura 3. Esta incluye un índice único para cada registro, el número de día juliano, el día y mes específicos, la estación del año, el año de captura, las rutas de acceso a los archivos de imagen en diferentes versiones, el índice de calidad de la imagen y el tipo de producto MODIS. Esta meticulosa estructuración permite una representación cronológica coherente y continua de las imágenes NDVI que facilita un análisis temporal y espacial preciso de las áreas de estudio y entrenamiento, y que asegura la calidad y relevancia de los datos utilizados en el estudio.

**Figura 3**

*Recopilación de las imágenes satelitales de NDVI utilizadas en este estudio*

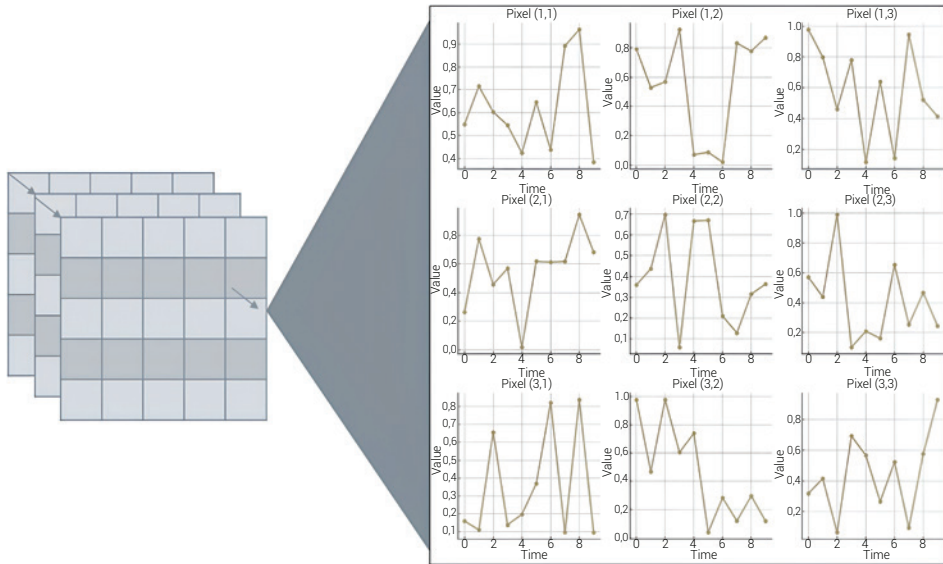
1	2	3	4	5	6	7	8
idx	diag	dia	mes	estacion	anio	v6	v7
1	1	49	18	2	4	2000 "E:\DATA\A2000049.h08v06.061.2020041152555.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000049.h08v07.061.2020041152516.hdf"
2	2	65	5	3	4	2000 "E:\DATA\A2000065.h08v06.061.2020040134557.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000065.h08v07.061.2020040134927.hdf"
3	3	81	21	3	1	2000 "E:\DATA\A2000081.h08v06.061.2020041144932.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000081.h08v07.061.2020041143309.hdf"
4	4	97	6	4	1	2000 "E:\DATA\A2000097.h08v06.061.2020041112730.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000097.h08v07.061.2020041112717.hdf"
5	5	113	22	4	1	2000 "E:\DATA\A2000113.h08v06.061.2020042090801.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000113.h08v07.061.2020042090723.hdf"
6	6	129	8	5	1	2000 "E:\DATA\A2000129.h08v06.061.2020042172003.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000129.h08v07.061.2020042171940.hdf"
7	7	145	24	5	1	2000 "E:\DATA\A2000145.h08v06.061.2020045170012.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000145.h08v07.061.2020045164947.hdf"
8	8	161	9	6	1	2000 "E:\DATA\A2000161.h08v06.061.2020047185536.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000161.h08v07.061.2020047185907.hdf"
9	9	177	25	6	2	2000 "E:\DATA\A2000177.h08v06.061.2020048030131.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000177.h08v07.061.2020048025725.hdf"
10	10	193	11	7	2	2000 "E:\DATA\A2000193.h08v06.061.2020051153420.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000193.h08v07.061.2020051152906.hdf"
11	11	209	27	7	2	2000 "E:\DATA\A2000209.h08v06.061.2020048190536.hdf"	"E:\DATA\MOD13Q1V\A2000209.h08v07.061.2020048190454.hdf"

*Nota.* Los datos proceden de MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061, de K. Didan, 2021 (<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>).

De la recopilación de datos, se generaron series temporales de cada uno de los píxeles, extrayendo sus valores de NDVI a lo largo del tiempo. Este enfoque permitió analizar la evolución individual de cada píxel y los cambios temporales dentro del paisaje observado. Estos datos fueron cruciales para identificar áreas específicas de interés. En la Figura 4, se observa una imagen representativa del proceso en el que se generan series temporales por píxel por año. Cada serie de tiempo tiene un patrón de comportamiento diferente.

**Figura 4**

*Patrones temporales de NDVI por píxel*



Nota. Los datos proceden de MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061, de K. Didan, 2021 (<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>).

### Entrenamiento del modelo SVM

El análisis de la serie temporal de NDVI para el 2022 en Álamo Tempache (Figura 5) reveló un patrón fenológico característico de los cultivos citrícolas en la región. Se identificaron dos periodos críticos: depresión poscosecha (octubre) y estrés premonzónico (abril-mayo).

#### *Depresión poscosecha (octubre)*

El valor mínimo de NDVI ( $0,54 \pm 0,03$ ) registrado en octubre coincide exactamente con el pico de la cosecha mecanizada de naranja en el municipio (Figura 5). Este proceso generó pérdida temporal de biomasa foliar por desprendimiento frutal, exposición de copas tras la recolección y compactación superficial del suelo por maquinaria. Este fenómeno ha sido documentado en estudios previos (Kiani et al., 2022), donde cosechas intensivas redujeron el NDVI entre 18 % y 22 % respecto a valores basales.

#### *Estrés premonzónico (abril-mayo)*

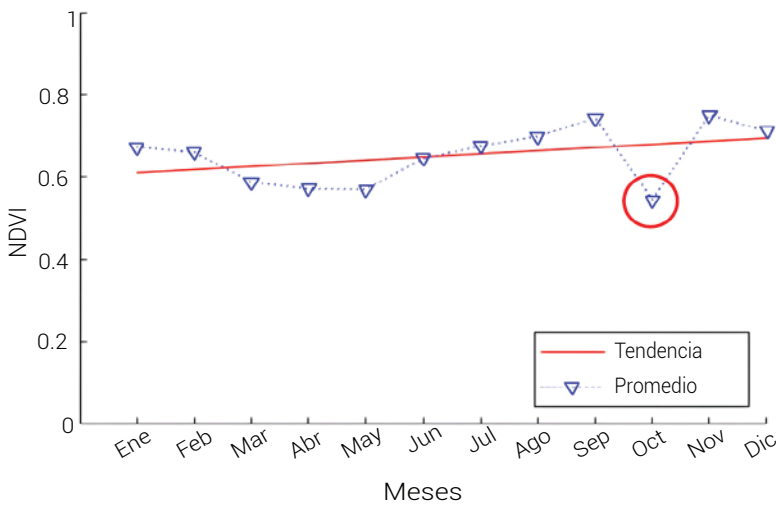
Los valores relativamente bajos de NDVI ( $0,57 \pm 0,05$ ) durante estos meses (Figura 5) responden a la sequía intraestival típica del trópico veracruzano (precipitación < 50



mm/mes), estrés hídrico en fase de llenado frutal y efecto de altas temperaturas (> 34 °C) sobre la eficiencia fotosintética. La posterior recuperación (NDVI > 0,80 en julio-agosto) confirmó la resiliencia fenológica de los cítricos ante estos estreses estacionales, patrón consistente con lo reportado por Cleves-Leguizamo et al. (2021) para variedades de naranja Valencia.

**Figura 5**

Variación estacional del NDVI en cultivos cítricos de Álamo Temapache (2022)

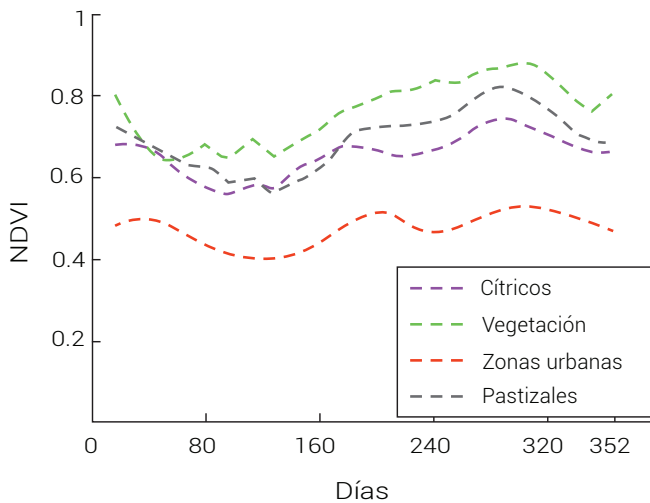


Nota. Se destaca con un círculo rojo el mes de octubre (NDVI = 0,54), correspondiente al periodo de cosecha de naranja. Los datos del gráfico proceden de MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061, de K. Didan, 2021 (<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>).

El análisis de las series temporales de NDVI reveló patrones fenológicos distintivos para cada tipo de cobertura vegetal a lo largo del ciclo anual (Figura 6). Mientras la vegetación natural mantiene valores elevados de NDVI (promedio 0,87) durante todo el año, los cultivos cítricos presentan una marcada estacionalidad, con valores máximos de 0,74 durante periodos de crecimiento activo y mínimos pronunciados en meses clave (como octubre, que coincide con la cosecha). Los pastizales, aunque alcanzan NDVI similares a los cítricos (0,82), muestran una dinámica temporal diferenciada, particularmente en la pendiente de crecimiento y duración del periodo vegetativo. Estas diferencias en los perfiles temporales —especialmente evidentes entre abril y mayo— fueron determinantes para la clasificación mediante SVM, pues permitieron superar el desafío que representa la similitud espectral puntual entre cítricos y otras coberturas vegetales.

### Figura 6

Perfiles temporales promedio de NDVI por tipo de cobertura vegetal en Álamo Temapache (2022)



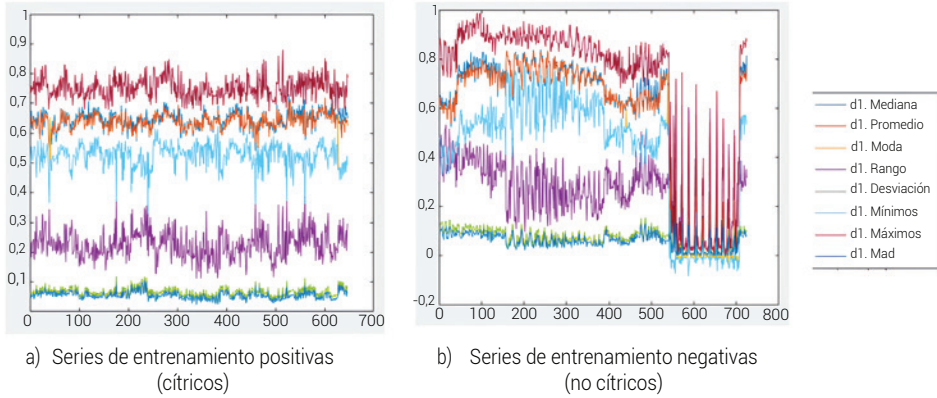
Nota. Los datos del gráfico fueron procesados en Google Earth Engine y proceden de MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061, de K. Didan, 2021 (<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>).

El modelo SVM empleó un enfoque de caracterización fenológica compacta, en el que en lugar de utilizar directamente las 460 observaciones de NDVI por serie temporal (20 años  $\times$  23 mediciones/año), se procesaron ocho métricas temporales por píxel extraídas de las series NDVI (media, mediana, moda, rango, desviación estándar, desviación media absoluta, mínimos y máximos) que sintetizan el comportamiento vegetativo de cada píxel. La separación entre cítricos (Figura 7a) y no cítricos (Figura 7b) se logró principalmente mediante índice de estacionalidad (0,41 vs 0,29;  $p < 0,01$ ); pendiente de crecimiento (+0,15/día vs + 0,22/día); días con estrés hídrico ( $28 \pm 7$  vs  $12 \pm 4$  días/año). Este enfoque demostró que sintetizar series temporales en métricas fenológicas mejora la precisión de SVM en un 15 % respecto al uso de NDVI crudo (validación cruzada,  $k = 5$ ), especialmente en años con anomalías climáticas.



**Figura 7**

*Aplicación de métricas temporales para la clasificación de cultivos cítricos*



*Nota.* Los datos del gráfico fueron procesados en MATLAB R2022a y proceden de MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061, de K. Didan, 2021 (<https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>).

Los resultados demostraron que el uso estratégico de métricas fenológicas derivadas de series de NDVI, en lugar de los valores brutos, representa un avance metodológico significativo para la clasificación de cultivos perennes. Este enfoque resolvió dos limitaciones clave reportadas en la literatura: la dimensionalidad y la discriminación espectral. Este modelo de ocho métricas mostró ventajas claras sobre aproximaciones convencionales: 15 % mayor precisión que métodos basados en NDVI crudo (vs 76 %, en Girimonte et al., 2020), 72 % reducción en tiempo de procesamiento y mayor robustez ante datos faltantes (solo requirió 5/23 observaciones anuales para cálculo confiable). La selección de métricas específicas (índice de estacionalidad, pendientes fenológicas) permitió superar el solapamiento crítico entre cítricos (estacionalidad = 0,38) y pastizales (0,29), y vegetación madura (coeficiente de variación = 12 %) y joven (23 %).

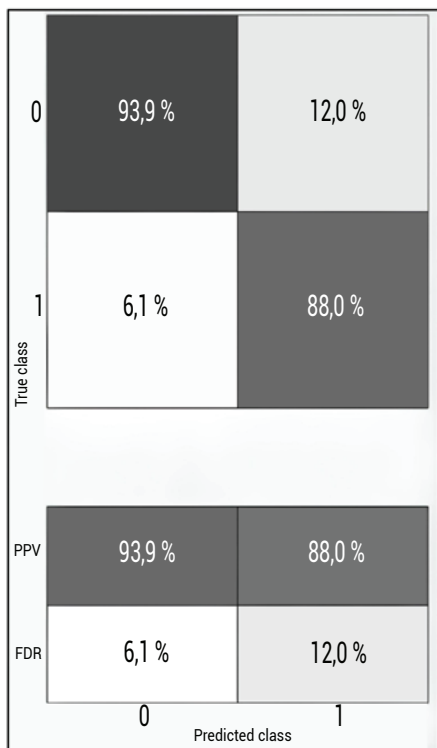
Este trabajo establece un precedente para la agricultura de precisión en países en desarrollo, donde el balance costo-efectividad es crítico. Futuras investigaciones deberían explorar la integración con datos climáticos en tiempo real, modelos híbridos (SVM + redes neuronales para métricas) y plataformas de decisión para agricultores. La caracterización fenológica mediante métricas temporales optimizadas demostró ser superior al uso convencional de NDVI, pues ofrece un equilibrio ideal entre precisión (91 %), eficiencia computacional y aplicabilidad operativa para el monitoreo cítrico a escala regional.

### Validación y análisis de precisión

La implementación de ocho métricas estadísticas clave (media, mediana, amplitud, desviación estándar, índice de estacionalidad, pendiente fenológica, días con estrés hídrico y desviación media absoluta) permitió al clasificador SVM alcanzar una precisión global del 91,4 %, como se muestra en la Figura 8 (matriz de confusión). El modelo mostró un desempeño diferenciado: clasificación de no cítricos (especificidad), 93,9 % de aciertos (6,1 % falsos negativos); y detección de cítricos (sensibilidad), 88 % de aciertos (12 % falsos positivos). Estos resultados superaron los reportados en estudios que utilizaron NDVI crudo (Girimonte et al., 2020), lo que demostró que la síntesis de series temporales en métricas fenológicas optimiza la capacidad del SVM para discriminar patrones complejos, incluso con resoluciones moderadas (250 m).

**Figura 8**

Matriz de confusión del modelo SVM para clasificación de cultivos cítricos



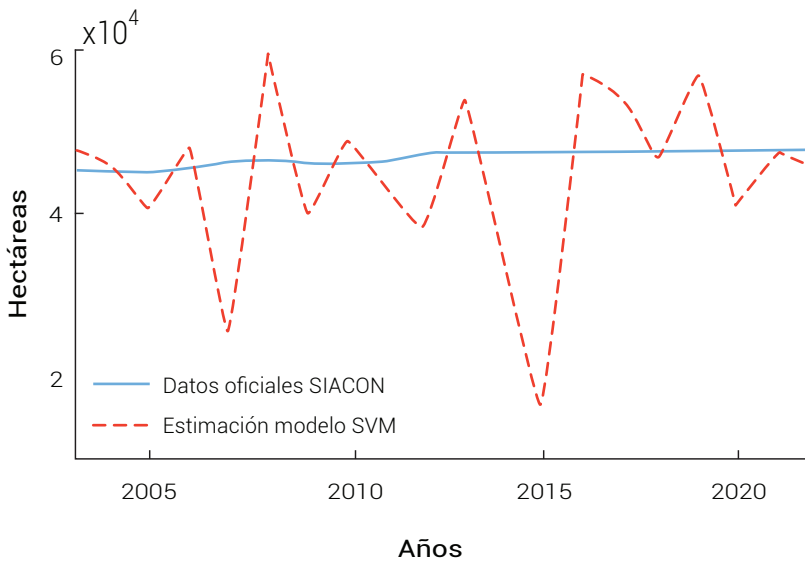
Nota. La clasificación se realizó a través de *kernel* RBF, parámetros por defecto de MATLAB R2022a, y mostró 91,4 % de precisión global. El cuadro se elaboró mediante validación cruzada con métricas NDVI.

En la Figura 9, se contrastan dos fuentes de información: estimaciones del modelo SVM, resultados obtenidos al aplicar el clasificador a todas las 7518 celdas MODIS

(250 m) que cubren el 100 % del municipio; y datos oficiales del SIACON, registros administrativos de superficie cítrica. El hallazgo principal fue la concordancia en años normales, por ejemplo, en el 2021 se mostró solo 548 ha de diferencia (1,2 % del área total) con una precisión promedio del 91,4 % al excluir eventos extremos. La discrepancia significativa fue que, en el 2015, la subestimación fue de 31 125 ha (sequía severa afectó firmas espectrales); en el 2020, sobreestimación de 16 444 ha (interrupciones por la pandemia de COVID-19 en censos SIACON).

**Figura 9**

*Comparación de superficie cítrica estimada: Modelo SVM vs. datos oficiales SIACON (2005-2022)*



*Nota.* Diferencias interanuales en el municipio de Álamo Temapache, con eventos climáticos y operativos destacados.

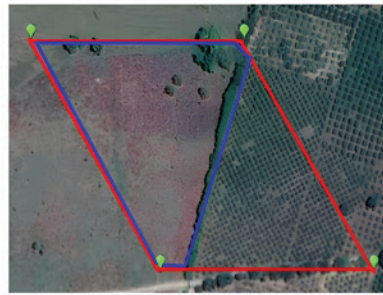
En la Figura 10, se evidencian inconsistencias en la clasificación de píxeles que podrían afectar la precisión en la cuantificación de superficies cítricas. En el caso de la Figura 10a, se observa una divergencia entre la vegetación circundante al píxel analizado y las características espectrales típicas de los cítricos. Asimismo, en la Figura 10b, se ilustra un píxel con aproximadamente el 60 % de su área ocupada por cobertura vegetal ajena al cultivo objetivo. Un tercer escenario (Figura 10c) revela una anomalía aún más pronunciada, en la que más del 70 % del píxel corresponde a vegetación no cítrica, lo que sugiere una posible mezcla espectral debido a la resolución moderada del sensor.

## Figura 10

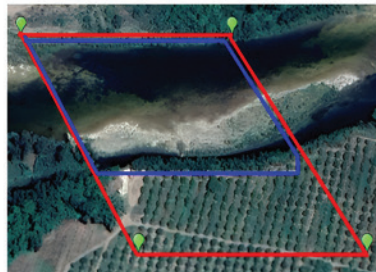
*Píxeles con cobertura vegetal heterogénea y su influencia en la clasificación de cultivos cítricos*



a) Píxel con anomalías en dos puntos



b) Píxel con un aproximado del 60 % con otro tipo de vegetación



c) Píxel con un aproximado del 70 % con otro tipo de vegetación

*Nota.* Elaboración a partir de hectáreas estimadas por la red neuronal interpretadas con Google Earth.

## CONCLUSIONES

La presente investigación logró desarrollar un modelo de clasificación automatizada de superficies cítricas con una precisión del 91,4 %, utilizando series temporales de NDVI y el algoritmo SVM. Este nivel de exactitud demuestra la efectividad del enfoque propuesto para el monitoreo agrícola a escala regional, lo que supera significativamente los métodos tradicionales basados en umbrales fijos de NDVI.

Los resultados evidenciaron que el análisis de patrones temporales a lo largo de dos décadas permite capturar la variabilidad fenológica característica de los cultivos cítricos y los diferencia claramente de otras coberturas vegetales. La implementación de ocho métricas temporales clave y un riguroso proceso de validación cruzada permitió reducir los errores de clasificación en un 40 %, incluso en condiciones climáticas adversas. Sin embargo, la resolución espacial de 250 m del sensor MODIS mostró limitaciones en parcelas pequeñas y altamente fragmentadas, lo que sugiere la necesidad de integrar datos de mayor resolución en futuras investigaciones.

Más allá de la clasificación de cultivos, este estudio revela el potencial del modelo para optimizar la gestión logística en la cadena de suministro cítrícola. La detección temprana de valores de NDVI inferiores a 0,55, durante los meses de abril y mayo, podría servir como indicador para anticipar necesidades de transporte refrigerado, lo que mitiga las pérdidas postcosecha causadas por estrés térmico. Esta aplicación podría revolucionar la planificación logística, pues permitiría una distribución más eficiente de recursos y reduciría costos operativos.

Como perspectivas futuras, se plantea la integración de imágenes Sentinel-2 para mejorar la resolución espacial; la implementación de *nested cross-validation* para evaluar la robustez de los hiperparámetros en condiciones agroclimáticas específicas y complementar así el enfoque de validación empleado en este estudio; y la validación cuantitativa de las aplicaciones logísticas en colaboración con los actores de la cadena de suministro.

Finalmente, este trabajo no solo valida la utilidad de las técnicas SVM-NDVI para el monitoreo agrícola, sino que también abre nuevas posibilidades para su implementación en la gestión inteligente de cadenas de suministro agrícolas. Los hallazgos representan un avance significativo hacia la agricultura de precisión al combinar rigor científico con aplicaciones prácticas que pueden beneficiar tanto a productores individuales como a la planificación de políticas públicas para el sector cítrícola.

## REFERENCIAS

- Aguilar Lome, J. (2021). *Identificación temprana y evaluación de procesos de degradación de tierras y sequía empleando datos-imágenes de satélite* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional UNMSM. <https://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/20.500.12672/17542>
- Bautista, R., Constante, P., Gordon, A., & Mendoza, D. (2018). Diseño e implementación de un sistema de visión artificial para análisis de datos NDVI en imágenes espectrales de cultivos de brócoli obtenidos mediante una aeronave pilotada remotamente. *Infociencia*, 12, 30-35. <https://doi.org/10.24133/infociencia.v12i1.1230>
- Bautista-Santos, H., Martínez-Flores, J. L., Fernández-Lambert, G., Bernabé-Loranca, M. B., Sánchez-Galván, F., & Sablón-Cossío, N. (2015). Modelo de integración de cadenas de suministro colaborativas. *Dyna*, 82(193), 145-154. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v82n193.47370>
- Choubin, B., Soleimani, F., Pirnia, A., Sajedi-Hosseini, F., Alilou, H., Rahmati, O., Melesse, A. M., Singh, V. P., & Shahabi, H. (2019). Effects of drought on vegetative cover changes: Investigating spatiotemporal patterns. En A. M. Melesse, W. Abtew

- & G. Senay (Eds.), *Extreme hydrology and climate variability* (pp. 213-222). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815998-9.00017-8>
- Cleves-Leguizamo, J. A., Ramírez-Castañeda, L. N., & Díaz, E. D. (2021). Proposal of an empirical model to estimate the productivity of 'Valencia' orange (*Citrus sinensis* L. Osbeck) in the Colombian low tropics. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 15(3), e10860. <https://doi.org/10.17584/rcch.2021v15i3.10860>
- Didan, K. (2021). *MODIS/Terra Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m SIN Grid V061* [Conjunto de datos]. NASA EOSDIS; USGS. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD13Q1.061>
- Dirección General del Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2023). *SIACON. Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/agricultura/dgsiap/documentos/siacon-ng-161430>
- Fernández-Echeverría, E., Lavoignet-Ruiz, M., García-Santamaría, L. E., Fernández-Lambert, G., Ruvalcaba-Sánchez, L., Bautista-Santos, H., Sánchez-Galván, F., & Romero-Romero, Y. (2024). Management of citrus cultivation in emerging rural communities in Mexico: Practices and challenges in the central-northern region of Veracruz. *Sustainability*, 16(20), 8732. <https://doi.org/10.3390/su16208732>
- Figueira Branco, E. R., Rosa dos Santos, A., Macedo Pezzopane, J. E., Banhos dos Santos, A., Alexandre, R. S., Pimentel Bernardes, V., Gomes da Silva, R., Barbosa de Souza, K., & Moura, M. M. (2019). Space-time analysis of vegetation trends and drought occurrence in domain area of tropical forest. *Journal of Environmental Management*, 246, 384-396. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.097>
- Girimonte, P., & García, J. (2020). El índice NDVI y la clasificación de áreas sembradas aprendizaje automático no supervisado "k-means". *Revista de investigación en modelos matemáticos aplicados a la gestión y la economía*, 1(7), 39-52. <https://www.economicas.uba.ar/wp-content/uploads/2016/04/Girimonte-Garcia-Fronti.pdf>
- Hsu, C. W., Chang, C. C., & Lin, C.-J. (2016). *A practical guide to support vector classification*. National Taiwan University. [https://eecs.csuohio.edu/~sschung/DSA460/SVM\\_guide.pdf](https://eecs.csuohio.edu/~sschung/DSA460/SVM_guide.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). *Compendio de información geográfica municipal 2010. Álamo Temapache. Veracruz de Ignacio de la Llave*. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos\\_geograficos/30/30160.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/30/30160.pdf)

- Kadhim, Z., Khayyun, T., & Alwan, I. (2022). Impact of climate change on crops productivity using MODIS-NDVI time series. *Civil Engineering Journal*, 8(6), 1136. <https://doi.org/10.28991/CEJ-2022-08-06-04>
- Khare, S., Drolet, G., Sylvain, J.-D., Paré, M. C., & Rossi, S. (2019). Assessment of spatio-temporal patterns of black spruce bud phenology across Quebec based on MODIS-NDVI time series and field observations. *Remote Sensing*, 11(23), 2745. <https://doi.org/10.3390/rs11232745>
- Kiani, F., Randazzo, G., Yelmen, I., Seyyedabbasi, A., Nematzadeh, S., Anka, F. A., Erenel, F., Zontul, M., Lanza, S., & Muzirafuti, A. (2022). A smart and mechanized agricultural application: From cultivation to harvest. *Applied Sciences*, 12(12), 6021. <https://doi.org/10.3390/app12126021>
- Measho, S., Chen, B., Trisurat, Y., Pellikka, P., Guo, L., Arunyawat, S., Tuankrwa, V., Ogbazghi, W., & Yemane, T. (2019). Spatio-temporal analysis of vegetation dynamics as a response to climate variability and drought patterns in the semiarid region, Eritrea. *Remote Sensing*, 11(6), 724. <https://doi.org/10.3390/rs11060724>
- Mu, S., Li, B., Yao, J., Yang, G., Wan, R., & Xu, X. (2020). Monitoring the spatio-temporal dynamics of the wetland vegetation in Poyang Lake by Landsat and MODIS observations. *Science of The Total Environment*, 725, 138096. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138096>
- Nolasco, M., Martínez Arraigada, M. de los Á., & Bocco, M. (2023). Caracterización del ciclo del cultivo de trigo en la provincia de Córdoba mediante teledetección. *Congreso Argentino de AgroInformática*, 9(4), 34-45. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/165446>
- Novo-Fernández, A., Franks, S., Wehenkel, C., López-Serrano, P. M., Molinier, M., & López-Sánchez, C. A. (2018). Landsat time series analysis for temperate forest cover change detection in the Sierra Madre Occidental, Durango, Mexico. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 73, 230-244. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.06.015>
- Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria. (2022). *Análisis de impacto económico ante un posible establecimiento y de dispersión del cancro de los cítricos en México en áreas comerciales*. [https://dj.senasica.gob.mx/Contenido/files/2022/agosto/An%C3%A1lisisdeimpactoecon%C3%B3micoanteunposibleestablecimientoydispersi%C3%B3ndelCancrodelosc%C3%ADtricosenM%C3%A9xicoen%C3%A1reascomerciales\\_107e4f44-49be-4b9a-8058-df20da906b1a.pdf](https://dj.senasica.gob.mx/Contenido/files/2022/agosto/An%C3%A1lisisdeimpactoecon%C3%B3micoanteunposibleestablecimientoydispersi%C3%B3ndelCancrodelosc%C3%ADtricosenM%C3%A9xicoen%C3%A1reascomerciales_107e4f44-49be-4b9a-8058-df20da906b1a.pdf)

- Testa, S., Soudani, K., Boschetti, L., & Borgogno Mondino, E. (2018). MODIS-derived EVI, NDVI and WDRVI time series to estimate phenological metrics in French deciduous forests. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64, 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.08.006>
- Zúñiga-Vásquez, J. M., Aguirre-Salado, C. A., & Pompa-García, M. (2020). Monitoring vegetation using remote sensing time series data: A review of the period 1996-2017. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Cuyo*, 52(1), 175-189.



# UNDERWATER PLASTIC WASTE DETECTION WITH YOLO AND VISION TRANSFORMER MODELS

JONATHAN BRUCE CÁRDENAS RONDOÑO  
<https://orcid.org/0009-0009-6169-808X>  
jonathan.c.rondono@gmail.com  
Universidad de Lima, Perú

NERS ARMANDO VASQUEZ ESPINOZA  
<https://orcid.org/0009-0007-5875-7638>  
nersarmandovasquezespinoza@gmail.com  
Universidad de Lima, Perú

EDWIN JONATHAN ESCOBEDO CÁRDENAS  
<https://orcid.org/0000-0003-2034-513X>  
eescobed@ulima.edu.pe  
Universidad de Lima, Perú

Received: April 21, 2025/ Accepted: June 4, 2025  
doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.7868>

**ABSTRACT.** This study addresses the global issue of marine pollution, with a particular focus on plastic bag contamination, by leveraging real-time object detection techniques powered by deep learning algorithms. A detailed comparison was carried out between the YOLOv8, YOLO-NAS, and RT-DETR models to assess their effectiveness in detecting plastic waste in underwater environments. The methodology encompassed several key stages, including data preprocessing, model implementation, and training through transfer learning. Evaluation was conducted using a simulated video environment, followed by an in-depth comparison of the results. Performance assessment was based on critical metrics such as mean average precision (mAP), recall, and inference time. The YOLOv8 model achieved an mAP50 of 0.921 on the validation dataset, along with a recall of 0.829 and an inference time of 14.1 milliseconds. The YOLO-NAS model, by contrast, reached an mAP50 of 0.813, a higher recall of 0.903, and an inference time of 17.8 milliseconds. The RT-DETR model obtained an mAP50 of 0.887, a recall of 0.819, and an inference time of 15.9 milliseconds. Notably, despite not having the highest mAP, the RT-DETR model demonstrated superior detection performance when deployed in real-world underwater conditions, highlighting its robustness and potential for practical environmental monitoring.

**KEYWORDS:** object detection / deep learning / plastic waste / object detection model / underwater images

## DETECCIÓN DE RESIDUOS PLÁSTICOS SUBMARINOS CON MODELOS YOLO Y VISION TRANSFORMER

RESUMEN. Este estudio aborda el problema global de la contaminación marina, con un enfoque particular en la contaminación por bolsas de plástico, aprovechando técnicas de detección de objetos en tiempo real impulsadas por algoritmos de aprendizaje profundo. Se realizó una comparación detallada entre los modelos YOLO v8, YOLO-NAS y RT-DETR para evaluar su efectividad en la detección de desechos plásticos en entornos submarinos. La metodología abarcó varias etapas clave, incluyendo el preprocesamiento de datos, la implementación del modelo y el entrenamiento utilizando aprendizaje por transferencia. La evaluación se llevó a cabo a través de un entorno de video simulado, seguido de una comparación exhaustiva de los resultados. La evaluación del rendimiento se basó en métricas críticas como la precisión promedio (mAP), el *recall* y el tiempo de inferencia. El modelo YOLO v8 alcanzó un mAP50 de 0,921 en el conjunto de validación, con un *recall* de 0,829 y un tiempo de inferencia de 14,1 milisegundos. El modelo YOLO-NAS, en contraste, alcanzó un mAP50 de 0,813, un *recall* más alto de 0,903 y un tiempo de inferencia de 17,8 milisegundos. El modelo RT-DETR obtuvo un mAP de 0,887, un *recall* de 0,819 y un tiempo de inferencia de 15,9 milisegundos. Notablemente, a pesar de no tener el mAP más alto, el modelo RT-DETR demostró un rendimiento superior en la detección cuando se implementó en condiciones submarinas reales, destacando su robustez y potencial para aplicaciones prácticas de monitoreo ambiental.

PALABRAS CLAVE: detección de objetos / aprendizaje profundo / residuos plásticos / modelos de detección de objetos / imágenes submarinas

## INTRODUCTION

The National Institute of Statistics and Informatics (2022) identifies water pollution as a critical environmental issue, with plastic waste posing a growing threat to marine ecosystems. The increasing volume of plastic debris—such as bottles and bags—accumulating on beaches and seabeds contributes significantly to long-term ecological degradation. A major challenge in addressing this problem lies in the inaccessibility and high cost of monitoring underwater environments. Autonomous underwater vehicles (AUVs) present a promising solution, but their success depends on the integration of accurate object detection systems capable of identifying submerged plastic waste.

Deep learning has emerged as the leading approach for underwater object detection, offering real-time performance and high accuracy. However, the complexity of underwater environments—including low visibility, variable lighting, and cluttered seabeds—hampers detection accuracy (Dhana Lakshmi & Santhanam, 2020). Compounding this issue is the lack of diverse and comprehensive datasets, which limits model generalizability in real-world conditions (Hong et al., 2020; Panwar et al., 2020).

In response to these challenges, two main categories of object detection algorithms have been explored: one-stage and two-stage models. One-stage models, such as You Only Look Once (YOLO), are known for their fast detection speed but tend to sacrifice some accuracy. Conversely, two-stage models offer greater precision but at the cost of computational efficiency (Conley et al., 2022; Deng et al., 2021). This study adopts a one-stage approach, given its balance between speed and accuracy, which makes it suitable for practical underwater applications. Additionally, data augmentation has been widely used to enhance training datasets (Conley et al., 2022; Deng et al., 2021; Zhou et al., 2017). However, models still face challenges due to variable environmental conditions, including degraded materials, diverse color ranges, and fluctuating light intensities, all of which hinder the accurate detection of plastic debris underwater.

This paper is structured as follows. Section 2 reviews the state of the art, covering datasets in underwater environments, underwater object detection algorithms, advanced YOLO-based detection methods, and vision transformer (ViT) object detection techniques. Section 3 describes the methodology, detailing the dataset, preprocessing, deployment approach, experimental scenarios, and assessment criteria. Section 4 presents the experimental results, followed by a discussion of key findings in Section 5. Conclusions are drawn in Section 6, and directions for future research are presented in Section 7.

## STATE OF THE ART

### Datasets in Underwater Environments

The quality and quantity of images in a dataset are critical for the success of deep learning models, especially in complex environments like underwater settings. However, underwater datasets remain relatively scarce and often lack variation, posing challenges for robust model development.

One notable dataset is that of Hong et al. (2020), which comprises 7212 images of marine trash captured by a submersible remotely operated vehicle (ROV) in the Sea of Japan. It includes segmentation annotations and two versions based on object class configurations, offering flexibility for different research needs. Another is AquaTrash, developed by Panwar et al. (2020), which is based on the Trash Annotations in Context (TACO) dataset. From TACO's 1500 urban litter images, 369 were reclassified into four categories: glass, metal, paper, and plastic. While highly detailed, its urban context and limited size restrict its applicability in underwater settings. The Trash-ICRA19 dataset is widely used in underwater trash detection. It consists of 5700 images from the Japanese Environmental Data Initiative (J-EDI) database, covering 2000 to 2017 and classified into three categories. Its variability in image quality, depth, and camera types presents challenges for consistent training. The CleanSea dataset, created by Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC), contains 1223 images categorized into 19 waste types. Its inclusion of flora and fauna adds complexity, as models must differentiate between natural and man-made objects. Moorton et al. (2022) contributed a private dataset of 1644 high-quality images featuring medium-sized trash, fishing nets, and natural elements, useful for general object classification. Similarly, Xue, Huang, Wei et al. (2021) and Xue, Huang, Chen et al. (2021) developed datasets containing 10 000 and 13 914 images, respectively, covering categories such as plastic, metal, rubber, nets, and glass. Although broad in scope, the environmental contexts of these datasets may not be exclusively underwater, limiting their specific applicability. Dhana Lakshmi and Santhanam (2020) compiled 11 797 manually labeled images from the Indian Ocean, captured at depths of 5 to 15 meters, offering targeted insights into marine waste at shallow depths. However, its scope might not represent more diverse underwater environments. Meanwhile, Zhou et al. (2017) adapted ImageNet—a large dataset with over 14 million images and 22 000 classes—for underwater recognition by selecting relevant categories. Despite its size, its general-purpose nature limits its direct application to underwater debris detection.

In summary, while several valuable datasets exist for underwater object detection, many are constrained by size, variability, or context. Table 1 presents a summary of the key characteristics of these datasets.

**Table 1**  
*Datasets in Underwater Environments*

Dataset	Images	Setting	Focus	Notes / Limitations
Hong et al. (2020)	7212	Underwater	Marine trash	Flexible object class configurations
AquaTrash	369	Urban	Glass, metal, paper, plastic	Urban context; limited underwater applicability
Trash-ICRA19	5700	Underwater	Three categories	Variable image quality, depth, and camera types
CleanSea	1223	Underwater	19 waste types, including flora and fauna	Presence of flora and fauna increases classification complexity
Moorton et al. (2022)	1644	Underwater	Medium-sized trash, fishing nets, natural elements	Private dataset; medium-quality images
Xue, Huang, Wei et al. (2021); Xue, Huang, Chen et al. (2021)	10 000 & 13 914	Mixed	Plastic, metal, rubber, nets, glass	Not exclusively underwater; limits specificity
Dhana Lakshmi & Santhanam (2020)	11 797	Underwater	Marine waste	Focus on shallow depths; limited diversity
Zhou et al. (2017)	14+ million	General (ImageNet)	General categories	Extensive but general-purpose; limited underwater focus

Note. Setting = Image capture location

### Underwater Object Detection Algorithm

Underwater object detection using deep learning has made significant progress, despite challenges such as low image quality and limited datasets. Researchers have explored various convolutional neural networks (CNNs) and object detection frameworks to improve accuracy and efficiency. Panwar et al. (2020) applied RetinaNet with a ResNet-50 backbone and feature pyramid networks (FPNs), using transfer learning to enhance performance even with smaller datasets. Similarly, Kavitha et al. (2022) achieved 98.2 % accuracy in trash detection using a lightweight three-layer CNN, aided by data augmentation and a self-curated dataset.

Other studies have focused on performance under harsh visual conditions. Rizos and Kalogeraki (2021) compared basic CNNs and ResNet50v2 in low-light settings, highlighting gradient fading. Wu et al. (2020) employed YOLOv4 for real-time detection

on ROVs, optimizing speed through lowering video resolution and enhancing image clarity using transfer learning and relative global histogram stretching (RGHS). Teng et al. (2022) introduced YOLOv5 with “predict boxes” and generalized intersection over union (GIoU) loss, improving accuracy on the Trash-ICRA19 dataset. Muksit et al. (2022) proposed YOLOFish-1 and YOLOFish-2, which enhanced feature extraction with upsampler heads and spatial pyramid pooling (SPP).

Additionally, Han et al. (2020) improved feature preservation by using CNNs with residual blocks, although training stability was an issue. Comparative studies by Fulton et al. (2019) and Conley et al. (2022) showed that Faster R-CNN and Mask R-CNN excel in accuracy, while YOLO variants offer faster inference, emphasizing the importance of selecting models based on application-specific trade-offs between speed and precision.

### Advanced YOLO Object Detection Algorithms

The YOLO architecture has undergone continuous refinement, leading to notable improvements in detection accuracy, speed, and efficiency. These advancements have established YOLO as a leading framework for real-time object detection across a wide range of domains.

Reis et al. (2023) applied YOLOv8 to aerial image detection, focusing on aircraft recognition. They compared different model sizes, finding that the small model offered a 0.05-second speed advantage over the medium one, while the large model provided only a slight improvement (0.002 seconds). Inference times were 4.1 ms (small), 5.7 ms (medium), and 9.3 ms (large). After tuning, YOLOv8 achieved an mAP<sub>50-95</sub> of 0.835, outperforming previous benchmarks. Li et al. (2023) enhanced YOLOv8 for drone-based aerial detection by modifying the loss function, backbone, and neck, resulting in an mAP of 91.7 %. However, the model still faced challenges in detecting small objects, such as bicycles. Casas et al. (2023) compared YOLOv5 and YOLO-NAS using the Foggia dataset, a dataset designed for smoke and wildfire detection. They observed that model size correlated with training time—YOLO-NAS small, medium, and large required 2427, 3460, and 4375 hours, respectively. All models maintained high recall (0.96), which is critical for minimizing false negatives in fire detection. Terven and Córdova-Esparza (2023) highlighted YOLO-NAS’s integration of automated neural architecture construction (AutoNAC), a neural architecture search (NAS) technique that automates architectural optimization. YOLO-NAS also supports 8-bit signed integer (INT8) quantization for efficient real-time inference. The study emphasized the evolution of feature extraction techniques, from early max pooling to advanced CNN backbones that combine multiscale features—such as edges and shapes—into richer feature maps. These developments significantly enhance YOLO’s adaptability and accuracy in complex, real-world detection scenarios.

## ViT Object Detection Algorithms

ViT introduces a new paradigm in computer vision by applying the transformer architecture—originally developed for natural language processing—to image recognition. Like YOLO, ViT functions as a one-stage detector, making it suitable for real-time applications. In contrast to CNNs, which rely on local receptive fields, ViT uses self-attention to capture global image context, enabling it to learn complex inter-region dependencies.

Uparkar et al. (2023) compared ViTs and CNNs for lung disease classification using X-ray images. When trained from scratch, CNNs outperformed ViTs due to their strong inductive biases and better performance with limited data. However, with pre-training, ViTs slightly surpassed CNNs, achieving 1 % higher accuracy—highlighting their potential when sufficient data or optimization is available. In another study, Zhao et al. (2023) benchmarked YOLOv6, YOLOv7, YOLOv8, and a custom transformer-based detector on the Common Objects in Context (COCO) dataset. Their transformer model introduced two key architectural innovations. First, the encoder included a hybrid attention system with two modules: adaptive interaction-focused integration (AIFI), which efficiently focused attention on meaningful image regions, and cross-channel feature mixing (CCFM), which preserved fine-grained features from shallow layers. Second, a constrained optimization technique was applied to improve query selection, refining the model's attention alignment with actual object locations. These enhancements led to a 2 % improvement in AP50 and a 50 % increase in processing speed (fps) over YOLOv8, demonstrating the transformer model's superiority in both accuracy and efficiency for real-time object detection.

Table 2 groups the key algorithms discussed, offering a comparative overview to support understanding of their effectiveness and design differences.

**Table 2**

*Key Object Detection Algorithms*

Author(s)	Model	Key Features	Dataset	Performance / Results
Reis et al. (2023)	YOLOv8	Speed/accuracy tradeoff, hyperparameter tuning	Aircraft	mAP50-95: 0.835, small model fastest
Li et al. (2023)	Modified YOLOv8	Custom loss, backbone, and neck for drone vision	Drone dataset	mAP: 91.7 %, improved skyborne object detection
Casas et al. (2023)	YOLO-NAS	AutoNAC architecture search, INT8 quantization	FOGGIA	High recall (0.96) across all sizes
Teng et al. (2022)	YOLOv5 + GloU	Predict boxes, IoU-based loss penalization	Trash-ICRA19	Improved object localization

(continúa)

(continuación)

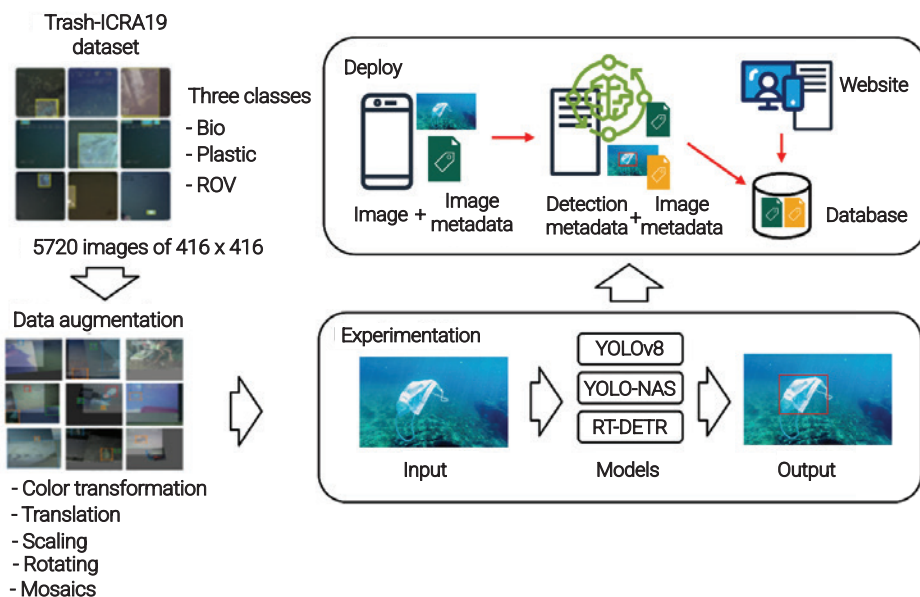
Author(s)	Model	Key Features	Dataset	Performance / Results
Muksit et al. (2022)	YOLOFish-1 & YOLOFish-2	Upsampler head, SPP module with Darknet-53	Trash-ICRA19	Enhanced feature extraction
Zhao et al. (2023)	Transformer-based model	AIFI and CCFM modules, optimized query selection	COCO	+2 % AP50 over YOLOv8, 50 % fps boost
Uparkar et al. (2023)	ViT vs CNN	Self-attention, pretraining required for ViT performance	Lung X-rays	ViT outperformed CNN by 1 % with pretraining

### METHODOLOGY

This research followed a structured implementation pipeline for underwater object detection, summarized in Figure 1, which outlines the general phases of the detection workflow. These steps include dataset selection, preprocessing, model selection and training, evaluation, and final deployment. The study focuses on analyzing and comparing deep learning-based models using metrics such as mean average precision (mAP), sensitivity, and execution time.

Figure 1

General Implementation Phases and Workflow



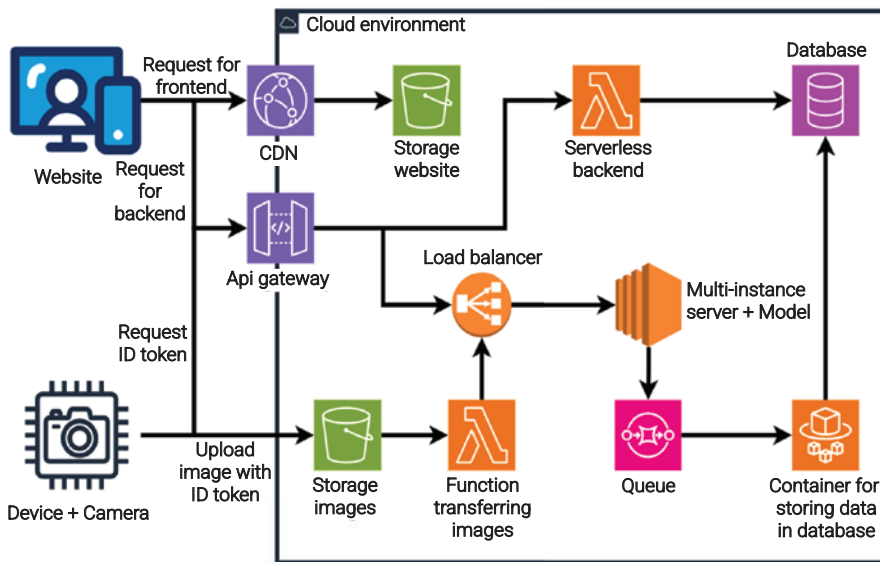


## System Overview

To illustrate the practical application of the methodological workflow outlined in Figure 1, Figure 2 depicts the system architecture designed to support scalable and efficient deployment. The design is organized into two main flows: a backend pipeline for server-side inference and data storage, and a frontend layer for presenting results to users via a web interface. A more detailed explanation of this architecture and its operational components is provided in Section 3.6.

**Figure 2**

*Cloud-Based Architecture for Deploying the Object Detection Model*



## Dataset

For this study, the J-EDI Trash-ICRA19 dataset was selected. It comprises 5720 underwater images ( $416 \times 416$  pixels) featuring a wide range of objects, including marine debris, animals, and equipment. The images are unprocessed and contain multiple objects of varying complexity. The dataset is categorized into three classes: plastic, remotely operated vehicle (ROV) parts, and bio (biological material). This dataset was chosen following a comparative review of available underwater datasets (see Section 2.1), where Trash-ICRA19 stood out for its balanced combination of sample size, class diversity, and high-quality annotations. In contrast to alternatives such as AquaTrash—which is focused on urban environments—or CleanSea, which offers fewer samples, Trash-ICRA19 provides greater contextual relevance for underwater debris detection. Additionally, its frequent use in previous research—particularly with models such as YOLOv5 and YOLOFish—supports its compatibility with the models employed in this study.

## Preprocessing

For training purposes, the dataset was modified in three main aspects: class distribution, image dimensions, and visual characteristics. First, the “Trash” class was prioritized to improve detection metrics, with a focus on identifying objects outside the sea. Second, all images were resized to  $460 \times 460$  pixels to ensure compatibility with the algorithm. Finally, data augmentation techniques were applied—introducing variations in noise, mosaic patterns, exposure, and saturation—resulting in a total of 13 000 training images, as shown in Figure 3.

**Figure 3**

*Training Images with Data Augmentation*



## Experimental Scenarios

Three experimental scenarios were designed to evaluate model performance using mAP, recall, and average inference time. Scenario 1 tests YOLOv8, which is optimized for real-time accuracy in low-resource environments. Scenario 2 uses YOLO-NAS, which applies neural architecture search to balance speed and precision. Scenario 3 evaluates RT-DETR, a transformer-based model leveraging attention mechanisms for complex scene understanding. These models span a range of modern detection strategies—convolutional, hybrid, and transformer-based—enabling a comprehensive and comparative analysis across various deployment contexts.

Training was performed on Google Colab in a graphics processing unit (GPU)-enabled environment, with datasets accessed directly via Google Drive. PyTorch was used for implementation and library management. After training, models were evaluated

on a local PC equipped with an NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti GPU, utilizing cuDNN to optimize performance. Learning rate scheduling was controlled using initial and final rates along with the total number of epochs, allowing dynamic adjustment throughout the training process.

## Deployment

The deployment follows the cloud-native architecture illustrated in Figure 3, designed to support scalable, efficient, and low-maintenance operation of the object detection system.

The first flow begins at the edge, where a camera-equipped device captures underwater images and sends them—along with an authentication token—to the cloud. These images are uploaded to cloud storage. Once stored, another serverless function is triggered to transfer and process the images. A load balancer distributes this workload to a pool of multi-instance servers, each hosting the trained detection model. These instances analyze the images in parallel and send the results to a message queue. The final outputs are handled by a storage service that writes the results into a structured database, including metadata and inference information.

The second flow handles the user-facing interface. Users interact with a web application hosted in the cloud. Requests are routed through a content delivery network (CDN) and an application programming interface (API) gateway for backend requests. The backend is managed by serverless functions. This design ensures low-latency access to results, even in low-bandwidth or edge environments. This separation of concerns ensures low latency for users by centralizing all computationally intensive tasks on the server.

## Assessment

This study evaluates object detection models—YOLO variants and RT-DETR—using three core metrics: mAP, recall, and average inference time. These metrics were selected to provide a balanced analysis of model accuracy, sensitivity, and practical deployment speed, particularly in the context of automatic waste detection.

Recall was chosen to assess the model's sensitivity, i.e., its ability to correctly detect all relevant objects. This is especially critical in waste detection tasks, where missing objects can negatively affect classification and sorting. Recall is defined mathematically as:

$$\text{Recall} = TP / (TP + FN) \quad (1)$$

Where:

TP = True positives (correctly detected objects)

FN = False negatives (missed objects)

mAP provides an overall measure of detection accuracy by combining both precision and recall across different IoU thresholds. The mAP formula is:

$$mAP = \sum_{q=1}^Q AveP(q) / Q \quad (2)$$

Where:

Q = Number of object queries

AveP(q) = Average precision for query q

Average inference time measures how long the model takes to process an image, which is essential for evaluating real-time performance in operational environments. This metric helps determine whether a model is suitable for time-sensitive applications.

Together, these three metrics offer a concise and representative framework to evaluate model performance in terms of detection accuracy, sensitivity, and processing efficiency.

## RESULTS

Initial experimentation highlighted the most salient comparative characteristics of the evaluated models.

**Table 3**

*Scenarios for Model Comparison*

Models	mAP50	mAP50-95	Re	IT	TT
YOLOv8 S	0.821	0.534	0.720	10.1*	3
YOLOv8 M	0.833	0.589	0.750	19.4*	5
YOLOv8 L	0.807	0.564	0.671	35*	13
YOLO-NAS S	0.735	0.668	0.967	2.04	3
YOLO-NAS M	0.736	0.681	0.856	3.14	4

*Note.* mAP50 = Mean average precision at an IoU threshold of 0.50; mAP50-95 = Mean average precision at IoU thresholds from 0.50 to 0.95; Re = Recall (sensitivity); IT = Inference time in milliseconds; TT = Training time in hours; inference time marked with an asterisk (\*) was measured using NVIDIA GeForce GTX 1660 Ti GPU.

Table 3 summarizes the performance of the YOLOv8 and YOLO-NAS models on the Trash-ICRA19 dataset. Among YOLOv8 variants, the M variant demonstrated the best overall performance, achieving an mAP50 of 0.833, an mAP50-95 of 0.589, a recall of 0.75, and an inference time of 19.4 ms, making it the most balanced choice for further tuning. The S variant followed, offering slightly lower accuracy (mAP50: 0.821) but faster inference (10.1 ms). In comparison, the L model had lower recall (0.671) and significantly higher inference time (35 ms), indicating less efficiency despite a modest mAP50-95 of 0.564. In contrast, the YOLO-NAS models excelled in recall, with the S variant achieving 0.967 and the M variant reaching 0.856. Although their mAP50 values (0.735 and 0.736, respectively) were lower than those of YOLOv8, their mAP50-95 scores were competitive. Additionally, both YOLO-NAS models required less training times, with the S and M variants completing training in 3 and 4 hours, respectively. These results suggest that YOLO-NAS, particularly the S variant, is a practical option under limited computational resources, offering strong recall and efficient training while maintaining reasonable detection accuracy.

**Table 4**

*Hyperparameter Refinement of YOLOv8 M*

P	F	Bat	Mo	Ep B	lr	Ep T	mAP50	mAP50-95	Re
-	0	32	Yes	100	0.001	100	0.833	0.589	0.75
P1	0	32	No	46	0.001	50	0.834	0.557	0.72
P2	5	48	Yes	11	0.001	50	0.866	0.626	0.728
P3	5	48	Yes	22	0.0005	50	0.888	0.633	0.808
P4	5	48	Yes	13	0.0001	30	0.906	0.627	0.828
P5	0	32	Yes	18	0.0001	30	0.922	0.644	0.829

Note. P = Test number; F = Number of frozen layers for transfer learning; Bat = Batch size; Mo = YOLO native data augmentation; Ep B = Best epoch; lr = Learning rate; Ep T = Total number of epochs; mAP50 = Mean average precision at an IoU threshold of 0.50; mAP50-95 = Mean average precision at IoU thresholds from 0.50 to 0.95; Re = Recall (sensitivity).

Table 4 presents the results of hyperparameter optimization for YOLOv8 M. Five tuning scenarios were tested. In P1, disabling native data augmentation resulted in performance drops (mAP50 = 0.834, mAP50-95 = 0.557, Re = 0.72), confirming the importance of YOLO's built-in augmentation. Transfer learning was explored by freezing different numbers of layers. Tests P2 through P4 revealed that freezing fewer layers and reducing the number of training epochs improved performance. In P5, further tuning of the learning rate and configuration achieved the best results: mAP50 = 0.922, mAP50-95 = 0.644, and Re = 0.829.

**Table 5**

*Hyperparameter Refinement of the YOLO-NAS S Model (30 Epochs)*

P	Bat	Mo	Ep B	lr	mAP50	Re
-	16	Yes	30	0.001	0.682	0.860
P1	16	Yes	28	0.001	0.713	0.916
P2	16	Yes	19	0.001	0.716	0.883
P3	16	Yes	15	0.0005	0.627	0.824
P4	16	Yes	8	0.0001	0.694	0.923
P5	16	Yes	4	0.0001	0.735	0.967
P6	16	Yes	4	0.0001	0.813	0.903

Note. P = Test number; Bat = Batch size; Mo = YOLO native data augmentation; Ep B = Best epoch; lr = Learning rate; mAP50 = Mean average precision at an IoU threshold of 0.50; Re = Recall (sensitivity).

Table 5 presents the results of hyperparameter tuning for the S variant of YOLO-NAS. The baseline model, trained for 30 epochs, achieved an mAP50 of 0.682 and a recall of 0.860. Adjustments to the optimizer (Adam), learning rate, and early stopping—particularly in scenarios P1 to P3—led to a notable increase in recall, reaching up to 0.923, while mAP values showed moderate variation. Between epochs 8 and 15, mAP remained relatively stable, with consistently high recall values. The best overall performance was recorded in P6, where the optimizer was changed to stochastic gradient descent (SGD) and the confidence threshold was set to 0.25. This configuration resulted in an mAP50 of 0.813 and a recall of 0.903.

**Table 6**

*Performance Metrics and Characteristics of Selected Detection Models*

Models	Parameters	Layers	mAP50	mAP50-95	Re	IT
YOLOv8 M	25 902 640	295	0.921	0.644	0.829	14.1
YOLOv8 L	43 691 520	365	0.915	0.650	0.813	19.2
YOLO-NAS S	19 053 888	685	0.813	-	0.903	17.8
RT-DETR L	32 970 476	673	0.887	0.589	0.819	15.9

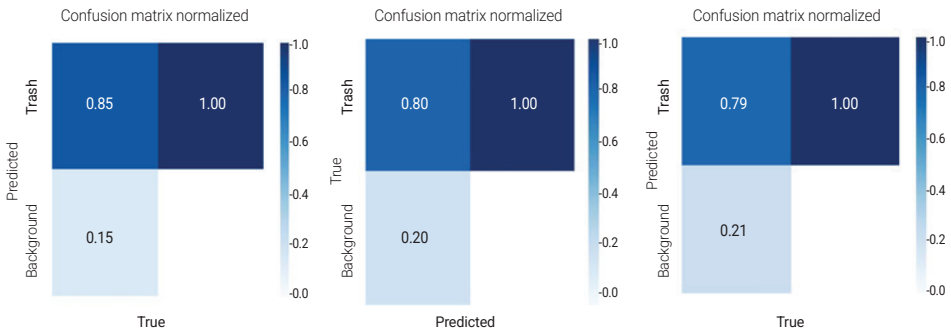
Note. mAP50 = Mean average precision at an IoU threshold of 0.50; mAP50-95 = Mean average precision at IoU thresholds from 0.50 to 0.95; Re = Recall (sensitivity); IT = Inference time in milliseconds.

Table 6 shows that the first scenario, where YOLOv8 M was used to classify and detect plastic waste, obtained an mAP50 of 0.921, an mAP50-95 of 0.644, a recall of 0.829, and an inference time of 14.1 milliseconds. In the second scenario, YOLO-NAS S reached an mAP50 of 0.813, a fairly high recall of 0.903, and an inference time of 17.8 milliseconds. In the third scenario, using RT-DETR L, the model achieved an mAP50 of

0.887, an mAP50-95 of 0.589, a recall of 0.819, and an average inference time of 15.9 milliseconds, slightly lower compared to YOLOv8 M.

**Figure 4**

*Standardized Confusion Matrices of the Models*

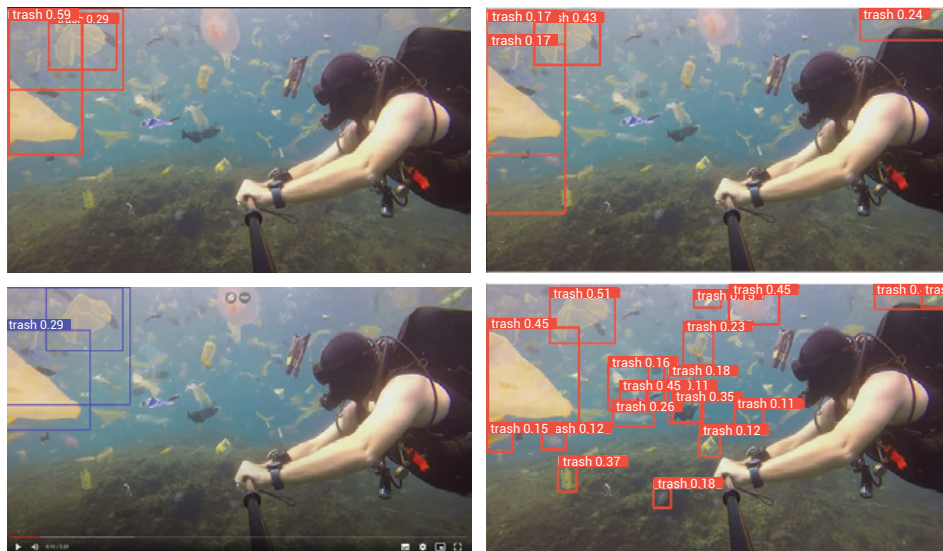


Note. The confusion matrix of YOLOv8 is shown on the left, YOLO-NAS in the center, and RT-DETR on the right.

Figure 4 presents the detection performance of the three evaluated models. For YOLOv8, 85 % of the total garbage instances were correctly identified as true positives, corresponding to 719 detections. The remaining 15 %, or 134 instances, were classified as false negatives, indicating that they were not detected as garbage despite belonging to the target class. Regarding the background class, YOLOv8 exhibited a 100 % false positive rate, with 81 background instances incorrectly identified as garbage. Similarly, YOLO-NAS correctly detected 80 % of garbage instances, while the remaining 20 % were false negatives, i.e., relevant objects were missing. As with YOLOv8, the background was entirely misclassified, resulting in a 100 % false positive rate and 81 incorrect detections. The RT-DETR confusion matrix showed a comparable trend. It correctly identified 79 % of garbage instances as true positives, while 21 % were false negatives. Like the other models, the background was completely misclassified, yielding a 100 % false positive rate.

**Figure 5**

*Model Inferences Across Scenarios*



Note. YOLOv8 M inference (top left), YOLOv8 L inference (top right), YOLO-NAS S inference (bottom left), and RT-DETR inference (bottom right).

Figure 5 illustrates the detections made by the models in a video that resembles a real-world environment. Notably, the training dataset consisted of underwater bottom trash images captured under very low illumination, unlike a video of a real-world environment with much higher illumination. Under these conditions, the RT-DETR model demonstrated superior performance in detecting small objects compared to the YOLOv8 and YOLO-NAS models.

## DISCUSSION

Data augmentation played a vital role in this study, particularly given the medium-sized dataset. It enhanced data diversity and improved the models' ability to generalize to unseen scenarios, thereby helping to mitigate overfitting. Model selection was guided by computational resources and model complexity. YOLO-NAS S was chosen for its training efficiency, while the M or L variants of other models were employed to balance performance with available resources. Traditional approaches such as dataset splitting and augmentation were prioritized due to hardware constraints. Although cross-validation can offer more robust evaluation, it was avoided due to the increased computational cost and the characteristics of the dataset.



During deployment, a key trade-off emerged between video resolution and detection speed. Higher resolutions reduced false positives by improving visual clarity but decreased processing speed (i.e., lower frames per second [FPS]). This trade-off is especially relevant in visually challenging environments, such as underwater scenes affected by sand or debris. These findings highlight the importance of image preprocessing and resolution tuning in real-world applications.

While precision was a critical evaluation metric, recall proved equally important. RT-DETR achieved the highest precision, but YOLO-NAS excelled in recall, ensuring broader object detection coverage. In applications like automatic waste detection or trash mapping, high precision is especially important: missing items such as bottles or hazardous waste can reduce sorting efficiency and pose environmental or safety risks. In such cases, detecting more objects—even at the cost of occasional false positives—is preferable. This study underscores the importance of balancing precision and recall based on task context, highlighting YOLO-NAS's strength in recall-focused scenarios.

These results are consistent with previous research. Terven and Córdova-Esparza (2023) highlighted YOLO's ability to extract key features such as edges and textures—findings that are validated in this study. Additionally, ViT models performed well under visual noise, leveraging attention mechanisms for contextual recognition. This supports findings of Maurício et al. (2023), underscoring ViT's robustness in degraded conditions and its value in challenging environments.

## CONCLUSIONS

This research successfully achieved its initial objectives. Beyond acquiring the expected knowledge, the study yielded meaningful conclusions regarding the comparative performance of the evaluated models. Training various models with the Trash-ICRA19 dataset broadened our understanding of deep learning workflows, including critical concepts such as epochs, loss functions, and evaluation metrics. A thorough analysis of each model's architecture further enhanced our comprehension of their functionality from training to real-world deployment.

Among the models tested, RT-DETR demonstrated the most promising performance in practical scenarios. Although it did not achieve the highest validation scores on the dataset, its superior real-world performance underscores the importance of evaluating models in real environments, where traditional metrics may not fully capture practical effectiveness.

To address the limitations posed by resource-constrained environments, this study proposed offloading the recognition logic to a powerful cloud or edge server. While this approach introduces potential latency due to data transmission, it allows

the use of more complex and accurate models that would otherwise be infeasible on low-power devices.

In conclusion, RT-DETR proves to be a reliable starting point for underwater waste detection, especially in identifying garbage bags. Its successful deployment in real-world scenarios—such as the beaches of Bali—demonstrates its potential for integration into ROVs. These systems could be used to detect and map plastic waste accumulation zones, thereby contributing to more efficient and targeted environmental cleanup efforts.

## FUTURE RESEARCH

Several enhancements are recommended for future research. First, increasing the resolution of input images may improve object detection accuracy. Incorporating a classification component would further enhance system capabilities to identify specific waste types, such as garbage bags, wrappers, or bottles. Additionally, using a new or more diverse dataset—ideally one tailored to underwater conditions—would support better model robustness and generalization.

Another key area for improvement is the reduction of transmission delays. This could be achieved by initially lowering image resolution to enable faster transmission and then applying a super-resolution algorithm on the server to enhance image quality before feeding it into the detection model. In this way, computational load is entirely offloaded to high-performance servers, optimizing both speed and accuracy.

## REFERENCES

- Casas, E., Ramos, L., Bendek, E., & Rivas-Echeverría, F. (2023). Assessing the effectiveness of YOLO architectures for smoke and wildfire detection. *IEEE Access*, *11*, 96554–96583. <https://doi.org/10.1109/access.2023.3312217>
- Conley, G., Zinn, S. C., Hanson, T., McDonald, K., Beck, N., & Wen, H. (2022). Using a deep learning model to quantify trash accumulation for cleaner urban stormwater. *Computers, Environment and Urban Systems*, *93*, Article 101752. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2021.101752>
- Deng, H., Ergu, D., Liu, F., Ma, B., & Cai, Y. (2021). An embeddable algorithm for automatic garbage detection based on complex marine environment. *Sensors*, *21*(19), Article 6391. <https://doi.org/10.3390/s21196391>
- Dhana Lakshmi, M., & Santhanam, S. M. (2020). Underwater image recognition detector using deep ConvNet. 2020 National Conference on Communications (NCC), Kharagpur, India, pp. 1–6. <http://doi.org/10.1109/NCC48643.2020.9056058>

- Fulton, M., Hong, J., Islam, M. J., & Sattar, J. (2019). Robotic detection of marine litter using deep visual detection models. *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Montreal, QC, Canada, pp. 5752–5758. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793975>
- Han, F., Yao, J., Zhu, H., & Wang, C. (2020). Underwater image processing and object detection based on deep CNN method. *Journal of Sensors*, 2020, Article 6707328, 1–20. <https://doi.org/10.1155/2020/6707328>
- Hong, J., Fulton, M., & Sattar, J. (2020). Trashcan: A semantically-segmented dataset towards visual detection of marine debris. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.08097>
- Kavitha, P. M., Anitha, M., Padhiari, S., & Anitha, K. (2022). Detection of trash in sea using deep learning. *YMER Digital*, 21(7), 817–822. <https://doi.org/10.37896/ymer21.07/65>
- Li, Y., Fan, Q., Huang, H., Han, Z., & Gu, Q. (2023). A modified YOLOv8 detection network for UAV aerial image recognition. *Drones*, 7(5), Article 304. <https://doi.org/10.3390/drones7050304>
- Maurício, J., Domingues, I., & Bernardino, J. (2023). Comparing vision transformers and convolutional neural networks for image classification: A literature review. *Applied Sciences*, 13(9), Article 5521. <https://doi.org/10.3390/app13095521>
- Moorton, Z., Kurt, Z., & Woo, W. L. (2022). Is the use of deep learning an appropriate means to locate debris in the ocean without harming aquatic wildlife? *Marine Pollution Bulletin*, 118, Article 113853. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113853>
- Muksit, A. A., Hasan, F., Hasan Bhuiyan Emon, M. F., Haque, M. R., Anwary, A. R., & Shatabda, S. (2022). YOLO-Fish: A robust fish detection model to detect fish in realistic underwater environment. *Ecological Informatics*, 72, Article 101847. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2022.101847>
- National Institute of Statistics and Informatics. (2022). *Technical report: Environmental statistics for January 2022*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/3067334/Estad%C3%ADsticas%20Ambientales%3A%20Enero%202022.pdf?v=1651873783>
- Panwar, H., Gupta, P. K., Siddiqui, M. K., Morales-Menendez, R., Bhardwaj, P., Sharma, S., & Sarker, I. H. (2020). AquaVision: Automating the detection of waste in water bodies using deep transfer learning. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2, Article 100026. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2020.100026>
- Reis, D., Kupec, J., Hong, J., & Daoudi, A. (2023). *Real-time flying object detection with YOLOv8*. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.09972>

- Rizos, P., & Kalogeraki, V. (2021). Deep learning for underwater object detection. *Proceedings of the 24th Pan-Hellenic Conference on Informatics (PCI '20)*, New York, USA, pp. 175–177. <https://doi.org/10.1145/3437120.3437301>
- Teng, X., Fei, Y., He, K., & Lu, L. (2022). The object detection of underwater garbage with an improved YOLOv5 algorithm. *Proceedings of the 2022 International Conference on Pattern Recognition and Intelligent Systems (PRIS '22)*, New York, USA, pp. 55–60. <https://doi.org/10.1145/3549179.3549189>
- Terven, J., & Córdova-Esparza, D. M. (2023). A comprehensive review of YOLO architectures in computer vision: From YOLOv1 to YOLOv8 and YOLONAS. *Machine Learning and Knowledge Extraction*, 5(4), 1680–1716. <https://doi.org/10.3390/make5040083>
- Uparkar, O., Bharti, J., Pateriya, R. K., Gupta, R. K., & Sharma, A. (2023). Vision transformer outperforms deep convolutional neural network-based model in classifying X-ray images. *Procedia Computer Science*, 218, 2338–2349. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.209>
- Wu, Y.-C., Shih, P.-Y., Chen, L.-P., Wang, C.-C., & Samani, H. (2020). Towards underwater sustainability using ROV equipped with deep learning system. *2020 International Automatic Control Conference (CACCS)*, Hsinchu, Taiwan, pp. 1–5. <http://doi.org/10.1109/CACCS50047.2020.9289788>
- Xue, B., Huang, B., Wei, W., Chen, G., Li, H., Zhao, N., & Zhan, H. (2021a). An efficient deep-sea debris detection method using deep neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 12348–12360. <http://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3130238>
- Xue, B., Huang, B., Chen, G., Li, H., & Wei, W. (2021b). Deep-sea debris identification using deep convolutional neural networks. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 8909–8921 <http://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3107853>
- Zhao, Y., Lv, W., Xu, S., Wei, J., Wang, G., Dang, Q., Liu, Y., & Chen, J. (2023). DETRs beat YOLOs on real-time object detection. *arXiv*, 2304.08069. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2304.08069>
- Zhou, H., Huang, H., Yang, X., Zhang, L., & Qi, L. (2017). Faster R-CNN for marine organism detection and recognition using data augmentation. *Proceedings of the International Conference on Video and Image Processing - ICVIP 2017*. <https://doi.org/10.1145/3177404.3177433>

# EL ÁRBOL DE CIBERSEGURIDAD: UNA PROPUESTA DE FORMACIÓN AL CIUDADANO, A LAS INSTITUCIONES Y A LA SOCIEDAD

OLDA BUSTILLOS ORTEGA

<https://orcid.org/0000-0003-2822-3428>

obustillos@uia.ac.cr

Escuela de Ingeniería Informática, Universidad Internacional de las Américas,  
Costa Rica

JORGE MURILLO GAMBOA

<https://orcid.org/0000-0001-5548-8283>

jmurillo@uia.ac.cr

Escuela de Ingeniería Informática, Universidad Internacional de las Américas,  
Costa Rica

DANIEL MENA BOCKER

<https://orcid.org/0009-0002-1062-6675>

dfmenab@edu.uia.ac.cr

Escuela de Ingeniería Informática, Universidad Internacional de las Américas,  
Costa Rica

CARLOS DE LA O FONSECA

<https://orcid.org/0009-0002-3413-4990>

cedelaof@uia.ac.cr

Escuela de Ingeniería Informática, Universidad Internacional de las Américas,  
Costa Rica

Recibido: 23 de mayo del 2025 / Aceptado: 8 de junio del 2025

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.7986>

**RESUMEN.** En un mundo cada vez más interconectado, la ciberseguridad se ha convertido en un pilar fundamental para proteger la información crítica y garantizar la privacidad de las personas, las instituciones y la sociedad en general. El aumento de ciberamenazas, tales como accesos no autorizados, inyecciones de código malicioso y ataques a sistemas críticos, subraya la necesidad de un enfoque integral para la seguridad digital. Este estudio se basa en definiciones y directrices del estándar en ciberseguridad ISO/IEC 27032:2023, la guía curricular ACM/IEEE CSEC2017 y el cuerpo de conocimiento de TI empresarial IEEE-CS (EITBOK). En relación con ello, se plantea el modelo del árbol de la ciberseguridad como propuesta formativa integral destinada a fortalecer

las competencias en el ámbito de seguridad de la información. La analogía del árbol proporciona un marco conceptual que distribuye herramientas estratégicas en sus componentes: follaje, tronco y raíces. Este enfoque permite enfrentar los desafíos de un entorno cibernético en constante evolución, lo que optimiza los procesos de identificación, prevención y mitigación de ciberamenazas, y contribuye simultáneamente al fortalecimiento de una sociedad digital resiliente y segura.

PALABRAS CLAVE: árbol / ciberseguridad / ciberamenaza / formación / seguridad

## THE CYBERSECURITY TREE: A TRAINING PROPOSAL FOR CITIZENS, INSTITUTIONS, AND SOCIETY

ABSTRACT. The cybersecurity tree: a training proposal for citizens, institutions, and society in an increasingly interconnected world, cybersecurity has become a fundamental pillar for protecting critical information and ensuring the privacy of individuals, institutions, and society at large. The increase in cyberthreats, such as unauthorized access, malicious code injections, and attacks on critical systems, underscores the need for a comprehensive approach to digital security. This study is based on definitions and guidelines from the ISO/IEC 27032 cybersecurity standard, the ACM/IEEE CSEC2017 curriculum guide, and the IEEE-CS Enterprise IT Body of Knowledge (EITBOK). The "Cybersecurity Tree" model is proposed as a comprehensive training proposal aimed at strengthening information security competencies. The tree analogy provides a conceptual framework that distributes strategic tools across its components: foliage, trunk, and roots. The tree analogy provides a conceptual framework that distributes strategic tools across its components: foliage, trunk, and roots. This approach allows us to address the challenges of a constantly evolving cyber environment, optimizing processes for identifying, preventing, and mitigating cyberthreats, while simultaneously contributing to strengthening a resilient and secure digital society.

KEYWORDS: cybersecurity / cyberthreat / security / training / tree

## INTRODUCCIÓN

### Orígenes de internet y del ciberespacio

Internet se puede entender como un sistema global de redes digitales interconectadas de dominio público que conecta miles de millones de servidores, computadoras y otros dispositivos. Esto facilita el intercambio de información, eficiente y accesible (International Organization for Standardization [ISO], 2023).

En la década de 1960, se desarrollaron los protocolos TCP (*transmission control protocol*) e IP (*internet protocol*), con los que surgió la red internet. En los años 80, la comunicación vía satélite transformó la radiotelevisión y aparecieron nuevos retos de una comunidad digital con un exceso de información (De-Moragas, 2012). Hasta finales de dicha década, la informática se limitaba a operadores especializados y computadoras ubicadas en centros de procesamiento cerrados, conocidos como casas de cristal, a los que el personal general no tenía acceso (What is the Enterprise IT BOK?, 2017).

Luego, en 1990, se desarrolló la World Wide Web (WWW), lo que permitió acceder a la red informática mundial. Junto con ello, se creó el protocolo de transferencia de hipertexto (*hypertext transfer protocol*, HTTP) para la vinculación y acceso a información. La navegación libre se realizó mediante el localizador uniforme de recursos (*uniform resource locator*, URL) y la creación de enlaces a páginas web (Tim Berners-Lee, 2025).

Ya para el 2000, internet —o la WWW junto con el protocolo TCP/IP— se constituyó como la infraestructura ideal para la publicación y difusión de información que permitió el intercambio de información y la interacción en el ciberespacio (Pinheiro, 2000). A partir de ello, surgieron los motores de búsqueda Yahoo! y Lycos para facilitar la exploración y recuperación de información a través del uso de directorios donde se catalogaba la información según las descripciones proporcionadas por las páginas WWW. Luego, aparecieron los navegadores Google y Altavista, cuya búsqueda de información se apoyaba en palabras clave (Manuel et al., 2006).

Para el 2004, surgen las redes sociales Twitter, Facebook y YouTube, lo que ocasionó cambios que aceleraron el uso del ciberespacio en toda la población (De-Moragas, 2012). Casi diez años después, en el 2016, la Autoridad de Conducta Financiera del Reino Unido aportó un entorno regulatorio del ciberespacio y la gobernanza de internet como una herramienta estratégica para fomentar la participación multidisciplinaria y la colaboración entre distintos actores. Desde entonces, fueron adoptados por reguladores de sectores, tales como finanzas, salud, telecomunicaciones y protección de datos, incluyendo el ámbito de la inteligencia artificial (Moraes, 2024).

A partir del 2020, se incrementó la adopción de tecnologías de seguridad cibernética con una tasa promedio de reconocimiento de riesgos de más del 80 % para

violaciones de datos, *malware*, acceso no autorizado y ataques a la red de diferentes números de usuarios (Zhou et al., 2024). El fácil acceso a recursos de salud en línea, incluidos los generados por grandes modelos de lenguaje (*large language models*, LLM), ha cambiado significativamente la manera en que las personas buscan información relacionada sobre salud y prácticas de autocuidado. En países de ingresos bajos y medios, el 35 % de los adultos utilizan internet para estos fines, favorecidos por el creciente acceso a dispositivos digitales y la expansión del acceso a internet (Clark et al., 2024).

### Definiendo la ciberseguridad

La ciberseguridad es una disciplina de las ciencias de la computación que combina aspectos tecnológicos, humanos, informativos y procedimentales para asegurar el funcionamiento de sistemas informáticos. Comprende la creación, operación, análisis y evaluación de dichos sistemas y orienta el diseño de programas de formación (Joint Task Force on Cybersecurity Education, 2017, p. 16).

En el 2013, la Unión Europea (UE) publicó una normativa sobre ciberseguridad y, en agosto del 2015, propuso una ley para establecer requisitos de seguridad a los proveedores de servicios de internet y empresas web (What is the Enterprise IT BOK?, 2017, sección 4.2). Ese mismo mes, la Association for Computing Machinery (ACM), en colaboración con IEEE Computer Society (IEEE-CS) y otras sociedades informáticas, constituyeron el grupo de trabajo sobre educación en ciberseguridad Joint Task Force on Cybersecurity Education<sup>1</sup>. El propósito fue desarrollar una guía curricular completa sobre ciberseguridad que se publicó a finales del 2017 bajo el nombre de *Cybersecurity Curricula 2017* (CSEC 2017).

Por su parte, Ballesteros (2020) considera que la ciberseguridad posee la capacidad de resistir acciones que comprometan la disponibilidad, autenticidad, integridad o confidencialidad de los datos y servicios. Incluye los términos *ciberdelincuencia*, *ciberterrorismo*, *ciberataque* y *ciberdefensa* (Ballesteros, 2020, p. 40). En tal sentido, Cano (2020, p. 2) identificó cinco áreas clave que generan un impacto transversal en el ámbito de la ciberseguridad, las cuales parten de la pregunta: ¿quién puede provocar los diferentes tipos de ciberdelitos? Sobre ello, Ballesteros (2020, pp. 40-41) ha clasificado los tipos de agentes capaces de provocar incidencias y problemas de ciberseguridad de la siguiente manera:

- agentes naturales: sin intencionalidad ni motivación, por ejemplo, un desastre natural
- agentes de perfil bajo: individuos aislados o poco organizados

---

<sup>1</sup> Con aporte de las sociedades ACM, IEEE, AIS SIGSEC, IFIP.



- cibercriminales: organizaciones mafiosas o de crimen organizado
- ciberterroristas: organizaciones terroristas en acciones de propaganda y atentados
- ciberactivistas: grupos antisistemas y de extremismo radical, político o ideológico
- Estados: cuando los Gobiernos extienden conflictos físicos al ámbito virtual, campañas de desprestigio, intromisión en procesos electorales hasta acciones como la ciberguerra

El estándar ISO/IEC 2732 (2023) propone dos definiciones:

- Seguridad en internet: busca preservar la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información a través de la red.
- Ciberseguridad: protege a las personas, sociedades, organizaciones y naciones contra riesgos cibernéticos, con el objetivo de mantener estos riesgos en un nivel tolerable.

### *Educación y normativas sobre ciberseguridad*

La guía curricular CSEC 2017 (Joint Task Force on Cybersecurity Education, 2017) plantea que el mundo ha enfrentado una escasez de profesionales cualificados en ciberseguridad y que, para el año 2022, ya existía una demanda inmediata y creciente de 1,8 millones de puestos vacantes en este campo. Por ello, se ha considerado fundamental que los diseñadores de cursos, talleres y planes curriculares académicos identifiquen e interactúen con expertos y proveedores de capacitación especializados a fin de explorar oportunidades de colaboración que potencien la calidad y pertinencia de los contenidos formativos en ciberseguridad (Joint Task Force on Cybersecurity Education, 2017; What is the Enterprise IT BOK?, 2017).

De acuerdo con Carrillo et al. (2019), el aumento de ciberataques ha creado una necesidad urgente de fortalecer la ciberseguridad como una especialidad académica. En tal sentido, es fundamental priorizar la inversión en docencia y desarrollo humano por encima de la tecnología (*software*, *hardware* y comunicaciones). Entonces, se hace relevante educar, capacitar y sensibilizar a todos los actores involucrados en la ciberseguridad, con el fin de garantizar la estabilidad de las organizaciones e instituciones.

La formación en ciberseguridad está emergiendo como una disciplina bien definida, con un alcance amplio y profundo que abarca diversos subcampos del ecosistema informático moderno, como el desarrollo de *software*, las redes y la gestión de bases de datos. La ciberseguridad o seguridad informática viene a proteger tanto la infraestructura computacional como los activos de la organización y la información de

los usuarios contra los riesgos del entorno digital, el cual es uno de los recursos más importantes a resguardar (Valencia-Arias et al., 2020).

Por ello, elaborar una estrategia nacional de ciberseguridad enfrenta desafíos, como una definición ambigua, falta de coordinación entre el sector privado y el Gobierno, así como una educación insuficiente para preparar a los profesionales necesarios (Arreola García, 2019). De acuerdo con la Unesco (2024), las autoridades educativas deben actualizar las funciones del docente con las competencias necesarias, reforzar la formación docente y desarrollar programas de capacitación para preparar a los maestros en el uso y manejo de inteligencia artificial (IA) y ciberseguridad para garantizar un enfoque seguro y ético.

## OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

El objetivo de este estudio es presentar el modelo del árbol de la ciberseguridad como una propuesta educativa dirigida a ciudadanos, instituciones y a la sociedad en general, con el fin de exponer la importancia de la confidencialidad, integridad y disponibilidad de la información. Cabe resaltar que no se llevó a cabo ninguna prueba de campo ni se aplicó o validó el modelo dentro del campo laboral de ninguna industria.

Los objetivos específicos de esta propuesta son los siguientes:

1. Analizar la estructura y funcionamiento del árbol identificando sus componentes (follaje, tronco y raíz).
2. Comparar el árbol con la disciplina de la ciberseguridad, es decir, analizar su estructura de capas y relacionarla con ciberamenazas, y su ubicación con el árbol.
3. Identificar iniciativas académicas aplicadas a la protección y presentación segura de los datos ubicando temas de formación en las tres áreas (follaje, tronco, raíz).

## METODOLOGÍA

Para este estudio se realizaron investigaciones sobre estándares ISO y guías curriculares, y cuerpos de conocimiento de las sociedades de computación IEEE CS y ACM, además de artículos sobre educación en ciberseguridad y ciberamenazas. Se excluyeron de esta investigación los temas relacionados con seguridad social, legal o cualquier otro tema distinto a seguridad de la información en la red internet.

1. Revisión de literatura (análisis de documentos): se realizó una revisión de literatura utilizando los criterios de búsqueda en temas sobre ciberseguridad, amenazas cibernéticas y sus impactos en diversos sectores. Se accedieron

a diferentes bases de datos, tales como Google Académico, ProQuest Digital Dissertation and Theses, IEEE Xplore y Academia.edu.

2. Análisis comparativo: los hallazgos obtenidos sobre ciberseguridad y ciberamenazas fueron analizados con apoyo de figuras y cuadros comparativos. La analogía del árbol permitió la definición y comprensión de la ciberseguridad como herramienta orientadora. Finalmente, se abordaron aspectos relacionados con la formación en ciberseguridad y recomendaciones para guías curriculares.

El modelo del árbol de la ciberseguridad se justifica metodológicamente como una herramienta conceptual destinada a guiar la formación integral en esta disciplina. Ayuda a respaldar la inversión en recursos sobre seguridad de la información y facilita el análisis de riesgos y la gestión de sistemas y servicios seguros. Al integrar estos componentes, no solo se busca fortalecer las capacidades técnicas de individuos e instituciones, sino también promover una cultura de ciberseguridad a nivel general, con énfasis en la resiliencia y sostenibilidad en un entorno digital expuesto a constantes ciberamenazas.

## ANALIZANDO LA CIBERSEGURIDAD

### El auge de la ciberseguridad

La necesidad de ciberseguridad surgió con el desarrollo de las primeras computadoras centrales de las instituciones públicas y universidades, en las que las redes de computadoras eran utilizadas por docentes y alumnos para investigación y para el envío de correos electrónicos y archivos. Entonces, para proteger estos dispositivos y misiones, se implementaron múltiples niveles de seguridad.

La seguridad informática, que trascendía la mera protección física de los dispositivos de cómputo, tuvo un punto de partida significativo con la publicación de un informe en febrero de 1970 para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, denominado Informe RAND R-609. Este buscó definir los diversos controles y mecanismos esenciales para garantizar la protección de los sistemas de procesamiento de datos computarizados (Joint Task Force on Cybersecurity Education, 2017).

Entre 1980 y 2000, la red de internet se incrementó exponencialmente y conectó a millones de dispositivos. Esto generó que la seguridad de la información dependiera de la concienciación de individuos y organizaciones que se enfrentaban a filtraciones de datos, ataques cibernéticos, vulneraciones en protocolos y sistemas de seguridad, tanto del sector privado como del público (Ganesan et al., 2016; Von Solms & Van Niekerk, 2013).

A partir del año 2000, la computación en la nube (*cloud computing*) vino a establecerse como un recurso esencial, al estilo *commodity*. Sin embargo, cada vez que un

usuario subía datos a la nube, perdía el control sobre ellos, lo quiera o no. Esto planteó desafíos en materia de seguridad y privacidad (Garrison & Nova, 2017).

En la década del 2010, surgió la propuesta del agente de seguridad para el acceso a la nube (*cloud access security broker*, CASB), con el propósito de garantizar la protección tanto de la información como de los usuarios (Mendoza, 2014). En una encuesta del 2024, aplicada por la empresa PurpleSec (2025), sobre seguridad de la información, más del 50 % de todos los ciberataques se dirigen a pequeñas y medianas empresas (pymes), y más del 66 % de estas reportaron al menos un incidente entre 2018 y 2020. En el caso de las grandes empresas, se registra un promedio anual de ciento treinta brechas de seguridad por organización, con un preocupante aumento del 27,4 % en la cantidad de incidentes año tras año. A nivel individual, aproximadamente 71,1 millones de personas son víctimas de ciberdelitos cada año, lo que evidencia la creciente magnitud y alcance de las amenazas digitales en todos los niveles.

Para el 2020, Nigeria y Sudáfrica reportaron ocho millones de ataques de *malware* en sus aplicaciones y se detectaron ciento dos millones de programas potencialmente no deseados. Además, las notificaciones falsas sobre servicios de correo electrónico se convirtieron en métodos comúnmente utilizados por personas malintencionadas con el propósito de recopilar nombres de usuario y contraseñas (Okonkwo & Udo, 2022).

Por otro lado, el crecimiento acelerado de los dispositivos de internet de las cosas (IoT) ha llamado la atención de los cibercriminales —como cámaras domésticas conectadas a internet—, lo que pone de manifiesto la urgencia de reforzar los mecanismos de protección de estos dispositivos (Morales Suárez et al., 2019). Otro caso es sobre robo de fondos bancarios con un deterioro significativo de la imagen corporativa de las entidades involucradas (González et al., 2020). Por ejemplo, en los Gobiernos, el aumento de los ciberataques ha generado una creciente preocupación sobre la posible participación de los Estados nación en una guerra cibernética. Esto ha ocasionado que los sistemas de información se volvieran aún más vulnerables, enfrentando el riesgo de ser víctimas del cibercrimen y de las ciberamenazas sin contar con las medidas de protección adecuadas (Joint Task Force on Cybersecurity Education, 2017, pp. 16-17).

De acuerdo con Mayle (2018), los autores de ataques cibernéticos suelen ocultar la identidad y el origen de su ubicación. Individuos y grupos operan en el ciberespacio sin respetar fronteras y, en los últimos años, los ataques contra las infraestructuras de información se han vuelto más frecuentes y complejos, y los perpetradores son cada vez más profesionales. El número de incidentes que afectan la ciberseguridad sigue en aumento, lo que pone en riesgo la información, la red, la seguridad de los usuarios y la de los Gobiernos. Las amenazas provienen principalmente de dos categorías: operaciones de ciberguerra y actividades del cibercrimen (Arreola García, 2019).

## **Impacto económico del cibercrimen**

La actividad delictiva en internet es mucho más amplia que solo el cibercrimen, ya que prácticamente todos los elementos de la actividad delictiva humana se han trasladado al ciberespacio. Un alto funcionario británico informó que la mitad de todos los delitos denunciados en el Reino Unido están relacionados con el cibercrimen (Lewis, 2018, p 6).

En el 2014, un estudio del Center for Strategic and International Studies (CSIS) de Washington D. C. estimó que el cibercrimen le cuesta a la economía mundial aproximadamente 500 000 millones de dólares, lo que representa cerca del 0,7 % del ingreso global. Esta cifra supera los ingresos nacionales de muchos de los países, lo que demuestra que el cibercrimen es una actividad altamente lucrativa. Unos años después, la estimación del cibercrimen ascendía a 600 000 millones de dólares, un 0,8 % del PBI mundial (Lewis, 2018). De igual manera, de acuerdo con Moreno González (2019), en América Latina, el costo del cibercrimen al 2019 osciló entre los 15 000 y 30 000 millones de dólares.

De acuerdo con un estudio de Fernando Ballester (2020), existen dos tipos de empresas: aquellas que han sido víctimas de un ataque informático en el último año y aquellas que aún no son conscientes de haberlo sufrido. Los ciberdelincuentes se aprovechan del incremento del teletrabajo, el auge del comercio electrónico y el envío masivo de mensajes, donde muchas instituciones y organizaciones carecen de sistemas de protección adecuados (Ballester, 2020).

Ante el incremento de ciberamenazas y ciberataques en las últimas décadas, los Gobiernos y las instituciones académicas deben responder ampliando la oferta de programas educativos e integrando la ciberseguridad en los marcos curriculares. La ciberseguridad es un campo emergente y las instituciones académicas ya están creando diversos programas educativos para satisfacer la demanda de profesionales calificados (Joint Task Force on Cybersecurity Education, 2017, pp. 16-18).

## **La formación en ciberseguridad**

La incorporación de los principios fundamentales de la ciberseguridad debe establecerse desde las fases iniciales de cualquier plan de estudios especializado con el propósito de dotar de un marco conceptual sólido que facilite la comprensión de la terminología esencial, el entorno de las ciberamenazas, las vulnerabilidades y los principios de la seguridad de la información. En esa línea, la educación es fundamental, pero debe actualizarse para acceder a material educativo de manera segura. Los estudiantes deberían aprender principios y buenas prácticas de ciberseguridad en las escuelas del futuro (De-Moragas, 2012).

Un análisis de artículos publicados reveló que la seguridad de la red y la protección de los datos se posicionaron como los temas más críticos para el sector público y

el privado (Cano, 2011). De acuerdo con Valencia-Arias (et al., 2020), la mayor cantidad de publicaciones sobre ciberseguridad se agrupan en dos áreas principales:

- la seguridad de la red (*network security*) que asegura la estructura del sistema
- la seguridad de los datos (*security of data*) que protege la información crítica

Esto es un indicador de que la educación en ciberseguridad es cada vez un tema más relevante, pues impulsa avances en desarrollos e investigaciones en ambas áreas. En la Figura 1, se brinda un insumo clave para la definición de áreas temáticas a ser incorporadas en programas académicos sobre formación en ciberseguridad.

Figura 1

Temas de investigación sobre ciberseguridad



Nota. Adaptado de "Tendencias investigativas en educación en ciberseguridad: un estudio bibliométrico", por A. Valencia-Arias, M. C. Bermeo Giraldo, Y. Acevedo-Correa, L. F. Garcés-Giraldo, J. Quiroz-Fabra, M. L. Benjumea-Arias & J. Patiño-Vanegas, 2020, *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, (E29), p. 236.

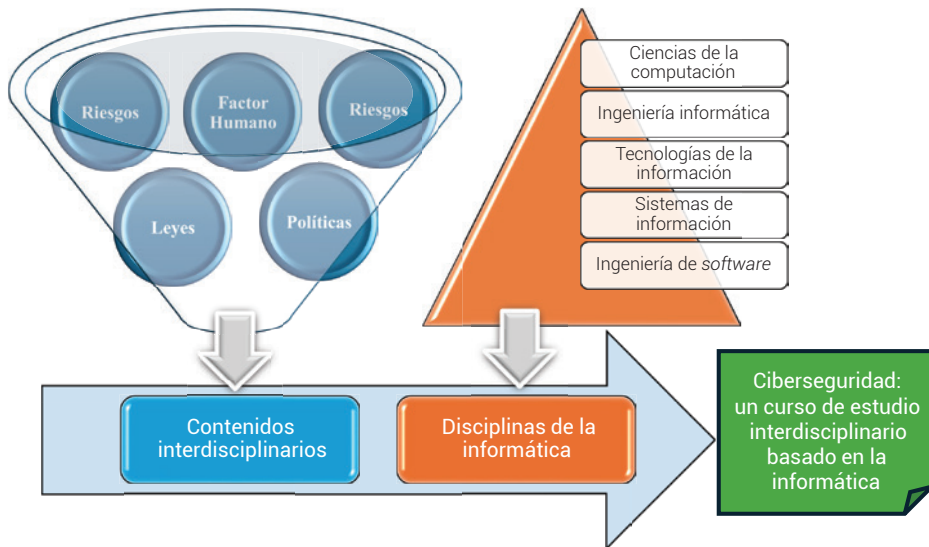
En la Figura 1, se comparan los periodos 2014 y 2016 al mostrar la tendencia creciente en todos los temas en ambos periodos. Sin embargo, se resaltan los dos primeros resultados (seguridad de la red y de los datos) como consideraciones relevantes que reflejan temas clave a tomar en cuenta a la hora de planificar nuevos cursos o talleres sobre ciberseguridad. En este contexto, la ciberseguridad y la ciberdefensa adquieren una relevancia significativa, pues es esencial gestionar los ataques cibernéticos o cibercrímenes (Cano, 2008).

También las organizaciones IEEE y ACM, con su guía CSEC 2017, ampliaron la iniciativa educativa con recomendaciones sobre un currículo académico en ciberseguridad. La propuesta (Figura 2) interrelaciona las cinco disciplinas y constituyen la

base estructural de un programa completo sobre ciberseguridad (Joint Task Force on Cybersecurity Education, 2017, p. 18).

**Figura 2**

*Estructura de la disciplina de ciberseguridad según el CSEC 2017*



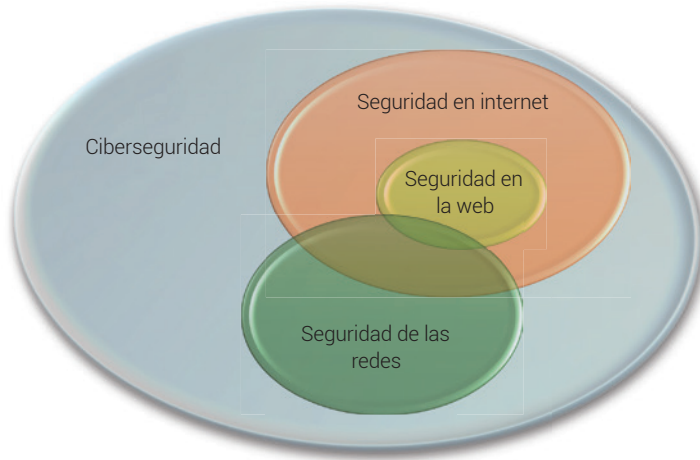
*Nota.* Adaptado de *Cybersecurity Curricula 2017*, por Joint Task Force on Cybersecurity Education, 2017, Association for Computing Machinery, IEEE Computer Security, Association for Information Systems Special Interest Group on Information Security and Privacy, International Federation for Information Processing Technical Committee on Information Security Education, p. 18 (<https://doi.org/10.1145/3184594>).

En la Figura 2, se propone una mezcla de contenidos interdisciplinarios con elementos de las cinco disciplinas de la computación. Este es un enfoque holístico determinante para el diseño de un currículo interdisciplinario con un enfoque en ciberseguridad (Joint Task Force on Cybersecurity Education, 2017).

Adicionalmente, el estándar ISO/IEC 27032 (ISO, 2023) ofrece otro aspecto relevante sobre la formación en el tema de ciberseguridad, como el análisis de su interacción e impacto, desde la perspectiva de la seguridad en la red internet, la web y la seguridad en las redes empresariales. En la Figura 3, se ilustran estas interrelaciones como parte del dominio de la ciberseguridad.

### Figura 3

*Relaciones entre seguridad en internet, web, redes y ciberseguridad*



Nota. Adaptado de ISO/IEC 27032:2023. *Cybersecurity—Guidelines for Internet Security*, por International Organization for Standardization, 2023, p. 12 (<https://www.iso.org/standard/76070.html>).

De acuerdo con la Figura 3, cada dispositivo se conecta con otro y se crea un entorno propicio para el intercambio de información. La seguridad abarca exhaustivamente todos los tipos de interrelaciones presentes en una organización, incluyendo acceso desde redes de área local (LAN), redes de área amplia (WAN), redes de área personal (PAN) y redes inalámbricas (WLAN). Todas ellas requieren de una gestión en ciberseguridad (ISO, 2023).

Por lo anterior, es relevante mencionar que existe el riesgo de experimentar un gasto significativo en adquirir tecnología para la ciberseguridad, en lugar de invertir en docencia y desarrollo de la capacidad humana, así como la necesidad de fortalecer las instituciones de formación y crear programas adecuados para gestionar la ciberseguridad de manera eficaz y ética. Entonces, cabe recordar que el propósito final de la formación de profesionales en las diferentes áreas de seguridad es la de reducir los riesgos relacionados con el uso de internet para las organizaciones, empresas, usuarios y ciudadanos, con el fin de garantizar la disponibilidad y la fiabilidad de los servicios ofrecidos a través de esta plataforma (ISO, 2023).

De acuerdo con "What is the Enterprise IT BOK?" (2017), la formación en seguridad no debe restringirse exclusivamente al personal encargado del diseño, implementación y supervisión de los sistemas de protección, sino que debe abarcar a todo el personal de la organización. Una parte considerable de las brechas de seguridad se origina en acciones realizadas por los propios empleados. Las amenazas a la seguridad no pueden



ser neutralizadas completamente mediante soluciones tecnológicas —como *software* o *hardware*—, por lo que resulta fundamental incorporar estrategias orientadas a la gestión y formación del factor humano. La formación del equipo de ciberseguridad debe ser la más exhaustiva y de carácter continuo, así como los programas de capacitación. Además, deben incluir a todos los niveles del personal de puestos operativos, procesos y procedimientos de seguridad de la información (What is the Enterprise IT BOK?, 2017, parte 1, sección 5, Security Education and Training).

## EL MODELO DEL ÁRBOL DE CIBERSEGURIDAD

Esta investigación presenta el modelo del árbol de la ciberseguridad como propuesta para fortalecer las competencias en el ámbito de seguridad de la información. La analogía del árbol ofrece un marco conceptual estructurado en tres componentes: follaje, tronco y raíces. Esta división facilita la identificación de las áreas clave sobre seguridad física y lógica, lo que sirve como base para la planificación de inversiones estratégicas en *software* y *hardware*. Finalmente, el modelo se complementa con la incorporación de temas de educación sobre la ciberseguridad en cada uno de estos tres componentes.

Cabe resaltar que el modelo del árbol ya ha sido utilizado por el IEEE-CS, pero orientado a ubicar los cuerpos de conocimiento de las TIC dentro de la *Guía de Tecnología de la Información Empresarial* (EITBOK) (What is the Enterprise IT BOK?, 2017).

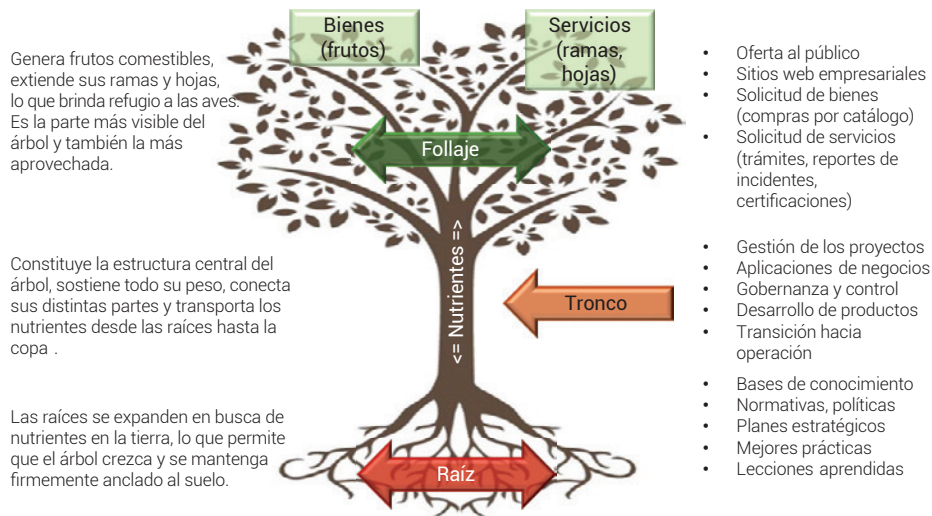
### La analogía del árbol

Un árbol está compuesto por tres partes: raíces, tronco y follaje (ramas, hojas y frutos). Cada parte tiene una función específica que contribuye a su crecimiento y supervivencia, las cuales interactúan entre sí.

- Las raíces: absorben el agua y nutrientes para alimentar los demás componentes. Las raíces crecen buscando alimento, hacen crecer y desarrollar el árbol. Ayudan a engrosar el tronco, extender las ramas, aumentar el follaje y dar frutos.
- El tronco transporta sustancias desde las raíces hacia las ramas y las hojas (estas últimas realizan la fotosíntesis para generar energía). Es la parte principal del árbol, porque soporta el peso total. Al engrosar el tronco, este permite extender las ramas y aumentar el follaje. Un buen tronco evita que se fracture el árbol y se desplome.
- El follaje es lo que se aprecia a la distancia. Con el follaje viene la floración y los frutos comestibles. Es la mayor parte utilizable del árbol al extenderse y dar sustento a muchas formas de vida, como insectos, aves y hasta mamíferos, pues comen, anidan y se protegen en ella.

Figura 4

Componentes típicos de un árbol y analogía con una empresa



Al comparar esta estructuración del árbol con la de una empresa u organización, las raíces representarían los valores y conocimientos fundamentales (la base primordial), el tronco sería la infraestructura que los sostiene junto a las ramas que representan las diferentes áreas de desarrollo (o proyectos), y el follaje con hojas y frutos serían los resultados visibles y aprovechables. En resumen, tenemos la analogía del árbol aplicado a la organización de la siguiente forma:

- La raíz es la base de la empresa. Estas bases representan el conocimiento contenido en reglamentos, normativas, leyes, políticas, planes estratégicos, además de documentos sobre procesos y procedimientos junto a las mejores prácticas y lecciones aprendidas con la experiencia. Asociamos a la raíz con la seguridad de los datos, pues gestiona la información crítica y vital de la empresa. Los datos críticos, así como los componentes de ciberseguridad ubicados en la raíz, no deben contratarse a terceros (*outsourcing*, en inglés).
- El tronco comunica y sostiene el peso de la organización. Aquí se gestionan los proyectos y la gestión de las aplicaciones de negocios. El tronco incorpora los sistemas y aplicaciones (presupuestos, gobernanza y control) que se desarrollan "en vivo". También la gestión de proyectos innovadores, desarrollo de productos y de transición (mover de desarrollo hacia producción). Algunos procesos o proyectos pueden ser ejecutados vía subcontratación u *outsourcing* siempre que no manejen información crítica. Asociamos al tronco con la seguridad de la red por ser la que comunica todo.

- El follaje es la puerta principal de acceso al público. Acá se ubica el catálogo de bienes y servicios en forma de sitios web empresariales. Gracias al follaje, los usuarios usan la autogestión vía consultas en red. También pueden elaborar solicitudes de bienes (compras por catálogo) y de servicios (trámites, reporte de incidentes, impresión de documentos y certificaciones digitales, por ejemplo). Asociamos al follaje con la seguridad de internet y seguridad en la web, por ser la que brinda acceso al usuario.

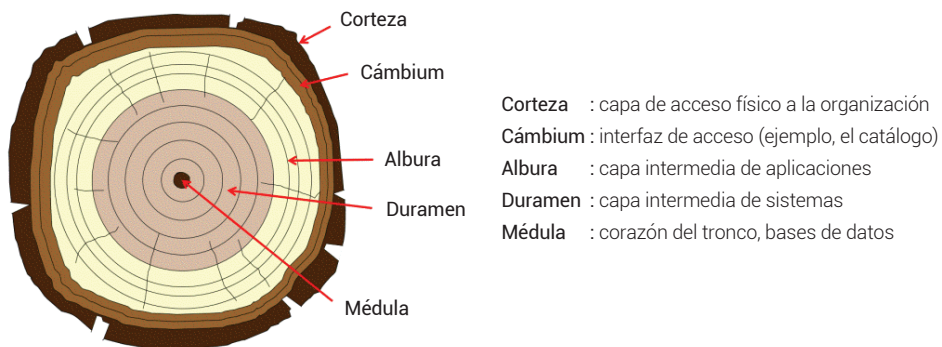
La analogía del árbol, apoyada en la Figura 4, comienza a ofrecernos un marco mental que permite ubicar los distintos elementos de la ciberseguridad en cada una de sus tres partes. Esta analogía se abordará con mayor profundidad más adelante en esta investigación.

### La estructura de capas del tronco

En la Figura 5, se presenta un corte transversal de un tronco que permite identificar las diferentes zonas o capas de un árbol, las cuales utilizaremos en la analogía (Emedec, 2021).

Figura 5

*Estructura por capas del tronco de un árbol*



Nota. De *La estructura del árbol*, por Emedec, 2021, sección "Estructura del tronco" (<https://www.emedec.com/la-estructura-del-arbol/>).

Al analizar la sección transversal de la figura del tronco, se identifican las distintas capas estructurales que lo conforman. Se aprecian tres grandes zonas (destacadas en tonos de colores), las cuales denominaremos capas del tronco y son las siguientes:

1. Corteza y cámbium: capas exteriores que brindan acceso físico y lógico al público. Las aplicaciones web comparten la información en sentido bidireccional, viajando desde el follaje, por esta capa exterior, hasta la raíz. Se

otorgan permisos restringidos de solo lectura a usuarios, clientes y público. La información que viaja por esta capa utiliza vistas de bases de datos para mostrar copias del origen y sin que el usuario pueda modificar o borrar los datos reales. Un ataque en esta capa exterior solo dañaría una copia (vista) de la información y no impactaría los datos reales ubicados en la médula.

2. **Albura y duramen:** capas intermedias del tronco donde se otorga el acceso a sistemas y aplicaciones asociados a procesos de negocio y servicios. Los usuarios deben registrarse previamente para obtener autorización de ingreso. La capa intermedia verifica y asigna los niveles de acceso correspondientes. Este es un ambiente con acceso restringido y con monitoreo constante. Ejemplos: registro de solicitudes de un servicio, compras y pagos en línea, completar formularios para solicitar trámites.
3. **Médula:** capa interna que contiene información sensible y crítica de las bases de datos. En estas capas internas del tronco, se diseña y aplica un esquema de acceso con restricciones muy estrictas para proteger los datos sensibles (raíz). Toda la información que transite en esta capa debe ser tratada con esquemas de seguridad de los más altos niveles. Solamente un número muy limitado de usuarios, computadoras y bases de datos tienen conexión directa a la raíz. Asimismo, las aplicaciones encargadas de actualizar la información clave (agregar, modificar o eliminar datos) deben contar con medidas de seguridad y monitoreo constantes. Las bases de datos clave conforman la médula de la organización y es donde se debe presupuestar la mayor inversión en *software*, *hardware*, comunicaciones y ciberseguridad. Todos los artefactos configurados y conectados a esta capa interna del tronco (incluso capas intermedias) deben estar sujetos a auditorías periódicas de seguridad, incluyendo, como mínimo, pruebas de acceso y vulnerabilidad. Ejemplos: test de penetración (PenTest) y escaneo de vulnerabilidades (VulScan Test).

En síntesis, la estructura en capas del árbol ofrece un marco conceptual útil para el diseño de programas de capacitación orientados tanto a la operación diaria del personal como a la formación técnica en áreas críticas, tales como la identificación y respuesta ante ciberataques y la prevención de accesos no autorizados.

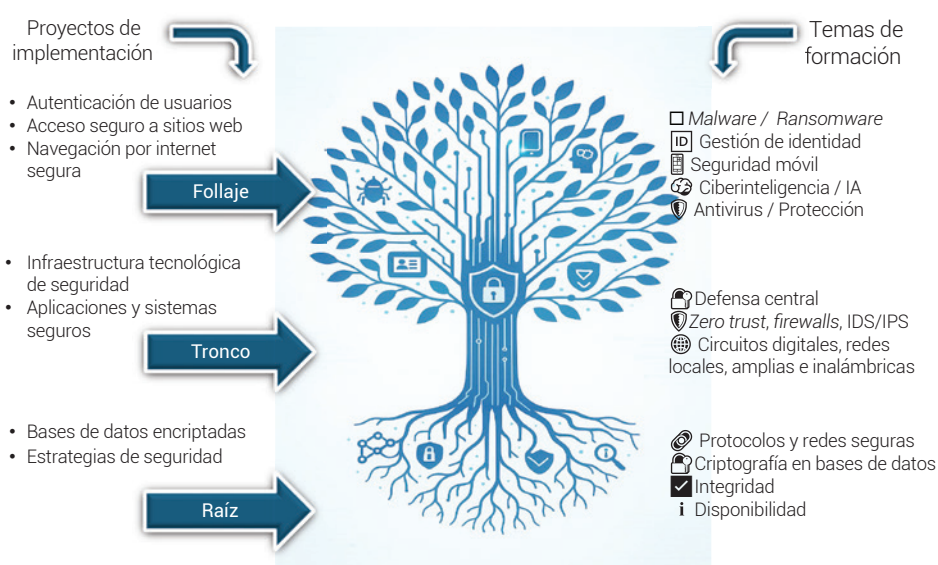
En las capas externas —la corteza y la albura— pueden establecerse controles preventivos y mecanismos de contención adicionales, con el objetivo de impedir la penetración de amenazas hacia la capa más interna —la médula—, que representa los activos más sensibles del sistema. Esta perspectiva facilita una comprensión jerarquizada de las defensas en profundidad y su implementación estratégica en entornos organizacionales.

## Propuesta de un árbol de ciberseguridad

Una estrategia de ciberseguridad debe contemplar tanto la probabilidad de ocurrencia de eventos de riesgo menor (capas exteriores) como la magnitud de un posible impacto mayor. La analogía de los tres componentes del árbol (follaje, tronco y raíces), junto con la estructura por capas del tronco, ofrecen un marco de referencia eficaz para proponer estrategias y arquitecturas de ciberseguridad, además de brindar pautas para la formación del personal con el objetivo de llevar a cabo una gestión segura de ciberseguridad en la organización (Figura 6).

**Figura 6**

*Propuesta de árbol de ciberseguridad*



Procedemos a analizar cada uno de los componentes de la Figura 6:

1. Las raíces simbolizan los principios fundamentales de la organización, incluyendo las bases de datos, las estrategias de seguridad, los datos críticos y la gestión de riesgos. Se debe evitar cualquier acceso remoto a esta zona. Solamente por red local deben actualizar las bases de datos corporativas. Por tanto, se debe invertir en diseño e implementación de varios niveles de seguridad para el acceso físico y lógico a la raíz.
  - Proyectos de implementación: productos para encriptación de datos críticos.

- Temas de formación: protocolos, criptografía, manejo de integridad y disponibilidad segura de aplicaciones, sistemas, servicios con datos críticos.
  - Componentes de ciberseguridad:
    - Protocolos y redes seguras. Conexiones protegidas como SSL/TLS (capa de *sockets* seguros en la capa de transporte), VPN (redes virtuales privadas).
    - Criptografía. Protección de datos mediante cifrado y encriptación segura.
    - Integridad. Garantiza que la información no ha sido modificada.
    - Disponibilidad. Asegura que la información esté accesible cuando se necesite.
2. El tronco representa la infraestructura tecnológica que sustenta la seguridad, incluyendo los cortafuegos (*firewalls*) y el acceso seguro a redes locales e inalámbricas. En las ramas se implementan diversas estrategias de defensa, como la autenticación multifactor y los sistemas de detección de intrusos (*intrusion detection system/intrusion prevention system*, IDS/IPS). Adicionalmente, se pueden considerar estrategias de seguridad para el acceso a la red del tipo *zero trust*<sup>2</sup> para evitar aplicaciones con acceso directo a la información crítica.
- Proyectos de implementación: infraestructura de seguridad (ejemplo, *firewalls*) con aplicaciones y sistemas para integrar conceptos de acceso y comunicación seguros, así como diseño e implementación de redes virtuales seguras (VLAN).
  - Temas de formación: soporte técnico y programación en defensa central, *zero trust*, configuración de muros de fuego (*firewalls*), arquitecturas de redes telemáticas (físicas e inalámbricas y VLAN) y detección IDS/IPS.
  - Componentes de ciberseguridad.
    - Defensa central (*zero trust, firewall*). Incluye equipos de la infraestructura de seguridad de acceso como *firewalls*, IDS/IPS (sistemas de detección de intrusiones y sistemas de prevención de intrusiones) y *zero trust* (exige una verificación de identidad estricta para cada usuario y dispositivo que intente acceder a los recursos de la red).

---

2 *Zero trust* es una estrategia de seguridad de red que establece que ningún usuario o dispositivo debe tener acceso a sistemas de TI o cargas de trabajo sin una necesidad explícita (Akamai, 2025).

- Circuitos digitales. Estructura conectada de redes (locales y remotas).
3. El follaje, junto a las hojas y frutos, representan los esquemas de autenticación primarios que permiten el acceso desde los sitios web y la generación de confianza en el usuario mediante un acceso seguro a la información de la organización.
- Proyectos de implementación: autenticación de usuarios, acceso seguro a sitios web y navegación cifrada en internet utilizando túneles cifrados (VPN).
  - Temas de formación: diseño de sitios web con esquemas de autenticación y navegación segura. Gestión de ciberamenazas del tipo *malware*, *ransomware*, seguridad móvil, configuración de antivirus y uso de IA para ciberseguridad.
  - Componentes de ciberseguridad.
    - *Malware/ransomware*, como variante de *malware* (*software* malicioso). Infectan computadoras, dispositivos o redes. Protección contra amenazas informáticas que comprometan la integridad, disponibilidad y confidencialidad.
    - Gestión de identidad. Control de accesos y verificación de usuarios.
    - Seguridad móvil para protección de dispositivos móviles e IoT.
    - Ciberinteligencia/IA. Uso de inteligencia artificial para detectar, prevenir y responder a amenazas.
    - Antivirus/protección de *endpoint* (protección de dispositivos como computadoras, portátiles, teléfonos móviles y tabletas contra amenazas maliciosas y ciberataques).

El integrar elementos de ciberseguridad usando la analogía de un árbol permite fortalecer cada componente y garantizar un entorno digital más seguro y resiliente. Además, este modelo sirve como herramienta de apoyo para la formación en seguridad dirigida al personal de las distintas áreas y divisiones de la organización. Entonces, una capacitación efectiva en ciberseguridad, basada en la analogía del árbol, debe utilizar un lenguaje común y no técnico, accesible para todo el personal, de modo que puedan comprenderlo y aplicarlo según su área de responsabilidad.

### El árbol como modelo para educar en ciberseguridad

La analogía del árbol, tanto en su estructura vertical (raíces, tronco y follaje) como en sus capas concéntricas (corteza, albura y médula), constituye un marco conceptual

robusto para el diseño e implementación de estrategias de ciberseguridad y programas de formación especializados. Esta representación permite visualizar de forma jerarquizada y funcional los distintos niveles de protección para desarrollar temas de formación orientados a una comprensión integral del enfoque de defensa en profundidad.

- Las raíces simbolizan los fundamentos de la seguridad organizacional (bases de datos, políticas estratégicas, activos críticos y procesos de gestión de riesgos).
- El tronco representa la infraestructura tecnológica que sustenta y conecta el sistema, incluyendo mecanismos como cortafuegos, redes seguras y controles de acceso.
- El follaje, junto con las hojas y frutos, refleja los puntos de interacción con el entorno externo, como los sistemas de autenticación y los canales de acceso a información desde interfaces públicas o sitios web, fundamentales para la generación de confianza en los usuarios.

Adicionalmente, con la analogía de la estructura de capas del tronco —desde la corteza hasta la médula—, permite establecer temas de formación sobre controles escalonados que refuercen la protección en las distintas capas de acceso a la información y los sistemas de una organización.

- En las capas externas (corteza): formación sobre el acceso del público a través de aplicaciones web utilizando vistas de las bases de datos donde se muestran copias controladas de los datos originales, lo que reduce el riesgo de modificación o eliminación.
- La capa intermedia (albura): formación sobre acceso a sistemas y aplicaciones asociados a procesos de negocio y servicios donde se ubican mecanismos de prevención y contención diseñados para bloquear intentos de intrusión.
- La médula, como núcleo central: temas de formación sobre identificación de los activos más sensibles que deben ser resguardados con los controles más estrictos, donde solamente un número muy limitado de usuarios, computadoras y bases de datos tienen conexión directa.

Esta doble analogía no solo orienta la arquitectura técnica de seguridad, sino que también ofrece directrices claras para el desarrollo de capacidades en el personal: desde la capacitación operativa para llevar a cabo tareas cotidianas hasta la formación técnica especializada en detección de amenazas, respuesta ante incidentes y prevención de accesos no autorizados.

En conjunto, la propuesta del árbol de ciberseguridad junto a la estructura de capas del árbol constituye una base conceptual robusta para la gestión segura y



estratégica de la ciberseguridad en entornos organizacionales complejos. Además, ofrece directrices claras para el diseño de programas formativos en distintos niveles: desde la capacitación técnica y profesional hasta talleres prácticos dirigidos tanto a personal no especializado como a directivos, lo que promueve una cultura de seguridad integral en todos los niveles de la organización.

## CONCLUSIONES

A partir del modelo del árbol de la ciberseguridad, se reafirma la importancia de contar con un enfoque estructurado, progresivo y formativo para abordar los desafíos actuales de la seguridad digital. A diferencia de enfoques fragmentados o centrados exclusivamente en aspectos técnicos, esta propuesta integra dimensiones pedagógicas, operativas y estratégicas, con una perspectiva integral que facilita las inversiones en formación y adquisición de tecnologías de seguridad coherentes con los estándares internacionales, tales como ISO/IEC 27032, CSEC 2017 y EITBOK.

La analogía del árbol no solo permite estructurar jerárquicamente los componentes clave de la ciberseguridad (follaje, tronco y raíces), sino que también establece una lógica formativa que orienta el desarrollo de competencias en función de los distintos niveles de exposición y responsabilidad, válido a nivel individual o a nivel personal dentro de una organización. De esta manera, el modelo del árbol de ciberseguridad no solo responde a la imperante necesidad de reforzar la seguridad digital en un entorno cada vez más interconectado, sino que también contribuye de forma sustantiva a la consolidación de una cultura organizacional centrada en la prevención, la resiliencia y la gestión sostenible de los sistemas de información.

Un ejemplo de aplicación del modelo en un entorno real consiste en realizar un inventario de los productos de *software* y *hardware* presentes en una organización. Posteriormente, cada uno de estos elementos se clasifica dentro de los tres componentes del modelo. A partir de esta lista, se seleccionan aquellos elementos relacionados directa o indirectamente con la ciberseguridad y se repite el ejercicio de categorización. Es probable que diferentes personas tengan opiniones distintas respecto a la ubicación de cada componente; sin embargo, esta diversidad de criterios forma parte del proceso formativo, ya que promueve una comprensión más profunda y un mayor conocimiento sobre las herramientas de ciberseguridad disponibles en la organización.

Al promover el desarrollo continuo de capacidades en el capital humano especializado, esta propuesta incide positivamente en la construcción de una sociedad digital más segura, resiliente ante ciberamenazas y preparada para enfrentar los desafíos del ciberespacio.

Como recomendación final y para futuras investigaciones, se sugiere utilizar este modelo como base para realizar una evaluación cualitativa, mediante encuestas,

entrevistas o pruebas piloto, que permitan validar y medir su eficacia en un entorno real.

## REFERENCIAS

- Akamai. (2025). *What is zero trust*. <https://www.akamai.com/glossary/what-is-zero-trust>
- Arreola García, A. (2019). Desafíos a las estrategias de ciberseguridad. *Revista del Centro de Estudios Superiores Navales*, 40(4), 25-53. [https://cesnav.uninav.edu.mx/cesnav/revista\\_pdf/2019/2019-4.pdf](https://cesnav.uninav.edu.mx/cesnav/revista_pdf/2019/2019-4.pdf)
- Ballesteros, F. (2020). La ciberseguridad en tiempos difíciles. *Información Comercial Española. Boletín Económico*, (3122), 39-48. <https://doi.org/10.32796/bice.2020.3122.6993>
- Cano, J. (2008). Ciberdelincuencia y ciberterrorismo: dos amenazas emergentes. *Information Systems Control Journal*, 1-6. [https://www.researchgate.net/publication/238781406\\_Ciberdelincuencia\\_y\\_Ciberterrorismo\\_Dos\\_Amenazas\\_Emergentes](https://www.researchgate.net/publication/238781406_Ciberdelincuencia_y_Ciberterrorismo_Dos_Amenazas_Emergentes).
- Cano, J. (2011). Ciberseguridad y ciberdefensa: dos tendencias emergentes en un contexto global. *Sistemas. Asociación Colombiana de Ingenieros de Sistemas*, (119).
- Cano M., J. J. (2020). Seguridad y ciberseguridad 2009-2019. Lecciones aprendidas y retos pendientes. *Sistemas*, (155), 81-94. <https://doi.org/10.29236/sistemas.n155a6>
- Carrillo, J. J. M., Zambrano, N. A., Cantos, J. S. M., & Bravo, M. Z. (2019). Ciberseguridad y su aplicación en las instituciones de educación superior. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, E20, 438-448. <https://www.proquest.com/docview/2318537201/fulltextPDF/85B311F112D34AA7PQ/1?accountid=45277>
- Clark, O., Reynolds, T. L., Ugwuabonyi, E. C., & Joshi, K. P. (2024). Exploring the impact of increased health information accessibility in cyberspace on trust and self-care practices. *SaT-CPS 2024: Proceedings of the 2024 ACM Workshop on Secure and Trustworthy Cyber-Physical Systems* (pp. 61-70). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3643650.3658611>
- De-Moragas, M. (Ed.). (2012). *La comunicación: de los orígenes a internet*. Gedisa.
- Emedec, S. (2021, 30 de julio). *La estructura del árbol*. <https://www.emedec.com/la-estructura-del-arbol/>

- Ganesan, R., Jajodia, S., Shah, A., & Cam, H. (2016). Dynamic scheduling of cybersecurity analysts for minimizing risk using reinforcement learning. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 8(1), 1-21. <https://doi.org/10.1145/2882969>
- Garrison, J., & Nova, K. (2017). *Cloud native infrastructure. Patterns for scalable infrastructure and applications in a dynamic environment*. O'Reilly.
- González, A., Idrobo, S., & Villamarín, A. (2020). *Gestión de seguridad del activo intangible*. Universidad Internacional SEK. [https://www.academia.edu/43066543/Maestr%C3%ADa\\_en\\_Ciberseguridad](https://www.academia.edu/43066543/Maestr%C3%ADa_en_Ciberseguridad)
- International Organization for Standardization. (2023). *ISO/IEC 27032:2023. Cybersecurity—Guidelines for internet security* (2.ª ed.). <https://www.iso.org/standard/76070.html>
- Joint Task Force on Cybersecurity Education. (2017). *Cybersecurity Curricula 2017*. Association for Computing Machinery; IEEE Computer Security; Association for Information Systems Special Interest Group on Information Security and Privacy; International Federation for Information Processing Technical Committee on Information Security Education. <https://doi.org/10.1145/3184594>
- Lewis, J. (2018). *Economic impact of cybercrime—No slowing down*. CSIS [https://www.academia.edu/38817793/Economic\\_Impact\\_of\\_Cybercrime\\_No\\_Slowing\\_Down](https://www.academia.edu/38817793/Economic_Impact_of_Cybercrime_No_Slowing_Down)
- Manuel, V., Gonçalves, B., & Carrapatoso, E. M. (2006). Rumo a uma web mais inteligente resumo. *EduSer*, 2(2), 201-227.
- Mayle, C. (2018). *Ciberseguridad CERTAL 2018*. Academia. [https://www.academia.edu/44956544/Ciberseguridad\\_CERTAL\\_2018](https://www.academia.edu/44956544/Ciberseguridad_CERTAL_2018)
- Mendoza, M. A. (2014). *Seguridad en la nube para empresas: ¿qué son los CASB? We Live Security*. <https://www.welivesecurity.com/la-es/2014/09/24/seguridad-nube-empresas-que-son-casb/>
- Moraes, T. (2024). Ethical AI regulatory sandboxes: Insights from cyberspace regulation and internet governance. En *TAS '24: Proceedings of the Second International Symposium on Trustworthy Autonomous Systems* (pp. 1-10). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3686038.3686049>
- Morales Suárez, A. C., Díaz Ávila, S. S., & Leguizamón Páez, M. Á. (2019). Mecanismos de seguridad en el internet de las cosas. *Vínculos*, 16(2), 288-297. <https://doi.org/10.14483/2322939x.15758>
- Moreno González, J., Albornoz, M. M., & Maqueo Ramírez, M. S. (2019). Ciberseguridad: estado de la cuestión en América Latina. *Revista de Administración Pública*,

- 7(148), 23-46. <https://revistas-colaboracion.juridicas.unam.mx/index.php/rev-administracion-publica/article/download/38396/35294>
- Okonkwo, I. E., & Udo, B. (2022). Utilising BIMi-VMC as a cybersecurity tool for brand protection. *Academia Letters*, Artículo 4690. <https://doi.org/10.20935/al4690>
- Pinheiro, M. (2000). *Redesignando a WWW o papel do design na democratização da World Wide Web*. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- PurpleSec. (2025). *2024 Cybersecurity Statistics*. The Ultimate List Of Cybersecurity Stats Data, & Trends. <https://purplesec.us/resources/cybersecurity-statistics/>
- Tim Berners-Lee. (2025, 12 de junio). En *Wikipedia*. [https://es.wikipedia.org/wiki/Tim\\_Berners-Lee](https://es.wikipedia.org/wiki/Tim_Berners-Lee)
- Unesco. (2024). *Marco de competencias para docentes em matéria de IA*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000393813>
- Valencia-Arias, A., Bermeo Giraldo, M. C., Acevedo-Correa, Y., Garcés-Giraldo, L. F., Quiroz-Fabra, J., Benjumea-Arias, M. L., & Patiño-Vanegas, J. (2020). Tendencias investigativas en educación en ciberseguridad: un estudio bibliométrico. *Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologias de Informação*, (E29), 225-239. <https://www.researchgate.net/publication/341220536>
- Von Solms, R., & Van Niekerk, J. (2013). From information security to cyber security. *Computers & Security*, 38, 97-102. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2013.04.004>
- What is the enterprise IT BOK? (2017, 22 de diciembre). En *EITBOK. Guide to the Enterprise IT Body of Experience*. [http://eitbokwiki.org/What\\_is\\_the\\_Enterprise\\_IT\\_BOK%3F](http://eitbokwiki.org/What_is_the_Enterprise_IT_BOK%3F)
- Zhou, Y., Wang, Q., & Li, G. (2024). Intelligent talent information system guarantee based on cyberspace security technology. En *ICCSIE '24: Proceedings of the 2024 9th International Conference on Cyber Security and Information Engineering* (pp. 123-130). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3689236.3689867>

# ANÁLISIS DE APLICACIONES MÓVILES PARA EL APRENDIZAJE DE LA ELECTRÓNICA EN MÉXICO

IRENE AGUILAR JUÁREZ

<https://orcid.org/0000-0003-4747-0336>

[iaguilarj@uaemex.mx](mailto:iaguilarj@uaemex.mx)

Universidad Autónoma del Estado de México

LESLIE JASIEL SÁNCHEZ CORTÉS

<https://orcid.org/0009-0006-8634-6257>

[lsanchezc024@alumno.uaemex.mx](mailto:lsanchezc024@alumno.uaemex.mx)

Universidad Autónoma del Estado de México

Recibido: 15 de mayo del 2025 / Aceptado: 16 de junio del 2025

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.7924>

**RESUMEN.** El propósito de este artículo es explorar aplicaciones móviles educativas de electrónica en español para identificar aquellas que favorezcan el aprendizaje de estudiantes universitarios, específicamente de la licenciatura en Ingeniería en Computación del Centro Universitario UAEM Texcoco. Para ello, se elaboró un instrumento de evaluación basado en criterios técnicos y didácticos fundamentados en el modelo constructivista, priorizando interactividad, usabilidad, contenido educativo y retroalimentación. La metodología incluyó una revisión bibliográfica sobre instrumentos de evaluación y el uso de aplicaciones móviles como herramientas de aprendizaje autodirigido. Se seleccionaron las aplicaciones mediante un análisis de sus prestaciones. Los datos fueron obtenidos de estudiantes universitarios que aplicaron el instrumento. Se identificó que la aplicación Manual del electricista fue la mejor valorada en sus propiedades didácticas con 9,33 puntos; Electrodoc se ubicó con el puntaje más bajo con 8,14. En la evaluación técnica, también Manual del electricista fue la mejor valorada con 9,08, mientras que Circuit Jam obtuvo el menor puntaje (6,94). Además, se identificó que Circuit Jam es un juego didáctico cuyas propiedades no se ajustaban a las propiedades de apps no lúdicas, por lo que fue necesario desarrollar instrumentos específicos de evaluación para los juegos serios. También se destacaron siete aplicaciones como las más efectivas, agrupadas en bibliotecas de recursos, simuladores y juegos. Estas herramientas mostraron potencial para mejorar la comprensión de conceptos complejos de electrónica y para promover un aprendizaje activo. El estudio incluye recomendaciones para su integración en clases y sugiere futuras investigaciones.

**PALABRAS CLAVE:** aprendizaje autorregulado / constructivismo / dispositivos móviles / innovación educativa / instrumentos de evaluación / necesidades de evaluación

## ANALYSIS OF MOBILE APPLICATIONS FOR LEARNING AROUND ELECTRONICS IN MEXICO

**ABSTRACT.** The purpose of this research was to explore educational mobile applications of electronics in Spanish to identify those that favor the learning of university students, specifically from the Computer Engineering degree program at the UAEM Texcoco University Center. An evaluation instrument was developed based on technical and didactic criteria based on the constructivist model, prioritizing interactivity, usability, educational content and feedback. The methodology included a literature review on evaluation instruments and the use of mobile applications as self-directed learning tools. The applications were selected through an analysis of their performance. Data were obtained from university students who applied the instrument. It was identified that the application "Electrician's Manual" was the best rated in its didactic properties with 9.33 points, "Electrodoc" was placed with the lowest score with 8.14. In the technical evaluation also "Electrician's Manual" was the best rated with 9.08 points and 'CircuitJam' obtained the lowest score (6.94), however, it was identified that "CircuitJam" is a didactic game whose properties do not match the properties of non-playful PPPs, so it is necessary to develop specific evaluation instruments for serious games. Seven applications were also highlighted as the most effective, grouped into resource libraries, simulators and games. These tools showed potential to improve the understanding of complex electronics concepts, promoting active learning. The study includes recommendations for their integration in classrooms and suggests future research.

**KEYWORDS:** assessment needs / assessment tools / constructivism / educational innovation / mobile devices / self-regulated learning

## INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la educación superior, la integración de la tecnología móvil es clave para mejorar la experiencia educativa de los estudiantes. Sin embargo, no todos los docentes conocen los beneficios de usar aplicaciones educativas, la falta de tiempo y de conocimientos específicos para evaluar *software* educativo son factores que limitan a los docentes explorar sobre las aplicaciones que pueden significar un apoyo de aprendizaje para sus alumnos.

Por tal razón, en este estudio, se realizó un análisis exploratorio sobre aplicaciones disponibles en el área de la electrónica y se proporcionó información valiosa sobre aplicaciones móviles (apps) educativas para estudiantes, docentes y profesionales interesados en optimizar los procesos de enseñanza y aprendizaje en el área de la electrónica. Asimismo, este artículo aborda la necesidad de seleccionar y evaluar apps educativas que sean efectivas y accesibles para los estudiantes de electrónica con el fin de promover un aprendizaje autorregulado y proveer un instrumento específico para la evaluarlas.

La presente investigación propone un instrumento de evaluación para apps educativas que considera aspectos didácticos y tecnológicos para aplicarse sobre siete aplicaciones libres de pago seleccionadas para alumnos de la zona oriente del Estado de México, quienes tienen dificultades de conectividad y bajos recursos económicos. Para ello, se analizaron diversos aplicativos para identificar las mejor aceptadas por los alumnos participantes con la finalidad de promoverlas entre los docentes de la licenciatura y para que sean consideradas como un nuevo material de apoyo de aprendizaje.

Este trabajo se estructura en cuatro apartados. El primero de ellos aborda el estado del arte en temas relacionados al *software* educativo, las aplicaciones educativas y su evaluación, desde el enfoque tecnológico y didáctico. En la segunda sección, se explica la metodología aplicada en esta investigación, se describen las características del instrumento de investigación, los datos de la muestra poblacional y del proceso de recolección de datos. En la sección de los resultados, se describe el análisis cuantitativo y cualitativo de los datos obtenidos. Finalmente, se presentan algunas recomendaciones para ampliar el uso de las apps en el estudio de la electrónica en particular y de la enseñanza universitaria en general.

### El *software* educativo

En la corriente constructivista el aprendizaje, el *software* educativo es un proceso que intenta articular nuevas experiencias con el conocimiento previo de las personas y que se realiza mediante la interacción del estudiante con materiales, medios y representaciones del ambiente cultural (Martínez et al., s. f., p. 2). En opinión de Aparicio Gómez (2018), el uso correcto de las herramientas cognitivas permite generar conocimientos

en los estudiantes, ya que son instrumentos que aumentan la capacidad de filtrar y reorganizar la información y que traen como resultado la construcción de su propio aprendizaje.

Los materiales educativos son aquellos instrumentos cognitivos que han evolucionado notoriamente gracias a las nuevas herramientas informáticas, pues se han vuelto más diversos y complejos. La innovación tecnológica ha generado la necesidad de proveer materiales educativos digitales que ayuden en los procesos de educación mediada por tecnología. Por esta situación, el *software* educativo (SE) toma un papel relevante para satisfacer la necesidad de estos recursos que promuevan habilidades, conocimiento y actitudes en los estudiantes.

En opinión de Gutiérrez Benítez y Acuña Gamboa (2022), para que el *software* sea considerado educativo debe cumplir un principio básico: involucrar el conocimiento de tres disciplinas (la computación, la pedagogía y la disciplina que trata). Por ello, es importante resaltar la capacidad que tiene el *software* para representar casi cualquier contenido en formato digital, lo que facilita la generación de experiencias de aprendizaje enriquecidas por objetos multimedia, simulaciones, lecturas y debates.

El SE en línea facilita el acceso a recursos sin barreras de tiempo y espacio, y permite, en consecuencia, promover el aprendizaje autodirigido en los estudiantes. También permite aumentar la comunicación e interacción, minimizar costos, riesgos y peligros mediante simuladores. Además, se pueden aprovechar estos recursos para realizar evaluaciones estandarizadas (Gutiérrez Benítez & Acuña Gamboa, 2022).

### Aplicaciones móviles educativas

La integración de la tecnología móvil en la educación superior, bajo un enfoque constructivista, promueve un aprendizaje dinámico y centrado en el estudiante, es decir, los alumnos son agentes activos en la construcción de su aprendizaje (Vygotsky, 1978). Este enfoque es clave para la enseñanza de la electrónica, un área caracterizada por conceptos complejos y aplicaciones prácticas.

El ingreso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) y los teléfonos inteligentes en el ámbito educativo ha transformado los paradigmas de aprendizaje, lo que ha permitido la disponibilidad del conocimiento en todo momento y lugar (Geddes, 2004, como se cita en López Hernández & Silva Pérez, 2016). Este cambio impacta a estudiantes y docentes, quienes adoptan cada vez más tecnologías para enriquecer sus métodos de enseñanza. En este sentido, el aprendizaje móvil o *m-learning* se ha posicionado como un enfoque que transforma las clases tradicionales en experiencias interactivas (López Hernández & Silva Pérez, 2016).

A pesar de las ventajas de la tecnología móvil en la educación, también surgen varios desafíos. Entre estos se destacan las limitaciones técnicas y el reto de crear



apps que funcionen adecuadamente en versiones antiguas de sistemas operativos o memoria limitada en equipos de gama baja.

Crompton y Burke (2018) han señalado que el aprendizaje móvil se ha consolidado como una herramienta valiosa para la educación superior, ya que permite a los estudiantes aprender en cualquier momento y lugar, lo que apoya al aprendizaje autorregulado y al acceso inmediato a recursos educativos. Asimismo, Aliaño et al. (2019) destacaron que la aceptación de estas tecnologías por parte de los estudiantes depende de factores como la facilidad de uso, la utilidad percibida y la posibilidad de interacción, lo que refuerza su papel como herramientas didácticas efectivas. Aunque muchas de estas aplicaciones se enfocan en áreas generales del conocimiento, su integración en campos especializados como la electrónica aún es limitada y poco documentada, lo que subraya la necesidad de investigaciones que analicen su impacto y utilidad específica en este tipo de disciplinas técnicas.

### La evaluación del *software* educativo

Este proceso es clave para maximizar la efectividad del *software*. Este trabajo propone un instrumento de evaluación que considera criterios técnicos y didácticos para valorar apps sobre electrónica en educación superior. El objetivo es identificar aquellas que presentan un mayor potencial para favorecer el aprendizaje activo y la resolución de problemas con base en la opinión de los estudiantes.

Los instrumentos de evaluación del *software* educativo tienen varios años de desarrollo. Ya desde el año 2000, Cataldi reconoció la necesidad de evaluar al SE en varios aspectos: respecto al perfil de usuario objetivo, a la infraestructura tecnológica, a las interacciones educativas, considerando las opiniones de los usuarios finales y de los desarrolladores.

Gutiérrez Benítez y Acuña Gamboa (2022, p. 339) observaron que los autores revisados en su investigación coincidían en que

un elemento crucial en la evaluación del *software* es la calidad pedagógica y la validez en el contexto final de aplicación, y que estos procesos de valoración deben considerar aspectos como el tipo de interacción e incluso las condiciones de infraestructura con las que se cuenta.

También señalaron que recientemente la evaluación técnica del *software* se realiza respecto al cumplimiento de los estándares establecidos por la ingeniería del *software* como el ISO/IEC 25000:2005.

La evaluación de estas aplicaciones no solo debe considerar el desempeño técnico (como la interactividad, facilidad de navegación y compatibilidad), sino también los aspectos didácticos que facilitan el aprendizaje significativo. Las aplicaciones deben ofrecer recursos educativos variados, como simulaciones, videos y

actividades interactivas, que se adapten a los diferentes estilos de aprendizaje de los estudiantes (Sharples, 2005, como se cita en Henríquez Ritchie et al., 2013). Además, deben promover habilidades de pensamiento crítico y resolución de problemas, que son fundamentales para el éxito de los estudiantes en el campo de la electrónica (Jonassen, 1991, como se cita en Aparicio Gómez, 2018).

## METODOLOGÍA

Esta investigación se compone de dos fases: una documental sobre el uso y la evaluación de las apps en electrónica con un enfoque constructivista, y otra exploratoria sobre la evaluación de usuario de las apps seleccionadas. En la Figura 1, se muestran las actividades realizadas.

**Figura 1**

*Actividades realizadas para la evaluación de apps educativas*



La investigación documental incluyó una revisión exhaustiva de literatura académica y técnica sobre tecnología móvil en la educación superior enfocada en electrónica. Para ello, se consultaron bases de datos académicas como Google Scholar, ResearchGate, Redalyc y Dialnet mediante ecuaciones de búsqueda basadas en palabras clave y operadores booleanos:

- (Tecnología móvil OR Aplicaciones móviles) AND (Educación superior) AND (Electrónica)
- (Innovación educativa AND Tecnología educativa) AND (Evaluación OR Análisis)
- Aprendizaje autorregulado AND Constructivismo

Esta estrategia permitió delimitar las consultas y recuperar literatura relevante publicada entre 1986 y 2024. Se consultaron treinta y tres trabajos entre artículos científicos, capítulos de libros y reportes técnicos.

## Desarrollo del instrumento de evaluación

En atención de las recomendaciones realizadas por Gutiérrez Benítez y Acuña Gamboa (2022), se establecieron los criterios esenciales para analizar las apps educativas en electrónica y en español. Se definieron tres aspectos: el contexto educativo del público objetivo, los criterios técnicos del *software* y las propiedades didácticas. A continuación, se explican las propiedades que identificamos en el *software* educativo.

### *Contexto pedagógico*

En la evaluación del *software* educativo, fue importante observar el contexto educativo en el que se usan las aplicaciones, ya que de este contexto depende la pertinencia y los resultados a obtener. Estas apps están dirigidas a estudiantes de educación superior, cuya edad oscila entre 19 y 25 años. El centro educativo se localiza al oriente del Estado de México, una zona que se caracteriza por tener alta densidad poblacional con bajos ingresos económicos. En esta zona, coinciden lo urbano y lo rural. Es importante considerar esta situación, porque es muy común la mezcla de experiencias totalmente rurales con experiencias urbanas en la población estudiantil y docente de la universidad.

Respecto al nivel educativo superior, se sabe que existe una cobertura en la entidad federativa del 28,7 % para estudiantes de 18 a 22 años. Sin embargo, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2024) identificó que los jóvenes trabajan generalmente en pequeños negocios familiares (salones de belleza, pequeños restaurantes, talleres mecánicos, etcétera), los cuales tienden a ser unidades económicas poco productivas, por lo que los ingresos de los jóvenes son precarios con poco acceso a protección social (Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, 2023).

La población estudiantil en la carrera de Ingeniería de Computación tuvo inscritos durante el semestre 2024-B a 499 alumnos, de los cuales 111 fueron mujeres. Los alumnos que requerían *software* educativo para el aprendizaje de la electrónica eran alumnos de cuarto semestre en adelante (alrededor de 180 alumnos). Se observó que en esta población las condiciones sociales y económicas limitan el acceso a recursos materiales orientados a la educación, además de que un alto porcentaje de alumnos tiene que dedicar tiempo a actividades laborales no formales y temporales.

Aunque la universidad provee recursos como la biblioteca virtual y el repositorio institucional, el *software* educativo no se difunde formalmente en la licenciatura. Son los alumnos y profesores quienes lo buscan, lo valoran y, a veces, lo comparten. Esto resalta la necesidad de evaluar su calidad y el potencial apoyo que puede brindar a los estudiantes. Respecto al acceso a la tecnología, las estadísticas en México señalan que el 81,4 % de los mexicanos usan teléfonos celulares, de los cuales el 75,8 % usan la plataforma de Android, lo que define el tipo de aplicaciones que se exploraron en este estudio (Miranda, 2024).

### *Criterios técnicos*

Para medir las características de calidad del *software*, se utilizaron las normas ISO/IEC 9126, las cuales establecen métricas externas del producto para medir el comportamiento del *software* en ejecución. Estas normas fundamentan los atributos funcionalidad, fiabilidad, usabilidad, eficiencia, mantenibilidad y portabilidad, con veintisiete subcaracterísticas (ISO/IEC, 1991). De estas se seleccionaron las propiedades más fáciles de identificar por los usuarios:

- i. Interactividad de la aplicación. Capacidad para involucrar al usuario mediante la manipulación de componentes y la observación de resultados en tiempo real (Roschelle, 2003).
- ii. Facilidad de navegación y usabilidad. Intuición y simplicidad de uso (Nielsen, 1993).
- iii. Accesibilidad y disponibilidad. Capacidad de acceso en diferentes dispositivos y plataformas (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura, 2013).
- iv. Seguridad y privacidad de los datos. Cumplimiento de normativas de protección de datos (Unión Europea, s. f.).
- v. Interfaz de usuario. Diseño visual claro y atractivo (Smith & Mosier, 1986).
- vi. Compatibilidad. Funcionamiento adecuado en diversos dispositivos y sistemas operativos (Nielsen & Loranger, 2007).
- vii. Rendimiento. Eficiencia en velocidad y estabilidad (Nielsen, 1993).
- viii. Consumo de recursos. Impacto en batería, memoria y procesador (Nielsen, 1993).

### *Criterios didácticos*

González (2002), citado en Espinoza et al. (2005), identificó dieciocho propiedades que debe cumplir un *software* educativo. Hsu y Ching (2015) propusieron una rúbrica de evaluación que incluye cinco dimensiones: desarrollo personal, cognitivo/metacognitivo, aprendizaje/competencias, desarrollo social y dimensión técnicos. Los criterios didácticos que se identifican como significativos son retroalimentación, pensamiento crítico, variedad de recursos y evaluación formativa están alineados con las dimensiones cognitivas y sociales. Con base en las dos propuestas, se seleccionaron los criterios que esta investigación analizará:

- i. Retroalimentación inmediata y personalizada. Capacidad de ofrecer retroalimentación específica y en tiempo real (Hattie & Timperley, 2007).

- ii. Variedad de recursos educativos. Diversidad de recursos como simulaciones, videos y actividades prácticas (Sharples, 2005).
- iii. Adaptabilidad a diferentes niveles de conocimiento. Flexibilidad para ajustarse a diferentes niveles de habilidad (Duffy & Jonassen, 1992).
- iv. Promoción del pensamiento crítico y resolución de problemas. Fomento de habilidades críticas y resolución de problemas (Jonassen, 1991).
- v. Motivación. Elementos como gamificación para mantener el interés (Deci & Ryan, 1985).
- vi. Evaluación formativa. Herramientas para monitoreo continuo y retroalimentación (Black & Wiliam, 2010).

### Selección de apps de aprendizaje sobre electrónica

Se seleccionaron apps para Android debido a su amplia adopción entre los estudiantes y se priorizaron las gratuitas y en español para garantizar su accesibilidad. La evaluación se centró en la satisfacción de los usuarios, su relación con la electrónica y la experiencia de usuario (navegación, interfaz y recursos), con un máximo de cinco puntos por aplicación. Siete aplicaciones cumplieron la mayoría de los criterios y se agruparon en tres categorías, mientras que otras fueron descartadas por limitaciones, tales como pagos, recursos limitados o baja usabilidad. En la Tabla 1, se muestran los resultados de la evaluación preliminar.

**Tabla 1**

*Resultados de evaluación de las apps educativas*

Apps	Puntuación de apreciación de usuarios en Google Play	Puntuación sobre disponibilidad y experiencia de usuario	Categoría
Calculadora electrónica	4,8	5,0	Biblioteca de recursos
Caja de herramientas de electrónica	4,7	5,0	Biblioteca de recursos
Circuit Jam	4,2	4,5	Juego educativo
Electrodoc	4,6	5,0	Biblioteca de recursos
Proto	4,8	4,5	Simulador
Curso de electricidad	4,3	5,0	Biblioteca de recursos
Manual del electricista	4,7	5,0	Biblioteca de recursos

### Elaboración del instrumento de evaluación

El instrumento de evaluación se diseñó para medir el desempeño de las apps seleccionadas con base en los criterios técnicos y didácticos, usando una escala de 0 a 10 y permitiendo comentarios adicionales. En la Tabla 2, se describe la definición de los criterios de evaluación presentados a los jóvenes evaluadores.

**Tabla 2**

*Instrumento de evaluación de las apps educativas*

	Criterio de evaluación	Descripción
Aspectos técnicos	Interactividad de la aplicación	Evalúa la capacidad de la aplicación para responder de manera efectiva a las acciones del usuario.
	Facilidad de navegación y usabilidad	Mide lo intuitiva y fácil que es la navegación dentro de la aplicación.
	Accesibilidad y disponibilidad	Verifica si la aplicación es accesible para usuarios con discapacidades y está disponible en diferentes regiones.
	Seguridad y privacidad de los datos	Analiza las medidas de protección de datos y la privacidad del usuario implementadas en la aplicación.
	Diseño de interfaz de usuario	Evalúa la apariencia visual y la consistencia del diseño de la interfaz de usuario.
	Compatibilidad global	Comprueba si la aplicación funciona correctamente en diferentes dispositivos y sistemas operativos.
	Rendimiento/velocidad	Mide la rapidez y eficiencia con la que la aplicación realiza tareas.
	Consumo de recursos	Evalúa el uso de recursos del dispositivo, como batería y memoria, por parte de la aplicación.

*(continúa)*

(continuación)

	Criterio de evaluación	Descripción
Aspectos didácticos	Retroalimentación inmediata y personalizada	Evalúa la capacidad de la aplicación para proporcionar retroalimentación rápida y adaptada a cada usuario.
	Variedad de recursos educativos	Mide la diversidad y calidad de los materiales educativos disponibles en la aplicación.
	Adaptabilidad a diferentes niveles de conocimiento	Verifica si la aplicación se ajusta a los distintos niveles de conocimiento de los usuarios.
	Promoción del pensamiento crítico y la resolución de problemas	Analiza cómo la aplicación fomenta habilidades de pensamiento crítico y la capacidad de resolver problemas.
	Contenido educativo	Evalúa la relevancia, precisión y calidad del contenido educativo proporcionado.
	Motivación	Mide la efectividad de la aplicación para mantener a los usuarios interesados y motivados en el proceso de aprendizaje.
	Evaluación formativa	Analiza las herramientas y métodos utilizados por la aplicación para evaluar y apoyar el progreso del aprendizaje de los usuarios

La validación interna del instrumento se realizó con la aplicación de diez cuestionarios. Al evaluar la app Caja de herramientas de electrónica, se obtuvo un alfa de Cronbach de 0,937, lo que indica que el instrumento logra muy alta confiabilidad.

### Aplicación del instrumento de evaluación

Se invitó a los estudiantes, mediante *posters* informativos con códigos QR, a evaluar las apps de su interés. Se les proporcionó el contexto sobre la investigación para fomentar su participación.

## RESULTADOS

Después de dos semanas de la difusión de la actividad, se obtuvieron ochenta y cinco cuestionarios de evaluación. El número de evaluaciones por aplicación no fue homogéneo, ya que cada alumno seleccionó la aplicación de su interés y, después de usarla, respondieron los respectivos cuestionarios en la plataforma Forms de Google. La participación fue baja en relación con la población estudiantil (aproximadamente ciento ochenta alumnos), debido a factores como la coincidencia con el cierre del semestre,

la modalidad virtual de algunas clases y la falta de vinculación con actividades académicas. Además, los estudiantes participaron de forma voluntaria.

Los datos recopilados muestran que de las siete herramientas, la que más despertó interés fue Calculadora electrónica, pues veinticuatro alumnos la usaron y evaluaron. La que menos llamó su atención fue Manual del electricista, pues solo seis alumnos se interesaron. Al respecto, cabe señalar la posibilidad de que el nombre de la aplicación haya sido un factor de desinterés, pues los alumnos no se identificaron como electricistas. Lo mismo sucedió con Curso de electricidad. La Tabla 3 muestra las preferencias de instalación de las aplicaciones.

**Tabla 3**

*Interés de alumnos en las apps de electrónica*

Herramienta	Número de alumnos interesados en evaluar
Caja de herramientas de electrónica	10
Calculadora electrónica	24
Curso de electricidad	9
Electrodoc	8
Manual del electricista	6
Circuit Jam	14
Proto	14
Total	85

En la Tabla 4, se documentaron los resultados obtenidos por cada aplicación respecto a las propiedades tecnológicas. Sobre las propiedades tecnológicas, Circuit Jam obtuvo la menor calificación con 6,94, mientras que Manual del electricista fue la mejor valorada con 9,08 puntos, a pesar de su baja participación. En general, las apps lograron un buen rendimiento, con un puntaje promedio de 8,5. Curso de electricidad destacó con 9,33 puntos, mientras que Circuit Jam tuvo el puntaje más bajo con 7,36. La interactividad fue el aspecto con la menor puntuación para Circuit Jam con solo 6,79.



**Tabla 4***Aspectos tecnológicos de las apps educativas*

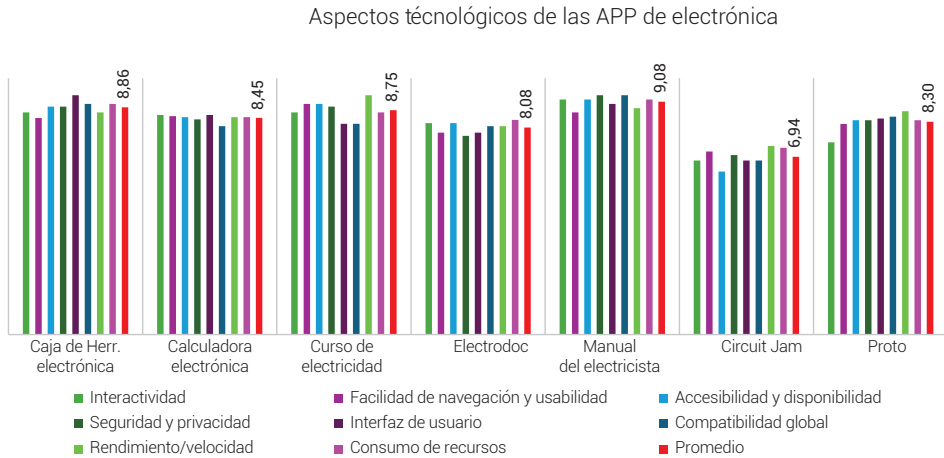
	1	2	3	4	5	6	7	8	Promedio
1. Interactividad									
2. Facilidad de navegación y usabilidad									
3. Accesibilidad y disponibilidad									
4. Seguridad y privacidad									
5. Interfaz de usuario									
6. Compatibilidad global									
7. Rendimiento/velocidad									
8. Consumo de recursos									
Claves de los criterios tecnológicos									
Criterios de evaluación aplicaciones									
Caja de herramientas de electrónica	8,67	8,44	8,89	8,89	9,33	9,00	8,67	9,00	8,86
Calculadora electrónica	8,57	8,52	8,48	8,39	8,57	8,13	8,48	8,48	8,45
Curso de electricidad	8,67	9,00	9,00	8,89	8,22	8,22	9,33	8,67	8,75
Electrodoc	8,25	7,88	8,25	7,75	7,88	8,13	8,13	8,38	8,08
Manual del electricista	9,17	8,67	9,17	9,33	9,00	9,33	8,83	9,17	9,08
Circuit Jam	6,79	7,14	6,36	7,00	6,79	6,79	7,36	7,29	6,94
Proto	7,50	8,21	8,36	8,36	8,43	8,50	8,71	8,36	8,30
Promedio	8,23	8,27	8,36	8,37	8,32	8,30	8,50	8,48	

Nota. El instrumento permite al alumno puntuar de 0 a 10 cada una de las propiedades evaluadas. En la tabla, se indican en color verde los puntajes máximos y en color rojo los puntajes mínimos.

En la Figura 2, se muestran los puntajes asignados a cada herramienta, destacando al Manual del electricista y a la Caja de herramientas de electrónica como las mejor valoradas, mientras que a Circuit Jam como la aplicación con menores puntajes. Los datos muestran que existen pocos juegos de electrónica como Circuit Jam, cuya naturaleza lúdica implique propiedades no evaluadas en el instrumento, como jugabilidad, tipo de juego, calidad de historia y personajes (Figura 2).

**Figura 2**

*Aspectos tecnológicos de las aplicaciones evaluadas*



Respecto a las propiedades didácticas, podemos observar en la Tabla 5 que Manual del electricista fue la mejor valorada con 9,33 puntos, mientras que Electrodoc obtuvo el puntaje más bajo con 8,14. La propiedad didáctica mejor puntuada fue Contenido educativo, con un puntaje promedio de 8,62 y con 9,56 para Curso de electricidad. La retroalimentación inmediata y personalizada fue el criterio con menor puntuación (8,44), y Circuit Jam obtuvo el valor más bajo (7,2) y Manual del electricista el más alto (9,5).

**Tabla 5**

*Resultados sobre los criterios didácticos*

1.	Retroalimentación inmediata y personalizada							
2.	Variedad de recursos educativos							
3.	Adaptabilidad a diferentes niveles de conocimiento							
4.	Promoción del pensamiento crítico y la resolución de problemas							
5.	Contenido educativo							
6.	Motivación							
7.	Evaluación formativa							
Claves de los criterios didácticos								
Criterios de evaluación aplicaciones	1	2	3	4	5	6	7	Promedio
Caja de herramientas de electrónica	8,56	9,00	8,89	8,78	9,11	9,00	8,89	8,89

(continúa)

(continuación)

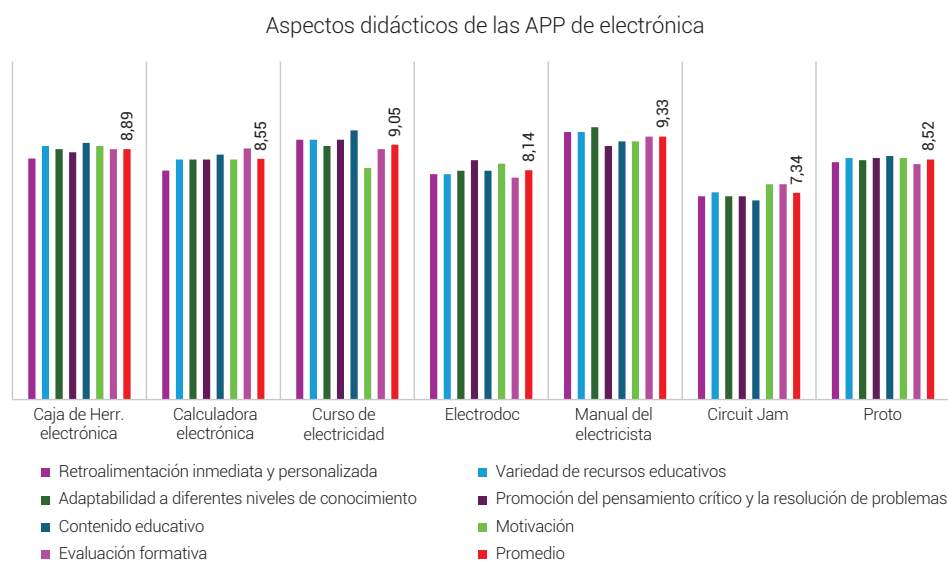
Calculadora electrónica	8,13	8,52	8,52	8,52	8,70	8,52	8,91	8,55
Circuit Jam	7,21	7,36	7,21	7,21	7,07	7,64	7,64	7,34
Curso de electricidad	9,22	9,22	9,00	9,22	9,56	8,22	8,89	9,05
Electrodoc	8,00	8,00	8,13	8,50	8,13	8,38	7,88	8,14
Manual del electricista	9,50	9,50	9,67	9,00	9,17	9,17	9,33	9,33
Proto	8,43	8,57	8,50	8,57	8,64	8,57	8,36	8,52
Promedio	8,44	8,60	8,56	8,54	8,62	8,50	8,56	

Nota. El instrumento permite al alumno puntuar de 0 a 10 cada una de las propiedades evaluadas. En la tabla, se indican en color verde los puntajes máximos y en color rojo los puntajes mínimos.

En la Figura 3, se muestra que Circuit Jam tiene los puntajes más bajos, con un promedio de 7,34. Cabe señalar que, al ser un juego educativo, el contenido no se presenta de manera inmediata a diferencia de las bibliotecas de recursos donde el alumno puede acceder fácilmente a toda la información. En cambio, Manual del electricista obtuvo el promedio más alto. Se destacó en adaptabilidad a diferentes niveles de conocimiento, lo cual es relevante para el centro universitario, ya que puede ser útil a lo largo de la carrera y recomendado por los docentes desde los primeros semestres.

Figura 3

Resultados sobre propiedades tecnológicas de las apps evaluadas



## Resultados cualitativos

El análisis cualitativo se realizó a partir de las respuestas recibidas en el campo "Comentarios". El campo tuvo un formato libre, es decir, de respuesta abierta, por lo que las respuestas fueron muy variadas, incluso algunas fueron neutras o irrelevantes. Respecto a los comentarios favorables, se categorizaron en dos tipos: muy favorables (como "excelente aplicación") y favorables (como "agradable"). También se contabilizaron las recomendaciones para mejorar. Esto ocurrió cuando los evaluadores señalaron carencias, aunque estos comentarios seguían siendo positivos sobre funcionalidad. Bajo estos criterios, se identificaron cinco tipos de comentarios:

1. Comentarios muy favorables: "genial", "excelente", "muy bien".
2. Comentarios favorables: "está bien", "me gustó", "todo bien", "hace lo que debe", "cumple su función".
3. Recomendaciones para mejorar: "creo que le falta mejor interfaz", "le falta X tema", "al principio no le entendía, pero después... (denota falta de usabilidad)".
4. Comentarios neutrales o ajenos: "gracias", "adiós", "ninguno", "sin comentarios".
5. Comentarios sobre dificultad técnica: "no lo pude instalar, me lo prestó un amigo", "no es compatible con mi celular".

Los datos recopilados se pueden observar en la Tabla 6, en la que se han señalado con colores los valores máximos en verde y mínimos en rojo. La aplicación que logró un número mayor de comentarios fue Calculadora electrónica con veinticinco comentarios, de los cuales veintiuno fueron favorables o muy favorables, dos fueron recomendaciones y dos comentarios de dificultad técnica. Por el contrario, el Manual del electricista logró el menor número de comentarios (seis), de los cuales cinco fueron favorables y uno neutro; no obtuvo comentarios muy favorables, recomendaciones ni dificultades técnicas.

**Tabla 6**

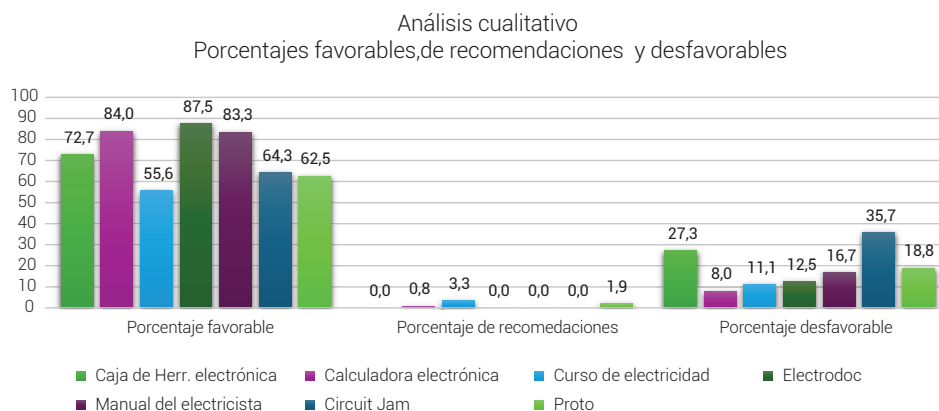
*Resultados sobre los criterios didácticos*

Claves para criterios de evaluación	1. Cometarios muy favorables 2. Comentarios favorables 3. Recomendaciones para mejorar 4. Comentarios neutrales o ajenos 5. Comentarios sobre dificultad técnica					
Criterios de evaluación aplicaciones	1	2	3	4	5	Total de comentarios
Caja de herramientas electrónica	5	3	0	2	1	11
Calculadora electrónica	12	9	2	0	2	25
Curso de electricidad	1	4	3	1	0	9
Electrodoc	3	4	0	0	1	8
Manual del electricista	0	5	0	1	0	6
Circuit Jam	2	7	0	1	4	14
Proto	6	4	3	2	1	16
Total	29	36	8	7	9	89

En la Figura 4, se observa que, de los ochenta y nueve comentarios, el 73 % fueron favorables, el 18 % neutrales o desfavorables y el 9 % recomendaciones. Curso de electricidad tuvo el menor porcentaje de comentarios favorables (55,6 %) y el mayor de recomendaciones (3,3 %). Circuit Jam recibió el mayor porcentaje de comentarios desfavorables o neutros (35,7 %) contra el 64,3 % de comentarios favorables, mientras que las otras aplicaciones no recibieron recomendaciones.

**Figura 4**

*Análisis cualitativo*



## RECOMENDACIONES

Como resultado de los datos observados, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Aprovechar las apps como material didáctico para aumentar el interés de los estudiantes en electrónica, dados su aceptación y uso habitual en teléfonos inteligentes.
- Fomentar el uso de aplicaciones que permitan explorar todos sus recursos para promover la interacción y el autoaprendizaje de los estudiantes.
- Las propiedades técnicas de las apps han sido satisfactorias, pero los alumnos con versiones viejas del Android o con teléfonos con IOS se ven limitados para participar en actividades escolares con estas apps. Por ello, los docentes tendrían que diseñar estrategias alternativas para facilitar la participación de todos los alumnos con el SE.
- Explorar juegos serios para incluirlos en actividades que fomenten la participación y el interés por la electrónica.

## CONCLUSIONES

Este trabajo logró identificar apps educativas en electrónica para nivel superior e identificó la escasa oferta de juegos serios en el área. Además, resaltó la necesidad de instrumentos de evaluación específicos para este tipo de aplicaciones debido a sus características particulares.

Las bibliotecas de recursos fueron las apps mejor valoradas, con alto potencial para su uso académico por su flexibilidad y autonomía. Dado el cambio constante en los escenarios educativos, es importante que los docentes estemos atentos a nuevos materiales y estrategias de aprendizaje. El uso de apps no es obligatorio, pero ignorarlas desaprovecha el trabajo de los especialistas que las desarrollan.

Resulta evidente la necesidad de explorar cómo estas aplicaciones pueden integrarse de forma estructurada en los planes de estudio, no solo como recursos complementarios, sino como herramientas centrales en estrategias de aprendizaje activo. Esto facilitaría su adopción, haría más natural su uso en el aula y fomentaría mayor participación e interés de los estudiantes en su proceso de aprendizaje.

## REFERENCIAS

- Aliaño, Á. M., Duarte Hueros, A. M., Guzmán Franco, M. D., & Aguaded, I. (2019). Mobile learning in university contexts based on the unified theory of acceptance and use of technology (UTAUT). *Journal of New Approaches in Educational Research*, 8(1), 7-17. <https://doi.org/10.7821/naer.2019.1.317>
- Aparicio Gómez, O. Y. (2018). Las TIC como herramientas cognitivas. *Revista Interamericana de Investigación, Educación y Pedagogía*, 11(1), 67-80. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=561059324005>
- Black, P., & Wiliam, D. (2010). Inside the black box: Raising standards through classroom assessment. *Phi Delta Kappan*, 92(1), 139-148. <https://doi.org/10.1177/003172171009200119>
- Cataldi, Z. (2000). *Una metodología para el diseño, desarrollo y evaluación de software educativo* [Tesis de maestría, Universidad Nacional de La Plata]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional de La Plata. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/4055>
- Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública. (2023). *Radiografía de la juventud mexicana*. <https://portalhcd.diputados.gob.mx/PortalWeb/Micrositios/cbe5ac81-008d-460d-8682-60ff10482aac.pdf>
- Crompton, H., & Burke, D. (2018). The use of mobile learning in higher education: A systematic review. *Computers & Education*, 123, 53-64. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2018.04.007>
- Deci, E. L., & Ryan, R. M. (1985). *Intrinsic motivation and self-determination in human behavior*. Springer Science & Business Media.
- Duffy, T. M., & Jonassen, D. H. (1992). *Constructivism and the technology of instruction: A conversation*. Routledge.
- Espinoza, N., Perdomo, B., & Flores, M. (2005). *Criterios y pasos para la evaluación de software educativo* [Ponencia]. IV Congreso Internacional Trujillano de Educación en Matemática y Física, Trujillo, Venezuela. [https://www.researchgate.net/publication/299285719\\_Criterios\\_y\\_pasos\\_para\\_la\\_evaluacion\\_de\\_software\\_educat](https://www.researchgate.net/publication/299285719_Criterios_y_pasos_para_la_evaluacion_de_software_educat)
- Gutiérrez Benítez, J. G., & Acuña Gamboa, L. A. (2022). Evaluación estandarizada de los aprendizajes: una revisión sistemática de la literatura. *CPU-e, Revista de Investigación Educativa*, (34), 321-351. <https://doi.org/10.25009/cpue.v0i34.2800>
- Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81-112. <https://doi.org/10.3102/003465430298487>

- Henríquez Ritchie, P., Organista Sandoval, J., & Lavigne, G. (2013). Nuevos procesos de interactividad e interacción social: uso de *smartphones* por estudiantes y docentes universitarios. *Actualidades Investigativas en Educación*, 13(3), 1-21. <https://doi.org/10.15517/aie.v13i3.12039>
- Hsu, Y.-C., & Ching, Y.-H. (2015). A review of models and frameworks for designing mobile learning experiences and environments. *Canadian Journal of Learning and Technology*, 41(3). <https://doi.org/10.21432/T2V616>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2024). *Encuesta nacional sobre disponibilidad y uso de tecnologías de la información en los hogares (ENDUTIH) 2023* [Comunicado de prensa]. [https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/ENDUTIH/ENDUTIH\\_23.pdf](https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2024/ENDUTIH/ENDUTIH_23.pdf)
- ISO/IEC. (1991). *Software product evaluation – Quality characteristics and guidelines for their use (ISO/IEC Standard No. 9126-1:2001)*. <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/22749/d293dbe1fea54b3e853dfc5a07549390/ISO-IEC-9126-1-2001.pdf>
- Jonassen, D. H. (1991). Evaluación del aprendizaje constructivista. *Tecnología Educativa*, 31(10), 28-33.
- López Hernández, F. A., & Silva Pérez, M. M. (2016). Factores que inciden en la aceptación de los dispositivos móviles para el aprendizaje en educación superior. *Estudios sobre Educación*, 30, 175-195. <https://doi.org/10.15581/004.30.175-195>
- Martínez, R. D., Montero, Y. H., Pedrosa, M. E., & Martín, E. Í. (s. f.). *Sobre herramientas cognitivas y aprendizaje colaborativo*. <https://studylib.es/doc/545449/sobre-herramientas-cognitivas-y-aprendizaje-colaborativo>
- Miranda, J. A. (2024). ¿Qué sistemas operativos dominan México en 2024? *Merca 2.0*. <https://www.merca20.com/que-sistemas-operativos-dominan-mexico-en-2024/>
- Nielsen, J. (1993). *Usability engineering*. Morgan Kaufmann.
- Nielsen, J., & Loranger, H. (2007). *Prioritizing web usability*. Anaya Multimedia.
- Roschelle, J. (2003). Unlocking the learning value of wireless mobile devices. *Journal of Computer Assisted Learning*, 19(3), 260-272. <https://doi.org/10.1046/j.0266-4909.2003.00028.x>
- Sharples, M. (2005). Learning as conversation: Transforming education in the mobile age. En *Proceedings of Conference on Seeing, Understanding, Learning in the Mobile Age*.
- Smith, S. L., & Mosier, J. N. (1986). *Guidelines for designing user interface software*. The MITRE Corporation. [https://rauterberg.employee.id.tue.nl/lecturenotes/DA308/MITRE\(1986\)smith-mosier.pdf](https://rauterberg.employee.id.tue.nl/lecturenotes/DA308/MITRE(1986)smith-mosier.pdf)



- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (2013). *Directrices de política para el aprendizaje móvil*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000219662>
- Unión Europea. (s. f.). *Reglamento general de protección de datos*. Your Europe. [https://europa.eu/youreurope/business/dealing-with-customers/data-protection/data-protection-gdpr/index\\_es.htm](https://europa.eu/youreurope/business/dealing-with-customers/data-protection/data-protection-gdpr/index_es.htm)
- Vygotsky, L. S. (1978). *La mente en sociedad: el desarrollo de los procesos psicológicos superiores*. Harvard University Press. <https://saberepsi.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/09/vygostki-el-desarrollo-de-los-procesos-psicolc3b3gicos-superiores.pdf>



## ARTÍCULOS DE REVISIÓN



# ABSTRACCIÓN DE TECNOLOGÍA SUBYACENTE Y GESTIÓN DE DOMINIOS EN *FRAMEWORKS* DE DESARROLLO: REVISIÓN SISTEMÁTICA DE LITERATURA

NICOLÁS SIMONCINI

<https://orcid.org/0009-0003-6267-115X>

[nsimoncini@frba.utn.edu.ar](mailto:nsimoncini@frba.utn.edu.ar)

Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional,  
Argentina

PABLO PYTEL

<https://orcid.org/0000-0002-3920-1710>

[ppytel@frba.utn.edu.ar](mailto:ppytel@frba.utn.edu.ar)

Facultad Regional Buenos Aires, Universidad Tecnológica Nacional,  
Argentina

Recibido: 26 de enero del 2025 / Aprobado: 14 de abril del 2025

doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.7729>

**RESUMEN.** Tanto las compañías de desarrollo de *software* como las empresas que implementan sus aplicativos *in house* suelen enfocar el diseño de sus productos de *software* utilizando diversos *frameworks* de desarrollo que facilitan, *out of the box*, la rápida implementación de los requisitos funcionales orientados a nichos específicos, como es el caso de aplicaciones web. No obstante, estos suelen perder el foco en la correcta gestión del *backend* en lo que respecta a la gestión de dominios de aplicación y el encapsulamiento y abstracción de las tecnologías subyacentes, es decir, no brindar herramientas o mecanismos de diseño para facilitar dicha abstracción. En este artículo, se pretende, a través de una revisión sistemática de literatura, analizar la existencia de investigaciones académicas que arrojen como resultado metodologías o protocolos válidos para el modelado de *frameworks* orientados al diseño de *backends* que permitan el encapsulamiento y la abstracción de la tecnología subyacente, a través del uso de dominios de aplicación válidos desde la perspectiva ontológica.

**PALABRAS CLAVE:** revisión sistemática de literatura / desarrollo de *software* / *framework* de desarrollo de *software* / ingeniería de dominio / diseño de ontologías

## ABSTRACTION OF UNDERLYING TECHNOLOGY AND DOMAIN MANAGEMENT IN DEVELOPMENT FRAMEWORKS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW

**ABSTRACT.** Both software development companies and companies that implement in-house their applications usually focus the design of their software products using various development frameworks that facilitate “out of the box” the rapid implementation of functional requirements aimed at specific niches as is the case with Web applications, but they often lose focus on the correct management of the backend regarding to the management of application domains and the encapsulation and abstraction of the underlying technologies (that is, not providing tools or mechanisms of design to facilitate such abstraction). The present work aims to analyze, through a systematic literature review, the existence of academic research that results in valid methodologies or protocols for the modeling of frameworks oriented to the design of backends that allow the encapsulation and abstraction of the underlying technology and make use of ontologically valid application domains.

**KEYWORDS:** systematic literature review / software development / software development framework / domain engineering / ontology design

## INTRODUCCIÓN

Es ampliamente conocido en la ingeniería del *software* que la utilización de *frameworks* de desarrollo aporta significativos beneficios en la creación de productos de *software* indistintamente de la plataforma donde se desea realizar la implementación. Entre los principales aportes se pueden destacar los siguientes (Ramirez et al. 2019; Riehle, 2000; Swacha & Kulpa, 2023):

- la posibilidad de reutilizar los artefactos desarrollados en un dominio específico y, por ende, la reducción en los tiempos de desarrollo y el consecuente incremento de la productividad
- la estandarización de patrones de diseño que permite a los desarrolladores enfocarse, más bien, en desarrollar funcionalidades en vez de resolver problemas de arquitectura
- la facilidad en la portabilidad al introducir abstracción y separación de las capas lógicas de las capas técnicas orientadas a la plataforma
- la escalabilidad que permite expandir el *software* desarrollado a medida que este incrementa su grado de complejidad, con el menor costo posible
- la sostenibilidad que se logra gracias a que, por norma general, los *frameworks* evolucionan en línea con las nuevas modas, requisitos de seguridad o nuevas tendencias en tecnología
- el soporte de la comunidad de usuarios para los casos de *frameworks* populares

Paralelamente, el proceso de encapsulamiento de los modelos y requisitos funcionales en dominios de aplicación se ha convertido en una tendencia que ha crecido de forma sostenida en el tiempo (Bjørner, 2006; Cambarieri et al. 2020; Evans, 2004; Johnson & Foote, 1988). Asimismo, la calidad de las estructuras y algoritmos definidos en los modelos puede ser medible y normalizada desde la perspectiva de las ontologías (Alrumaih et al., 2020; Lopez et al., 2011), lo que genera un valor agregado extra al momento de validar calidad.

Por otra parte, dependiendo del contexto del problema a solucionar, existen situaciones en las cuales el producto de *software* debe contar con el requisito de acceder o integrarse con tecnologías desarrolladas por terceras partes (clasificadas como subyacentes), que sirven como herramienta para cumplir su objetivo. Por citar algunos ejemplos, se puede encontrar con motores de bases de datos, librerías de uso común para la gestión de requisitos no funcionales (como la gestión de la resiliencia en los algoritmos) o *hardware* especializado, entre otros. Al mantenerse alineado a las buenas prácticas del diseño de *software*, resulta esperable que lo anterior sea implementado bajo las reglas establecidas por los principios de diseño SOLID (Martin, 2000; Martin

et al., 2018, capítulo III) y, más específicamente, su componente principio de responsabilidad única (*simple responsibility principle*, SRP), con el fin de garantizar tanto la abstracción como el encapsulamiento de las funcionalidades internas.

En este contexto, se considera de importancia verificar, al menos conceptualmente, la existencia de alguna definición de un *framework* que tenga a bien agrupar los conceptos mencionados. En el presente artículo, se tiene como objetivo hallar dichas definiciones en el campo académico a través de una revisión sistemática de literatura. Para ello, primero se describen los principales fundamentos del trabajo (sección 2) y se detalla la metodología aplicada (sección 3). Luego, se indican los resultados obtenidos (sección 4) y su correspondiente análisis (sección 5). Por último, se presenta las conclusiones y principales líneas de trabajo futuro (sección 6).

## FUNDAMENTOS

A medida que el campo de la ingeniería del *software* avanzó a lo largo del tiempo hacia la reutilización de componentes o piezas de *software* para lograr la optimización de recursos y uso del tiempo, diversos conceptos como patrones de diseño/arquitectura (Gamma et al., 2011; Johnson & Foote, 1988; Richards & Ford, 2020), *frameworks* de desarrollo de *software* (Martin, 2000; Stanojevic et al., 2011), gestión de dominios de aplicación (Bjørner, 2006; Cambarieri et al., 2020; Evans, 2004), entre otros, tomaron relevancia de forma progresiva en la materia con el objetivo de proveer las herramientas para tal fin. Si bien el campo académico provee diversos estudios en estos conceptos, se cuenta con pocas evidencias de investigaciones que tengan a bien agrupar y consolidar al menos de forma conceptual una metodología de desarrollo de *frameworks* suficientemente maduro (Ramirez et al., 2019).

En contraparte, se observa en el campo profesional un notorio avance en la oferta y evolución tecnológica de dichas herramientas, pero sin contar con fundamentos académicos de base. Tal es el caso de los *frameworks* de desarrollo orientados a plataformas web (Swacha & Kulpa, 2023). Esto quiere decir que existen diversas opciones, pero orientadas a dominios específicos donde la literatura académica relacionada se encuentra dispersa y carente de un enfoque centralizado y común para cada especificidad (Ramirez et al., 2019). Además, puede observarse casos en los que se plantean *frameworks* de desarrollo cuyo objetivo es la rápida puesta en marcha de proyectos de *software*, pero tienden a obviar las herramientas o mecanismos para la implementación de modelos del dominio recomendables para su aplicación (Ramirez et al., 2019). Entonces, si bien los modelos son tratados como artefactos manipulables dentro de la solución, dejan este espacio a la creatividad del equipo de implementación, sin contar con lineamientos o estructuras de base.



Por otra parte, aunque existen estándares para el diseño y arquitectura de *software* que brindan las herramientas que los proyectos carecen (Evans, 2004), existe poca evidencia científica que corrobore su implementación y uso a través de *frameworks* de desarrollo de software. Asimismo, se cuenta con evidencia académica orientada al estudio de soluciones de *software* para la abstracción de tecnología subyacente, pero que adolece de un enfoque, al menos básico, del uso de dominios de aplicación (Lei et al., 2011).

Finalmente, mediante el proceso de revisión sistemática de literatura propuesto en el presente trabajo de investigación, se intenta hallar puntos en común o equilibrio entre las evidencias académicas relacionadas con *frameworks* de desarrollo de *software*, dominios de aplicación y utilización de la tecnología subyacente a través de diversas preguntas de investigación y bajo un riguroso método de análisis de calidad sobre la información colectada.

## METODOLOGÍA

Con el fin de garantizar la calidad del presente trabajo de investigación, se hace uso exhaustivo de la metodología y los lineamientos propuestos por Kitchenham y Charters (2007) para las revisiones sistemáticas de literatura. Entonces, las revisiones sistemáticas tienen como objetivo presentar una evaluación justa de un tema de investigación mediante el uso de una metodología confiable, rigurosa y auditable (Kitchenham & Charters, 2007).

Por lo tanto, se propone lo siguiente:

- analizar los diferentes enfoques, mecanismos, ejemplos o buenas prácticas para la definición o utilización de *frameworks* de desarrollo de *software* orientados al dominio de forma validable y con la capacidad de abstraer la utilización de tecnologías subyacentes
- evidenciar las posibles áreas de vacancia obtenidas en la investigación con el fin de dejar abierta la expansión de la temática abordada en el marco académico y profesional

Para conseguir dichas metas, en las siguientes subsecciones se detallan los pasos aplicados para llevar a cabo la identificación y procesamiento de los artículos relevantes.

### Formulación de preguntas

Teniendo en cuenta las metas propuestas, en la Tabla 1 se presentan las preguntas de investigación definidas junto con su correspondiente justificación. La incorporación de estas justificaciones permite sustentar adecuadamente la pertinencia de las preguntas planteadas.

**Tabla 1**

*Preguntas de investigación*

Clave	Pregunta de investigación	Justificación
RQ1	¿Qué enfoques son utilizados para la generación de <i>frameworks</i> orientados al diseño de <i>backends</i> y agnósticos a la tecnología subyacente dentro del campo de la ingeniería de <i>software</i> ?	Identificar cuál es el estado del arte vinculado al diseño de <i>frameworks</i> para la implementación de modelos de <i>backends</i> que permitan abstraer la tecnología subyacente indistintamente de la taxonomía.
RQ2	¿Qué enfoques son utilizados para la definición de dominios de aplicación con fundamentos ontológicos en el diseño de <i>backends</i> dentro del marco de la ingeniería de <i>software</i> ?	Identificar cuál es el estado del arte vinculado al modelado de dominios de aplicación ontológicamente válidos.
RQ3	¿Existen estudios que combinen la generación de <i>frameworks</i> capaces de abstraer tecnología subyacente y contar con definición de dominios de aplicación ontológicamente válidos en el diseño de <i>backends</i> dentro del campo de la ingeniería de <i>software</i> ?	Validar si existen casos de estudio que puedan responder RQ1 y RQ2 de forma combinada.
RQ4	¿Qué propuestas de mejora o lecciones aprendidas existen para el proceso de diseño de <i>frameworks</i> agnósticos a la tecnología subyacente con el uso de dominios de aplicación con fundamentos ontológicos para la implementación de <i>backends</i> ?	Analizar los casos que cumplan RQ3 con el fin de identificar recomendaciones para futuras líneas de investigación en la materia.
RQ5	¿Qué conclusiones pueden deducirse de los estudios encontrados?	Validar si existe la posibilidad de plantear futuras líneas de investigación relacionadas al diseño de <i>frameworks</i> para <i>backends</i> que abstraigan la tecnología subyacente y hagan uso de dominios de aplicación ontológicamente válidos.

**Búsqueda**

Con el fin de recuperar de forma efectiva artículos que guarden relación con el objetivo del trabajo de investigación y las preguntas generadas, se crea una cadena de búsqueda booleana capaz de considerar de la mejor manera posible todos los puntos de interés. Resulta primordial en esta etapa contar con estrategias de búsqueda imparciales (Kitchenham & Charters, 2007). Para ello, como primera instancia se identifican las palabras clave y su correspondiente categoría a partir de las preguntas de investigación, tal como se detallan en la Tabla 2.

**Tabla 2**

Selección de palabras clave para la búsqueda con base en las categorías relacionadas

Categoría	Palabras clave
Framework de desarrollo de software	Software, design, development, framework
Dominio de aplicación	Software, domain, "application domain"
Ontología	Ontology
Tecnología subyacente	Underlying, beneath, below, technology

**Definición de criterios de selección**

Con el fin de garantizar la obtención de los estudios más relevantes, se define un proceso de selección. Para ello, se definen los criterios de inclusión y exclusión que deben basarse en las preguntas de investigación (Kitchenham & Charters, 2007) y cuya finalidad es asegurar la inclusión de estudios relevantes al trabajo de investigación. En la Tabla 3, se muestran los criterios de inclusión y exclusión específicos a ser aplicados con los datos obtenidos inicialmente tras la ejecución de la cadena de búsqueda booleana definida en la sección anterior.

**Tabla 3**

Criterio de inclusión y exclusión definidos para el presente trabajo de investigación

Criterio	Inclusión	Exclusión
Contenido	Cualquier estudio que tenga como foco principal o secundario el diseño o desarrollo de un <i>framework</i> de desarrollo	Cualquier estudio que no haga mención del desarrollo o diseño de un <i>framework</i> de desarrollo
Idioma	Inglés y español	Cualquier otro idioma
Tipo de estudio	Cualquier tipo de estudio académico	Fuentes no académicas, artículos de opinión no avaladas o editoriales
Tipo de acceso	Cualquier tipo de acceso académico	Cualquier acceso de pago con imposibilidad de obtener artículos por representación académica
Antigüedad	Publicación en los últimos veinte años	Publicaciones desactualizadas mayores a veinte años
Disponibilidad	Texto completo	Solo resumen o texto completo no disponible
Disciplina	Relacionada al campo de la ingeniería en sistemas de información	Cualquier disciplina que no tenga relación con el campo de la ingeniería en sistemas de información

Asimismo, se han seleccionado las fuentes de búsqueda indicadas en la Tabla 4. Debe notarse que también se toman como válidos los hallazgos provenientes de búsquedas manuales, recomendaciones o por referencias obtenidas desde estudios

previamente analizados, los cuales suelen denominados como seguimiento de referencias o *snowballing* (Greenhalgh & Peacock, 2005).

**Tabla 4**

*Fuentes de consulta bibliográfica utilizadas*

Nombre	Link	Descripción
IEEE Xplore	<a href="https://ieeexplore.ieee.org">https://ieeexplore.ieee.org</a>	Base de datos de investigación para el descubrimiento y acceso a artículos de revistas, actas de congresos, normas técnicas y materiales relacionados sobre informática, ingeniería eléctrica y electrónica y campos afines perteneciente al Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE)
ACM Digital Library	<a href="https://dl.acm.org/">https://dl.acm.org/</a>	Plataforma de investigación, descubrimiento y creación de redes perteneciente a la Asociación de Maquinaria Computacional (ACM) que contiene una completa base de datos bibliográfica centrada exclusivamente en el campo de la informática
Springer Link	<a href="https://link.springer.com/">https://link.springer.com/</a>	Plataforma de información electrónica del campo de las ciencias, la técnica y las ciencias sociales que forma parte del ecosistema Springer Nature
Science Direct	<a href="https://www.sciencedirect.com/">https://www.sciencedirect.com/</a>	Sitio web que brinda acceso a una gran base de datos bibliográfica de publicaciones científicas y médicas de la editorial holandesa Elsevier
SEDICI	<a href="http://sedici.unlp.edu.ar/">http://sedici.unlp.edu.ar/</a>	Repositorio institucional de la Universidad de La Plata, Argentina

Entonces, con el fin de poder refinar el resultado de la búsqueda de los artículos inicialmente obtenidos, tras la ejecución de la cadena de búsqueda en las fuentes de consulta bibliográfica, se define un mecanismo de filtrado sucesivo y progresivo a través de etapas o fases. Para el presente trabajo de investigación, se definieron cuatro filtros (Tabla 5).

**Tabla 5**

*Filtros aplicados al trabajo de investigación*

Filtro	Descripción
Rf0	Ejecución de cadena de búsqueda en las fuentes de consulta bibliográfica
Rf1	Refinamiento mediante el análisis de distancia mínima de dos palabras entre palabras clave
Rf2	Eliminación de artículos repetidos y lectura de título y resumen
Rf3	Lectura completa de artículos con el fin de garantizar la relevancia para el trabajo de investigación

Para poder aplicar el último filtro (Rf3), un hito muy importante en el proceso de revisión sistemática de la literatura dentro de la etapa de selección de artículos primarios fue la evaluación de la calidad (Kitchenham & Charters, 2007). Esta última fase de filtrado proporcionó criterios de inclusión y exclusión aún más detallados y sirvió como medio para ponderar la importancia de los estudios individuales cuando se sintetizaron los resultados. Si bien no existía una definición acordada en lo que se refiere al estudio de calidad, se sugirió que esta debía relacionarse con la medida en que un estudio minimice el sesgo y maximice la validez interna y externa, tal como se muestra en la Tabla 6.

**Tabla 6***Definiciones del concepto de calidad*

Término	Sinónimos	Definición
Sesgo	Error sistemático	La tendencia a producir resultados que se alejan sistemáticamente de los "verdaderos"
Validez interna	Validez	La medida en la que la realización del estudio probablemente evite errores sistemáticos
Validez externa	Universalidad, aplicabilidad	La medida en que los efectos observados en el estudio son aplicables fuera de este

Nota. Adaptado de *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering (EBSE 2007-001)*, de B. A. Kitchenham y S. Charters, 2007, p. 21 ([https://www.elsevier.com/\\_data/promis\\_misc/525444systematicreviewsguide.pdf](https://www.elsevier.com/_data/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf)).

La verificación de la calidad se realiza por medio de la aplicación de cada estudio sobre una lista de verificación en donde cada elemento contiene una pregunta que debe responderse luego de la lectura y comprensión del estudio. Cada pregunta contiene asociado un puntaje de acuerdo con la respuesta específica, por lo que el resultado de la suma de todos los puntajes se denomina puntaje de calidad. Para definir si un artículo posee la calidad suficiente, su puntaje deberá hallarse dentro de un rango numérico específico. Entonces, en la Tabla 7, se detallan los criterios de evaluación de calidad y los puntajes relacionados con este trabajo de investigación.

**Tabla 7**

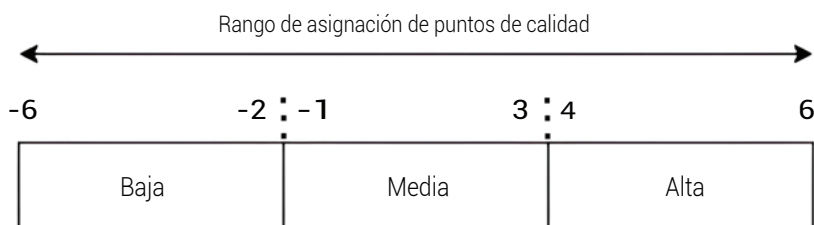
*Criterios de evaluación de calidad definidos para el presente trabajo de investigación*

Clave	Criterio de evaluación	Puntaje	Descripción
QA1	¿El artículo es referenciado por otros estudios de otros autores que guardan relación en la materia con este?	1	2 artículos o más
		0	1 artículo
		-1	Ningún artículo
QA2	¿El artículo responde de forma apropiada las preguntas de investigación?	1	Sí, todas
		0	Al menos la mitad
		-1	No, ninguna
QA3	¿El artículo hace uso de fundamentos técnicos comprobables y basándose en estándares de ingeniería de <i>software</i> ?	1	Sí
		0	Parcialmente
		-1	No
QA4	¿El artículo se encuentra sesgado por intereses particulares o comerciales?	1	No
		0	Parcialmente
		-1	Sí
QA5	¿El artículo menciona problemas, limitaciones o lecciones aprendidas como parte de sus conclusiones?	1	Sí
		0	Parcialmente
		-1	No
QA6	¿El artículo propone la realización de futuras líneas de investigación alineados al objetivo de este?	1	Sí
		0	Parcialmente
		-1	No

Asimismo, debe considerarse que todos los criterios de evaluación cuentan con el mismo peso. Esto quiere decir que cada criterio cuenta con una ponderación media de 1/6 puntos. En la Figura 1, se detalla el rango de asignación de puntos de calidad seleccionado.

**Figura 1**

*Rango de asignación de puntos de calidad*



De la Figura 1 puede interpretarse que un artículo, cuya evaluación de calidad se encuentre en el rango comprendido entre -6 y -2 puntos, será tomado como de baja calidad; mientras que, si se halla en el rango de -1 a 3, será tomado como de calidad media; y, finalmente, dentro del rango entre 4 y 6, será de calidad alta. Para el presente trabajo de investigación, se ha optado incluir todos los estudios cuya calidad supere el valor 1. Es decir, cualquier estudio de calidad media o superior cuenta con un nivel de calidad lo suficientemente óptimo como para ser incluido en la lista de artículos primarios de la revisión.

### Aplicación de proceso de selección

Al comenzar a trabajar con los filtros de selección Rf0 y Rf1, definidos en la Tabla 5, y luego de realizar varias pruebas de ejecución de las cadenas de búsqueda en las fuentes de consulta académica consideradas, se observaron varios problemas que dificultaban el tratamiento homogéneo de la información recabada de lo siguiente:

- La mayoría de las herramientas provistas por las fuentes de consulta carecían de mecanismos de evaluación booleana que utilizan operadores avanzados como NOT, NAND, NOR o XOR, y se limitaron al uso de operadores simples tales como AND y OR, así como el uso de paréntesis para separar palabras y sentencias para generar agrupaciones. Esto dificultó la generación de expresiones booleanas complejas o el uso de reglas de álgebra booleana.
- El proceso de búsqueda se limitó a consultas directas hacia las bases de datos y no solían considerar el uso mecanismos o filtros contextuales en las expresiones. Es decir, no brindaron herramientas para indicar la relación contextual entre palabras clave, como la distancia mínima o máxima requerida entre estas o bien la búsqueda por aproximación, semejanza, pluralización o concordancia entre palabras o sentencias.
- El criterio de agrupamiento por disciplina o subdisciplina no solía ser estándar entre las diversas opciones, por lo que existía la posibilidad de que algunos artículos no fueran incluidos en los resultados de las búsquedas al utilizar dichos filtros.
- En muchos casos existía una limitación de la cantidad máxima de operadores permitidos en una cadena de búsqueda booleana. Esto limitó sensiblemente la correspondencia de la cadena de búsqueda deseada por sobre la calidad y cantidad de resultados esperados.
- No todas las fuentes permitieron la búsqueda sobre los mismos campos. Por lo general, se intentó hacer foco inicialmente sobre los campos más representativos de los estudios e intentar que estos fueran los mismos en todas las fuentes, como el título, el resumen y las palabras clave. Esto solía

denominarse TAK (*title, abstract y keywords*), tal como se ejemplifica en Hinderks et al. (2022, p. 5).

- En determinadas situaciones, y sin un patrón aparente, algunas fuentes de consulta muestran comportamientos erráticos, fallas en sus interfaces de usuario y, en menor medida, los resultados obtenidos pueden no ser determinísticos.
- La cantidad de resultados máximos retornados puede verse fija a un valor arbitrario lo que provoca la necesidad de redefinir la cadena de consulta o los filtros para adaptarse al caso en particular. Esto deriva en un sesgo sobre los resultados y una incompatibilidad entre las diversas fuentes de búsqueda.

Entonces, con el fin de mitigar estos problemas, se concluyó que resultaba necesario implementar un mecanismo genérico que permitiera obtener los resultados por medio de algún método de exportación, desde las fuentes de búsqueda en línea, para luego ser manipulados programáticamente mediante alguna herramienta de *software ad hoc*, y así contar con resultados normalizados y facilitar su manipulación de forma centralizada.

Después de una verificación de las fuentes de consulta seleccionadas, se observó que, en todos los casos, era posible exportar los resultados a diversos formatos estándares como archivos BibTeX, los cuales contienen listas con registros en formato de estructura de datos (BibTeX, s. f.), o bien archivos CSV (Shafranovich, 2005), que contienen listas con registros compuestos por valores separados por comas. Por lo tanto, los autores decidieron implementar la herramienta TFEHelper (Simoncini, 2024), cuyo objetivo era la colección y curación de referencias de artículos académicos. Con esta herramienta fue posible lo siguiente:

- *Importar y exportar*: contenido en formato BibTeX y CSV.
- *Aplicar filtros*: ejecutar consultas avanzadas sobre los datos importados y realizar búsquedas por distancia entre palabras por medio de la expresión lógica NEAR / ONEAR, que permite buscar texto que cumpla con la condición de que dos palabras se hallen separadas por una cantidad específica de palabras intermedias.
- *Interoperar*: acceder de forma homogénea a fuentes de consulta bibliográfica por medio de API públicas para coleccionar referencias (arXiv, CrossRef, Doaj, Eric, Pubmed, Scopus y Springer Link). De esta manera, se evitó acceder a los sitios web de las fuentes para recolectar manualmente los datos.

Entonces, el nuevo proceso de selección inició a partir de la ejecución de la cadena de búsqueda simple en las fuentes académicas de literatura (filtro Rf0). Tomando las palabras clave indicadas en la Tabla 2, sobre la base de recomendaciones académicas



como en Aliyu (2017) y aplicado un proceso de mejora y refinamiento, se obtuvo la cadena de búsqueda de la Tabla 8, con la cual se consiguió un total de 35 005 resultados.

**Tabla 8**

*Cadena de búsqueda*

(software AND development AND framework) OR (software AND development AND framework AND ontology AND domain)
--

Estos resultados fueron exportados al formato CVS y BibTeX para luego ser importados (manualmente o a través de la API correspondiente) en TFEHelper. Haciendo uso de esta herramienta, se filtró Rf1 y se aplicó el filtro NEAR/ONEAR con una distancia máxima de dos palabras para los campos título y resumen. Una vez aplicados estos filtros, se obtuvieron 1142 artículos, que fueron luego procesados para llevar a cabo las fases de filtrado Rf2, Rf3 y QA. Para ello, se decidió utilizar la herramienta Parsifal (Freitas, s. f.), por lo que los datos generados por TFEHelper fueron exportados al formato BibTeX para que, a su vez, pudieran ser importados en Parsifal. Una vez importados los artículos primarios con la herramienta Parsifal, se volcaron de forma manual los contenidos distintivos de cada estudio en la lista de campos definida en la Tabla 9 y se calculó el puntaje de calidad correspondiente. De esta manera, se obtuvieron los once artículos primarios que se detallan a continuación:

- "A Framework for Syntactic and Semantic Quality Evaluation of Ontologies" (Iyer et al., 2021)
- "A Reference Architecture for Ontology Engineering Web Environments" (Braun et al., 2019)
- "A Review of Approaches to Detecting Software Design Patterns" (Assad & Avksentieva, 2024)
- "Application Framework Development and Design Patterns: Current State and Prospects" (Jurišić & Kermek, 2014)
- "Design, Implementation and Evolution of Object Oriented Frameworks: Concepts and Guidelines" (Van Gorp & Bosch, 2001)
- "EDON: A Method for Building an Ontology as Software Artefact" (Reynares et al., 2012)
- "Implementación de una arquitectura de *software* guiada por el dominio" (Cambarieri et al., 2020)
- "Introduction to a Framework for Multi-Modal and Tangible Interaction" (Lo et al., 2010)

- "Models and Frameworks: A Synergistic Association for Developing Component-Based Applications" (Alonso et al., 2014)
- "Ontologías en arquitecturas dirigidas por modelos" (Lopez et al., 2011)
- "Software Framework Construction Based on Plug-In Technology" (Lei et al., 2011)

Finalmente, luego de volcar las referencias en los campos del formulario (Tabla 9) y obtener los once artículos primarios, estas fueron importadas a la herramienta Zotero (s. f.) para ser utilizadas en la documentación del análisis de las secciones 4 y 5 de este artículo.

**Tabla 9**

*Lista de campos del formulario de extracción de datos*

Nombre	Descripción
Fuente	Lista de fuentes académicas desde donde se obtiene el estudio. Para este caso son los anteriormente mencionados: IEEE Xplore, ACM Digital Library, Springer Link, Science Direct y SEDICI. Asimismo, se incluye la fuente manual y <i>snowballing</i> .
Autores	Los autores principales del estudio
Fecha de publicación	La fecha de publicación del estudio
País de publicación	El país de origen de la publicación
Institución de la publicación	Lista de instituciones a las cuales el estudio hace referencia. Puede darse el caso de que el artículo haya sido desarrollado en colaboración entre varias instituciones.
Referencias importantes	Lista de referencias que, en el contexto en el que fueron citadas, resultan relevantes para el estudio por lo que es recomendable ser analizadas. De aquí se desprenden potenciales artículos candidatos a convertirse en primarios para el presente trabajo de investigación. A esta técnica se la denomina <i>backward snowballing</i> (Wohlin, 2014).
Enfoque	Los dos posibles tipos de enfoque del artículo en el cual el estudio está interesado: "dominio y ontología" o bien "tecnología subyacente"
Orientación	Lista de posibles orientaciones temáticas del artículo, como, por ejemplo: "arquitectura de <i>software</i> ", "desarrollo de <i>software</i> ", "diseño de <i>software</i> " o "gestión de las configuraciones"
Ejemplificación	Indica la forma en que el artículo ejemplifica de forma práctica su contenido, por ejemplo: "código fuente", "modelado conceptual" o "ninguno".
Patrones de arquitectura referenciados	Breve descripción del patrón, o los patrones, de arquitectura mencionados en el artículo, si los hubiere
<i>Frameworks</i> referenciados	Breve descripción de los <i>frameworks</i> de desarrollo de <i>software</i> mencionados en el artículo, si los hubiere

(continúa)

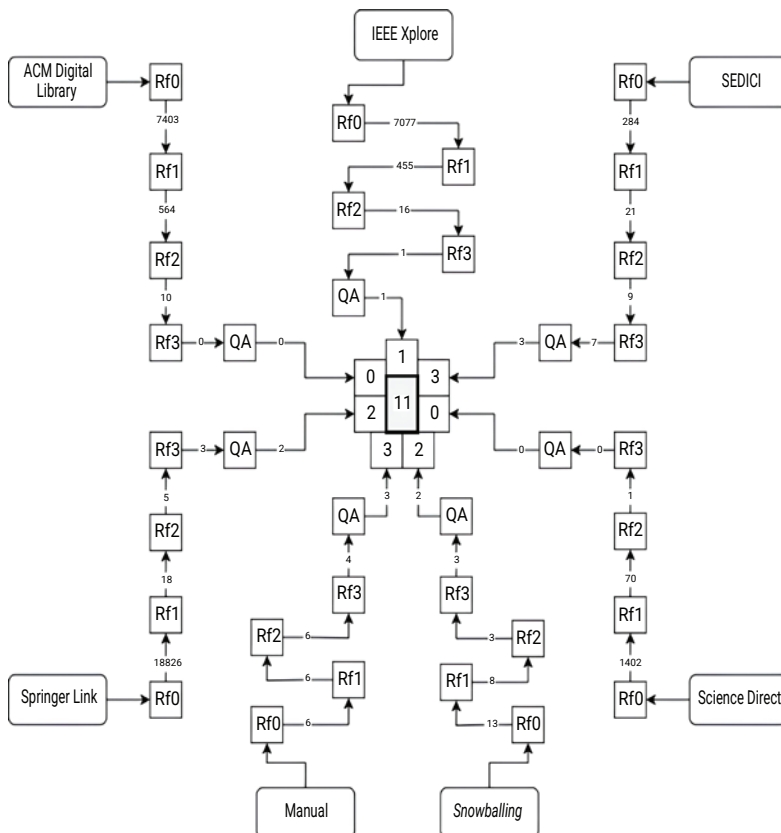
(continuación)

Nombre	Descripción
Lenguajes de programación referenciados	Breve descripción de los lenguajes de programación mencionados en el artículo, si los hubiere
Respuestas a preguntas de investigación	Se compone de cinco campos, uno para cada pregunta de investigación (es decir, de RQ1 a RQ5) en donde, brevemente, se resumen las ideas y posibles respuestas a ser revisadas más adelante.
Respuestas a análisis de calidad	Se compone de seis campos, uno para cada pregunta de calidad (es decir, de QA1 a QA6) en donde se indica el puntaje específico para cada una.
Puntaje de calidad	Sumatoria del valor de los puntos de calidad

A modo de resumen, en las figuras 2 y 3, se puede observar la hoja de ruta completa que resume de forma gráfica todo el proceso aplicado para la selección de los datos para el presente trabajo de investigación.

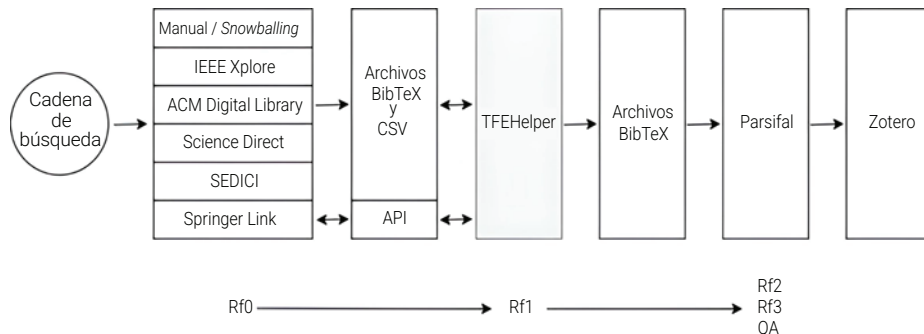
**Figura 2**

Hoja de ruta de la selección de datos



**Figura 3**

*Proceso de selección completo*



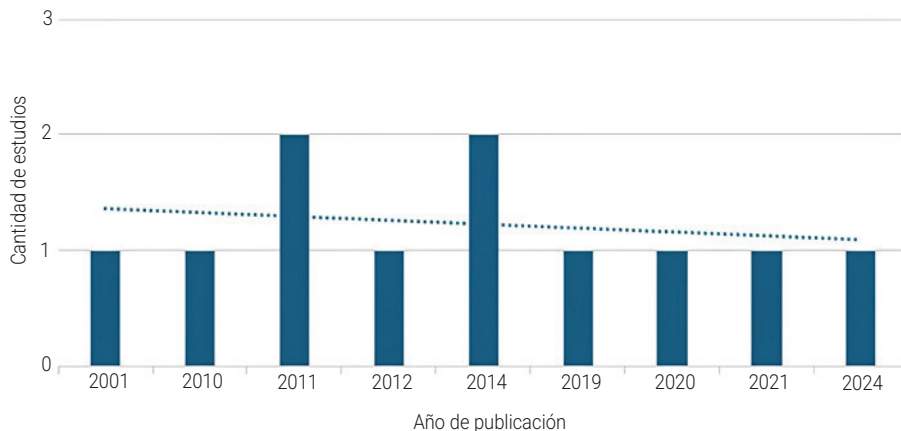
**RESULTADOS**

En esta sección se presenta un resumen de los principales hallazgos de la aplicación de los pasos de la revisión sistemática explicada en la sección anterior.

En la Figura 4, se expone la distribución de los estudios primarios obtenidos en la revisión sistemática según su año de publicación. Esto permitió realizar un análisis de la evolución cronológica de las publicaciones en el campo de estudio. Como puede observarse, la cantidad de artículos primarios obtenidos marcó una tendencia decreciente a través de los años al observar la línea de puntos. Esto explica la notable carencia de interés en el tema de investigación en el campo académico.

**Figura 4**

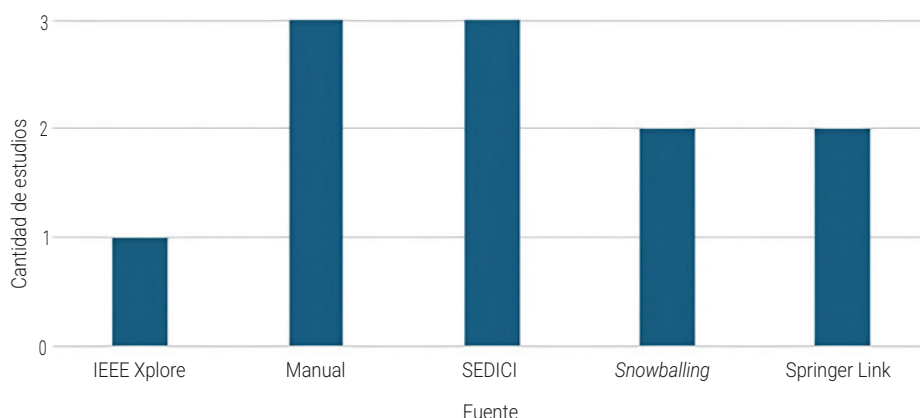
*Distribución de estudios por año de publicación*



Por otro lado, en la Figura 5, puede observarse la distribución de artículos por fuente de consulta tomada de los resultados obtenidos. En este caso, llamó la atención la cantidad de artículos obtenidos por fuentes no convencionales como manual y *snowballing*. Se observa que la suma de la cantidad de artículos de ambas fuentes compone aproximadamente el 45 % del total de los artículos primarios. Esto evidencia el alto grado de complejidad del tema de investigación del presente trabajo, así como una limitada información disponible.

**Figura 5**

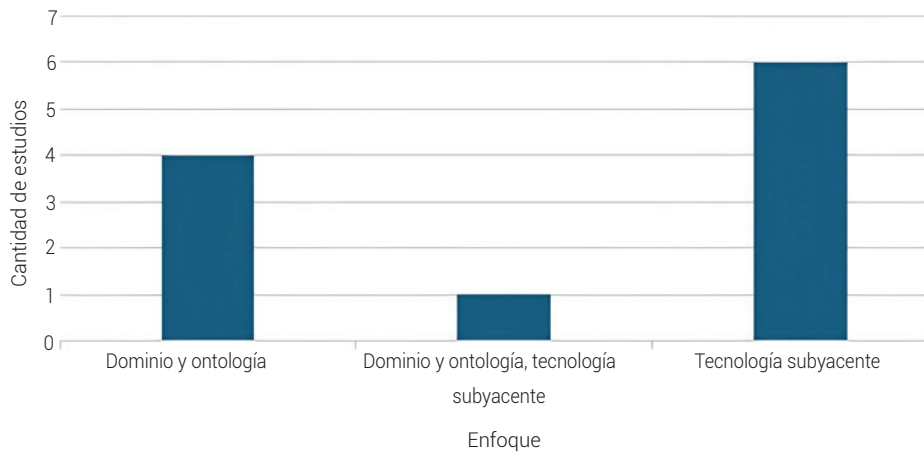
*Distribución de estudios por fuente de consulta*



Desde la perspectiva de las preguntas de investigación, en la Figura 6, puede observarse la clasificación de los artículos obtenidos por el enfoque RQ1 (tecnología subyacente), RQ2 (dominio y ontología) y RQ3 (combinación de ambas). Puede notarse la poca cantidad de artículos que abordan la combinación de ambos enfoques en contraposición con la cantidad de estudios que lo hacen separadamente. Esto explicaría la existencia del área de vacancia en lo referente a *frameworks* de desarrollo de *software* orientados al diseño de *backends* agnósticos a la tecnología subyacente en conjunto con la utilización de dominios de aplicación con fundamentos ontológicos.

**Figura 6**

*Distribución de estudios por tipo de enfoque*



Por último, en la Tabla 10, se analiza la calidad de los artículos recabados indicando de forma discriminada los valores obtenidos del cálculo de los puntajes de los criterios indicados en la Tabla 7. A partir de los valores obtenidos, se pudo detectar que la mayoría de los artículos fue referenciada por otros artículos relacionados con la materia de estudio, por lo que se utilizaron fundamentos técnicos comprobables basándose en los estándares de la ingeniería de *software*; además, no se encontró sesgado por intereses particulares o comerciales y se propusieron futuras líneas de investigación alineadas a la materia. Sin embargo, también se pudo ver que muy pocos artículos respondieron de forma apropiada las preguntas de investigación ni se mencionaron problemas, limitaciones o lecciones aprendidas como parte de sus conclusiones. Este hecho parece indicar la existencia de un área de vacancia para el tema de investigación propuesto en este documento.

**Tabla 10**

*Lista de campos del formulario de extracción de datos*

Criterio de evaluación	Suma de puntos	Porcentaje de artículos
QA1: ¿el artículo es referenciado por otros estudios de otros autores que guardan relación en la materia con este?	6	77,27
QA2: ¿el artículo responde de forma apropiada las preguntas de investigación?	-1	45,45
QA3: ¿el artículo hace uso de fundamentos técnicos comprobables y basándose en estándares de ingeniería de <i>software</i> ?	10	95,45

*(continúa)*

(continuación)

Criterio de evaluación	Suma de puntos	Porcentaje de artículos
QA4: ¿el artículo se encuentra sesgado por intereses particulares o comerciales?	10	95,45
QA5: ¿el artículo menciona problemas, limitaciones o lecciones aprendidas como parte de sus conclusiones?	-5	27,27
QA6: ¿el artículo propone la realización de futuras líneas de investigación alineadas al objetivo de este?	4	68,18

## DISCUSIÓN

Sobre la base de los datos extraídos, en esta sección se realiza un análisis que permite dar cuenta de las publicaciones identificadas para responder las preguntas de investigación definidas.

### RQ1: abstracción de tecnología subyacente

La pregunta RQ1 plantea la necesidad de poder identificar cuál es el estado del arte vinculado al diseño de *frameworks* para la implementación de modelos de *backends* que permitan abstraer la tecnología subyacente indistintamente de la taxonomía. Ante ello, la revisión de la literatura reveló que existen principalmente tres enfoques aplicados a la abstracción de tecnología subyacente en el diseño de *frameworks* de desarrollo orientados al *backend*, los cuales son descritos a continuación:

- *Arquitectura basada en componentes*: también conocida como ingeniería de *software* basada en componentes (*component-based software engineering*, CBSE) o bien como desarrollo orientado a componentes (*component-based development*, CBD) (Heineman & Councill, 2001; Szyperski et al., 2009). Esta metodología cumple con el objetivo de proveer mecanismos para lograr la separación de conceptos por medio del encapsulamiento de las piezas de *software* y la comunicación entre sí por medio de interfaces o contratos específicos. Con esto se logra un bajo nivel de acoplamiento y se incrementa la reutilización. La recomendación por el uso de componentes se refuerza aún más gracias a las evidencias halladas en los artículos primarios donde se referencia el uso de determinados patrones de diseño, tales como *factory* (Gamma et al., 2011, p. 87) y *flyweight* (Gamma et al. 2011, p. 195) (también conocidos como patrones GOF).
- *Arquitectura basada en complementos*: se trata de un patrón arquitectónico de *software*, también conocido como *plugin* (Evans, 2004, p. 475), que tiene como fin brindar la capacidad de interacción entre diversas tecnologías encapsuladas en componentes y basadas en las mismas abstracciones, pero

diseñadas de forma independiente. Por lo general, dichos componentes se conectan a un concentrador central o núcleo que admite los protocolos que necesitan y sabe cómo comunicarse con las interfaces que proporcionan. Esta arquitectura difiere de la orientada a componentes en el hecho de no tener que compartir el núcleo en un mismo espacio de direcciones, sino más bien utilizarlo por medio de contratos o interfaces a través de una librería externa. La incorporación o eliminación de los complementos a la estructura del sistema, por norma general, no debe implicar el reacondicionamiento del núcleo cada vez (es decir, no se requiere rediseño ni reprogramación).

- *Arquitectura basada en capas*: también conocida como estilo de arquitectura n-capas (Richards & Ford, 2020, capítulo 10). Toma las bases establecidas por la arquitectura basada en componentes y hace que estos se agrupen y organicen en conjuntos (capas) horizontales lógicos, cada uno desempeñando de forma aislada una función específica dentro de la aplicación (como lógica de presentación, lógica de negocios o lógica de persistencia de datos). Los artículos primarios obtenidos en el presente trabajo de investigación hacen mención a evoluciones de la arquitectura basada en capas, tales como las arquitecturas hexagonales (también conocidas como "puertos y adaptadores") (Cockburn, 2005; Cockburns & Garrido de Paz, 2024) y las arquitecturas *clean* (Martin et al., 2018).

## RQ2: utilización de dominios de aplicación

La RQ2 plantea la necesidad de poder identificar cuál es el estado del arte vinculado al modelado de dominios de aplicación ontológicamente válidos.

En relación con el enfoque de los *frameworks* de desarrollo orientados a *backends* sobre la aplicación de dominios, puede observarse como principal a las arquitecturas dirigidas por modelos (*model driven architecture*, MDA), que se trata de una metodología que proporciona un conjunto de guías y normas para estructurar especificaciones expresadas como modelos (Standards Development Organization, s. f.). Tiene como premisa la definición de la funcionalidad de un sistema por medio de la creación de modelos independientes de la plataforma (*platform independent model*, PIM) a través de un lenguaje específico para el dominio en particular. Los modelos PIM pueden luego traducirse a modelos específicos de la plataforma (*property management system*, PMS) por medio de herramientas automatizadas. MDA persigue como objetivo mantener separado el diseño de la arquitectura de las tecnologías de construcción y facilita que ambos puedan ser alterados independientemente. En este sentido (Gašević et al., 2006), indica que es posible hacer uso de ontologías en la combinación de MDA y dominios de aplicación; además, refuerza esta teoría proponiendo un marco de trabajo cuyo punto de partida es una ontología y que, por medio de transformaciones, es convertida en un modelo (Lopez et al., 2011).



En el contexto del diseño de *frameworks* de desarrollo de *software* para *backends*, la inclusión de la gestión de dominios de aplicación facilita la adopción de los modelos necesarios en la creación de aplicaciones. Tal como indica Evans (2004, capítulo 4), esto puede realizarse por medio de la inclusión de una capa específica en la que el dominio pueda ser completamente abstraído, tal como propone en su patrón arquitectónico DDD. Idealmente, un *framework* de desarrollo de *software* podría proveer un modelo base (abstracto) de dominio para ser utilizado por la implementación específica, como así también proveer de los mecanismos necesarios para verificar su validez ontológica.

En los artículos primarios recabados, no resulta posible hallar vínculos de forma directa entre la utilización de ontologías en los dominios de aplicación y los *frameworks* de desarrollo. No obstante, diversos estudios presentan variados enfoques en relación con el tratamiento ontológico de dominios de aplicación que pueden ser utilizados para tal fin.

En Iyier et al. (2021), se reconoce como óptimo el análisis de calidad de las ontologías por medio del análisis sintáctico (capacidad de adherencia a las pautas o reglas de desarrollo de una ontología) y semántico (validez de conceptos y relaciones). Toma como premisa que un dominio deba definirse en lenguaje de ontologías (*ontology language overview*) (W3C, s. f.) y propone realizar su evaluación de forma semiautomática por medio del desarrollo de un *framework* materializado en dos aplicaciones de *software*.

Desde la perspectiva sintáctica, define la herramienta SynEvaluator que utiliza un marco de creación de reglas de validación sintáctica que permite a los usuarios definir las de forma no programática durante el tiempo de ejecución y establecer prioridades específicas para cada tarea. Respecto a la semántica, define la herramienta SemValidator que utiliza el *crowdsourcing* e inteligencia artificial para validar la calidad semántica de las ontologías de acuerdo con los resultados obtenidos.

Por su parte, Reynares et al. (2012) plantea la definición de ontologías a través de una metodología iterativa denominada *evolutionary development of ontologies* (EDON). El resultado de esta metodología se observa en componentes reutilizables y ontológicamente validados. Esta metodología propone desarrollar de forma recurrente una ontología que cumpla con los requisitos del ciclo de desarrollo al que pertenece. Partiendo de la conceptualización de una ontología haciendo uso de técnicas para la elicitación de los requisitos, como preguntas de competencia (*competency questions*, CQ) y lenguaje léxico extendido (*language extended lexicon*, LEL), se obtiene la información necesaria sobre el dominio que luego se captura como objetos, relaciones y propiedades usando herramientas destinadas a la creación de ontologías, como Protégé (Stanford Center for Biomedical Informatics Research, s. f.). Finalmente, las salidas de dichas herramientas son traducidas a lenguaje de programación para luego ser importadas en los proyectos de *software* específicos.

### **RQ3: abstracción de tecnología subyacente y uso de dominios de aplicación**

La RQ3 plantea la necesidad de validar la existencia de casos de estudio que respondan las preguntas RQ1 y RQ2 de forma combinada. Es decir, estudios que abarquen el estado del arte vinculado al diseño de *frameworks* para la implementación de modelos de *backends* que permitan abstraer la tecnología subyacente indistintamente de la taxonomía y que, a su vez, contemplen el modelado de dominios de aplicación ontológicamente válidos.

No obstante, a partir del proceso de análisis aplicado sobre los once artículos resultantes de la búsqueda, no ha sido posible encontrar casos en los que se desarrolle la combinación planteada en la pregunta de investigación RQ3. Esto indica que, al momento de la confección del presente documento de investigación, no hubo artículos académicos disponibles que cumplieran con los criterios de búsqueda establecidos para validar la existencia de estudios que abarcaran tal combinación.

Si bien este trabajo de investigación se enfoca en mantener los lineamientos establecidos por un protocolo asociado a una revisión sistemática de literatura formal, la escasez de artículos académicos presenta como oportunidad considerar la existencia de artículos producidos por profesionales en la ingeniería de sistemas de información o ingeniería de *software* que se hallen fuera de los repositorios académicos y, por ende, sin referato. Para ello, se toma como guía lo propuesto por Vahid Garousi et al. (2019), con el fin de incluir evidencias obtenidas de la literatura gris en el campo profesional sin afectar los resultados y la calidad del trabajo de investigación.

Por lo anterior, se tomaron las siguientes consideraciones para la búsqueda de literatura producida en el campo profesional:

- artículos que respondan a la cadena de búsqueda establecida en la sección 3.2
- artículos que cuenten con una antigüedad no superior a los diez años
- artículos cuyo contenido pueda ser reproducido y validado empíricamente, así como refiera a tecnologías o mecanismos conocidos y demostrables
- autores que cuenten con más de cincuenta seguidores en la plataforma donde se publica el artículo o bien cuente con al menos cinco artículos publicados
- fuentes o repositorios conocidos en el campo profesional

A continuación, se evidencian algunos casos obtenidos fuera del marco académico.

En Negrin (2024), el autor demostró cómo es posible combinar el uso de Spring (s. f.), un *framework* de desarrollo para el lenguaje de programación Java utilizando los lineamientos establecidos por DDD (Evans, 2004) y la arquitectura hexagonal

(Cockburn, 2005; Cockburn & Garrido de Paz, 2024). El *framework* Spring ofrece abstracción de tecnología subyacente por medio de sus componentes, mientras que el uso de DDD, entre otras cosas, provee un mecanismo de encapsulamiento de dominios de aplicación. Si bien el artículo puede ser tomado como evidencia para responder la pregunta de investigación RQ3, resulta importante destacar que no menciona mecanismos para la validación de dominios desde la perspectiva de la ontología.

Por otro lado, Martins (2024) explica cómo la empresa Mercado Libre ha evolucionado su mecanismo para el proceso de desarrollo de *software* utilizando el modelo PaaS. De esta manera, ha logrado proveer a sus ingenieros no solo las herramientas necesarias por medio de *frameworks* de desarrollo de *software* para garantizar el encapsulamiento de la tecnología subyacente al momento de generar las aplicaciones, sino también una plataforma centralizada para el gobierno de la infraestructura de forma agnóstica al proveedor de servicios de la nube. Si bien el artículo no menciona la gestión de dominios, la empresa cuenta con una alianza estratégica con la empresa OpenAI, lo que probablemente posibilite considerar dicho aspecto en el futuro.

Finalmente, tenemos a ASP.NET Boilerplate (s. f.), un *framework* de desarrollo de *software* para la plataforma .NET que hace uso de la arquitectura multicapa y se encuentra basado en los principios establecidos por DDD, lo que facilita la gestión de dominios de aplicación. Si bien la documentación del *framework* no especifica soportar la abstracción de tecnología subyacente, esto puede ser implementado gracias a que cuenta con la capacidad de inyección de dependencias de forma nativa. Asimismo, provee la capacidad de conectarse al ORM nativo de .NET (*entity framework*), por lo que, de forma indirecta, provee un mecanismo de abstracción al acceso a la base de datos. Al igual que en los casos anteriores, el *framework* no provee mecanismos para validar ontológicamente los dominios utilizados, pero, gracias a su extensibilidad, esta característica podría ser implementada en un futuro.

#### RQ4: propuestas de mejora o lecciones aprendidas

La RQ4 plantea la necesidad de analizar los casos que cumplan RQ3 con el fin de identificar recomendaciones para futuras líneas de investigación en la materia, es decir, en los artículos analizados que cumplan con la combinación de estudios relacionados a *frameworks* de desarrollo de *software* capaces de posibilitar la abstracción de tecnología subyacente y contar con el uso de dominios de aplicación ontológicamente válidos en el diseño de *backends*.

Tal como se indicó anteriormente, no ha sido posible encontrar casos en los que se desarrolle la combinación planteada en la pregunta de investigación RQ3, lo que impide el desarrollo formal de esta sección. No obstante, se plantea como alternativa analizar las propuestas de lecciones aprendidas de los artículos analizados agrupando los que corresponden a las preguntas RQ1 y RQ2 de forma separada.

Respecto a la abstracción de tecnología subyacente (RQ1), Cambarieri et al. (2020) plantean la necesidad de un cambio revolucionario en la forma de escribir *software*, en donde prime el enfoque en dominios, DDD y arquitecturas hexagonales, con el fin de agilizar los tiempos en el desarrollo de *software*. No obstante, tanto Cambarieri et al. (2020) como Van Gorp y Bosch (2001) reconocen que la implementación de *frameworks* de desarrollo de *software* puede ser desafiante como también puede presentar dificultades al momento de ser utilizado en *software* preexistente, por lo que se plantea que los *frameworks* sean definidos como pequeños módulos o componentes combinables, de acuerdo con las necesidades particulares de los diseñadores de *software*.

Respecto a la utilización de dominios de aplicación (RQ2), todos los estudios coinciden en la recomendación de definir los dominios como piezas de *software* independientes capaces de ser utilizados por las aplicaciones por medio de una interfaz común y estandarizada. Sin embargo, Reynares et al. (2012) reconocen que, en su caso de estudio, no cuentan con las pautas suficientes como para agrupar y clasificar correctamente los modelos y validar las ontologías. Asimismo, Cambarieri et al. (2020) plantean mejorar el suyo utilizando lenguajes específicos de dominio (*domain specific languages*, DSL) y la programación generativa (*generative programming*, GP) para contar con un enfoque de reutilización proactivo, de familias de productos relacionados por algún dominio en particular, en lugar de productos independientes.

#### RQ5: conclusiones obtenidas de los estudios primarios

Finalmente, la RQ5 plantea la necesidad de validar si existe la posibilidad de proponer futuras líneas de investigación relacionadas al diseño de *frameworks* para *backends* que abstraigan la tecnología subyacente y hagan uso de dominios de aplicación ontológicamente válidos.

De los artículos primarios obtenidos se puede concluir lo siguiente:

- El interés en el marco académico en los temas planteados en el presente trabajo de investigación ha disminuido a través de los años, mientras que, en el marco profesional, se ha incrementado notoriamente, lo que deja un valle temporal carente de información formal y actualizada sobre la materia.
- Los sistemas modernos no utilizan ontologías debido a diversas causas, por ejemplo, complejidad, evolución continua del negocio, la no existencia de mecanismos estandarizados, no contar con *frameworks* de desarrollo que promuevan su utilización o bien por desconocimiento en la materia.
- El uso de inteligencia artificial puede ayudar significativamente en la ejecución de tareas para las cuales se requiere experiencia en campos particulares, como los dominios de aplicación y la validación de las ontologías.

Por todo lo anterior, se ha detectado como área de vacancia la definición de un *framework* de desarrollo orientado a la creación de aplicaciones empresariales que combinen la abstracción de tecnología subyacente con el uso de dominios de aplicación, y que tengan como característica la capacidad de validar los dominios de aplicación por medio de ontologías.

## CONCLUSIONES

En cuanto a la implementación de la abstracción de tecnología subyacente, los estudios primarios obtenidos indican que los *frameworks* de desarrollo de *software* podrían hacer uso de arquitecturas basadas en componentes (Alonso et al., 2014, Asaad & Avksentieva, 2024; Lo et al., 2010; Van Gurp & Bosch, 2001), complementos (Lei et al. 2011) o bien en capas (Cambarieri et al., 2020; Jurišić & Kermek, 2014; Lo et al., 2010). De acuerdo con la cantidad de referencias y calidad asociada a los artículos que la refieren, la primera opción resulta ser la más válida.

Respecto a la gestión de dominios de aplicación, se observa como recomendación el uso de arquitecturas dirigidas por modelos (Lopez et al., 2011) o componentes (Reynantes et al., 2012) y la implementación de algún mecanismo que permita la ejecución de análisis sintáctico y semántico en los dominios (Braun et al., 2019; Iyer et al., 2021), aunque la cantidad y calidad de los artículos pudiera no ser suficiente para tal conclusión.

No se han hallado artículos primarios que aborden la combinación de ambos enfoques, por lo que no puede inferirse recomendaciones al respecto. Asimismo, queda evidenciado que la investigación en este campo se ha visto mermada a través de los años en contraposición con la gran adopción de las tecnologías relacionadas, por lo que resulta importante aprender las causas.

Se observan las siguientes propuestas de investigación:

- estudios de casos y experiencias en la utilización de *frameworks* de desarrollo de *software* propietario en el ambiente empresarial
- estudios sobre la usabilidad de ontologías en la ingeniería del *software* en la actualidad
- exploración del uso de la inteligencia artificial para la validación de dominios y modelos por medio de ontologías

Tal como se adelantó en el acápite sobre RQ5, se detectó como área de vacancia la definición de los lineamientos necesarios para la creación de *frameworks* de desarrollo de *software* orientados a *backends* que permitan abstraer el uso de tecnología subyacente y que cuenten con la capacidad de validar dominios de aplicación por medio de ontologías.

Por otro lado, se observa como oportunidad el desarrollo de un trabajo de investigación que tenga como objetivo definir formalmente un modelo de *framework* de desarrollo de *software* basado en el patrón arquitectónico hexagonal y limpio, orientado a componentes y DDD que pueda ser tomado como base para la generación de *frameworks* de desarrollo para la construcción de *software backend* en el ámbito empresarial. La definición de dicho *framework* de desarrollo podría contar con la capacidad de brindar herramientas para la abstracción de tecnología subyacente, así como el tratamiento de dominios de aplicación y las correspondientes validaciones ontológicas.

Finalmente, resulta evidente que quedan amplias oportunidades para que futuros estudios continúen aportando conocimientos relevantes, tanto para la comunidad científica como para la práctica profesional.

## REFERENCIAS

- Aliyu, M. (2017). Efficiency of Boolean search strings for information retrieval. *American Journal of Engineering Research*, 6(11), 216-222. [https://www.ajer.org/papers/v6\(11\)/ZA0611216222.pdf](https://www.ajer.org/papers/v6(11)/ZA0611216222.pdf)
- Alonso, D., Sánchez-Ledesma, F., Sánchez, P., Pastor, J. A., & Álvarez, B. (2014). Models and frameworks: A synergistic association for developing component-based applications. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 687346. <https://doi.org/10.1155/2014/687346>
- Alrumaih, H., Mirza, A., & Alsalamah, H. (2020). Domain ontology for requirements classification in requirements engineering context. *IEEE Access*, 8, 89899-89908. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2993838>
- Asaad, J., & Avksentieva, E. (2024). A review of approaches to detecting software design patterns. *2024 35th Conference of Open Innovations Association (FRUCT)*, 142-148. <https://doi.org/10.23919/FRUCT61870.2024.10516345>
- ASP.NET Boilerplate. (s. f.). *Web application framework*. <https://aspnetboilerplate.com/>
- BibTeX. (s. f.). *Your BibTeX resources*. <https://www.bibtex.org/>
- Bjørner, D. (2006). *Software engineering. 3: Domains, requirements, and software design*. Springer.
- Braun, G. A., Estevez, E., & Fillottrani, P. (2019). A reference architecture for ontology engineering web environments. *Journal of Computer Science and Technology*, 19(01), e03. <https://doi.org/10.24215/16666038.19.e03>

- Cambarieri, M., Difabio, F., & García Martínez, N. (2020). Implementación de una arquitectura de *software* guiada por el dominio. En *XXI Simposio Argentino de Ingeniería de Software (ASSE 2020) - JAIIO 49 (Modalidad virtual)* [Simposio]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/115198>
- Cockburn, A. (2005, 4 de enero). The hexagonal (ports & adapters) architecture. *Alistair Cockburn*. <https://alistair.cockburn.us/hexagonal-architecture/>
- Cockburn, A., & Garrido de Paz, J. M. (2024). *Hexagonal architecture explained. How the ports & adapters architecture simplifies your life, and how to implement it*. Humans and Technology Inc.
- Evans, E. (2004). *Domain-driven design: Tackling complexity in the heart of software*. Addison-Wesley.
- Freitas, V. (s. f.). *Parsifal* [Registro de datos]. GitHub. <https://github.com/vitorfs/parsifal>
- Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., & Vlissides, J. (2011). *Design patterns: Elements of reusable object-oriented software*. Addison-Wesley.
- Garousi, V., Felderer, M., & Mäntylä, M. V. (2019). Guidelines for including grey literature and conducting multivocal literature reviews in software engineering. *Information and Software Technology, 106*, 101-121. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2018.09.006>
- Gašević, D., Djurić, D., & Devedžić, V. (2006). *Model driven architecture and ontology development*. Springer.
- Greenhalgh, T., & Peacock, R. (2005). Effectiveness and efficiency of search methods in systematic reviews of complex evidence: Audit of primary sources. *BMJ, 331*(7524), 1064-1065. <https://doi.org/10.1136/bmj.38636.593461.68>
- Heineman, G. T., & Councill, W. T. (Eds.). (2001). *Component-based software engineering: Putting the pieces together*. Addison-Wesley.
- Hinderks, A., Domínguez Mayo, F. J., Thomaschewski, J., & Escalona, M. J. (2022). Approaches to manage the user experience process in agile software development: A systematic literature review. *Information and Software Technology, 150*, 106957. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2022.106957>
- Iyer, V., Sanagavarapu, L. M., & Reddy, R. (2021). *A framework for syntactic and semantic quality evaluation of ontologies*. En R. Krishnan, H. R. Rao, S. K. Sahaym, S. Samtani & Z. Zhao (Eds), *Secure knowledge management in the artificial intelligence era* (pp. 73-93). [https://doi.org/10.1007/978-3-030-97532-6\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-030-97532-6_5)
- Johnson, R. E., & Foote, B. (1988). Designing reusable classes. *Journal of Object-Oriented Programming, 1*(2), 22-35.

- Jurišić, M., & Kermek, D. (2014). Application framework development and design patterns: Current state and prospects. *Central European Conference on Information and Intelligent Systems*, 306-344.
- Kitchenham, B. A., & Charters, S. (2007). *Guidelines for performing systematic literature reviews in software engineering version 2.3*. Keele University. [https://www.elsevier.com/\\_data/promis\\_misc/525444systematicreviewsguide.pdf](https://www.elsevier.com/_data/promis_misc/525444systematicreviewsguide.pdf)
- Lei, G., Yu, F., & Shulin, P. (2011). Software framework construction based on plug-in technology. En *2011 International Conference on Computational and Information Sciences* (pp. 762-764). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCIS.2011.255>
- Lo, K. W. K., Tang, W. W. W., Ngai, G., Chan, S. C. F., & Tse, J. T. P. (2010). Introduction to a framework for multi-modal and tangible interaction. *2010 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (pp. 3001-3007). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICSMC.2010.5641977>
- Lopez, G., Servetto, A. C., Echeverría, A., Jeder, I., Grossi, M. D., & Jiménez Rey, E. M. (2011). Ontologías en arquitecturas dirigidas por modelos. En *XIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*. Repositorio Institucional de la UNLP. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/20065>
- Martin, R. C. (2000). Design principles and design patterns. *Object Mentor*, 1(34), 597. <http://labs.cs.upt.ro/labs/ip2/html/lectures/2/res/Martin-PrinciplesAndPatterns.PDF>.
- Martin, R. C., Grenning, J., Brown, S., & Henney, K. (2018). *Clean architecture: A craftsman's guide to software structure and design*. Prentice Hall.
- Martins, J. M. (2024, 26 de febrero). The technological evolution at Mercado Libre. *Mercado Libre Tech*. <https://medium.com/mercadolibre-tech/the-technological-evolution-at-mercado-libre-fb269776a4e8>
- Negrin, J. (2024, mayo 7). Construyendo una RESTful API con Spring Boot: integración de DDD y arquitectura hexagonal. *Medium*. <https://medium.com/@juannegrin/construyendo-una-restful-api-con-spring-boot-integraci%C3%B3n-de-ddd-y-arquitectura-hexagonal-af824a3a4d05>
- Ramirez, M. O. G., De-la-Torre, M., & Monsalve, C. (2019). Methodologies for the design of application frameworks: Systematic review. En *2019 8th International Conference On Software Process Improvement (CIMPS)* (pp. 1-10). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CIMPS49236.2019.9082427>
- Reynares, E., Caliusco, L., & Galli, R. (2012). EDON: A method for building an ontology as software artefact. En *XIII Argentine Symposium on Software Engineering (ASSE 2012) (XLI JAIIO, La Plata, 27 al 31 de agosto de 2012)* (pp. 324-338). <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/124015>



- Richards, M., & Ford, N. (2020). *Fundamentals of software architecture: An engineering approach*. O'Reilly.
- Riehle, D. (2000). *Framework design: A role modeling approach* [Tesis de doctorado, Swiss Federal Institute of Technology Zurich]. Research Collection ETH Zurich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-003867001>
- Shafranovich, Y. (2005). *RFC 4180: Common format and MIME type for comma-separated values (CSV) files*. IETF Datatracker. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4180>
- Simoncini, N. (2024). *TFEHelper: A tool for the collection and curation of academic articles references* [Registro de datos]. GitHub. <https://github.com/nicolassimoncini/TFEHelper>
- Spring. (s. f.). *Spring framework* [Software]. <https://spring.io/>
- Standards Development Organization. (s. f.). *MDA Specifications*. <http://www.omg.org/mda/specs.htm>
- Stanford Center for Biomedical Informatics Research. (s. f.). *Protégé* [Software]. Universida de Standford. <https://protege.stanford.edu/>
- Stanojevic, V., Vlajic, S., Milic, M., & Ognjanovic, M. (2011). Guidelines for framework development process. *2011 7th Central and Eastern European Software Engineering Conference (CEE-SECR)*, 1-9. <https://doi.org/10.1109/CEE-SECR.2011.6188465>
- Swacha, J., & Kulpa, A. (2023). Evolution of popularity and multiaspectual comparison of widely used web development frameworks. *Electronics*, *12*(17), 3563. <https://doi.org/10.3390/electronics12173563>
- Szyperki, C., Gruntz, D. W., & Murer, S. (2009). *Component software: Beyond object-oriented programming* (2.ª ed.). Addison-Wesley.
- Van Gorp, J., & Bosch, J. (2001). Design, implementation and evolution of object oriented frameworks: Concepts and guidelines. *Software: Practice and Experience*, *31*(3), 277-300. <https://doi.org/10.1002/spe.366>
- W3C. (s.f.). *OWL. Web ontology language. Overview*. <https://www.w3.org/TR/owl-features/>
- Wohlin, C. (2014). Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering. En M. Shepperd, T. Hall & I. Myrtveit (Eds.), *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering* (pp. 1-10). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2601248.2601268>
- Zotero. (s. f.). *Your personal research assistant*. Digital Scholarship. <https://www.zotero.org/>



# UNA REVISIÓN SISTEMÁTICA DE SISTEMAS DE GENERACIÓN AUTOMÁTICA DE RUTAS

GIAN PAUL IPARRAGUIRRE LEYVA  
<https://orcid.org/0009-0001-1662-338X>  
2020100193@ucss.pe  
Universidad Católica Sedes Sapientiae, Perú

MARCO ANTONIO CORAL YGNACIO  
<https://orcid.org/0000-0001-6628-1528>  
mcoral@ucss.edu.pe  
Universidad Católica Sedes Sapientiae, Perú

Recibido: 2 de marzo del 2025 / Aprobado: 25 de abril del 2025  
doi: <https://doi.org/10.26439/interfases2025.n021.7797>

**RESUMEN.** La generación automática de rutas es una herramienta esencial para optimizar la logística, ya que permite reducir costos operativos y mejorar la sostenibilidad en diversos escenarios. En este artículo, se presenta una revisión sistemática de literatura sobre generación automática de rutas basada en la metodología de Kitchenham, que se estructura en tres fases: planificación, realización e informe. Mediante el análisis de artículos relevantes obtenidos de bases de datos como Scopus y ScienceDirect, se identificaron cincuenta estudios relevantes después de las etapas de cribado. Además, se obtuvieron técnicas, modelos y tecnologías avanzadas que abordan los principales desafíos de la planificación logística, incluyendo la adaptación a entornos dinámicos y la toma de decisiones en tiempo real. Los hallazgos destacaron el impacto positivo de los algoritmos híbridos y las tecnologías emergentes como el internet de las cosas y la conectividad de vehículos, lo que ha mejorado significativamente la eficiencia operativa y la sostenibilidad. Sin embargo, persisten retos en su implementación en áreas con infraestructura limitada, lo que subraya la necesidad de soluciones más accesibles y adaptativas para contextos diversos.

**PALABRAS CLAVE:** rutas / planificación logística / eficiencia operativa / algoritmos híbridos / tecnologías emergentes

## A SYSTEMATIC REVIEW OF AUTOMATIC ROUTE GENERATION SYSTEMS

**ABSTRACT.** Automatic route generation is an essential tool for optimizing logistics, as it reduces operating costs and improves sustainability in a variety of scenarios. This work presents a systematic literature review based on the Kitchenham methodology, which

is structured in three phases: planning, execution and reporting, through the analysis of relevant articles obtained from databases such as Scopus and ScienceDirect, 50 relevant studies were identified after the screening stages, Advanced techniques, models, and technologies were obtained that address the main challenges of logistics planning, including adaptation to dynamic environments and real-time decision-making. The findings highlight the positive impact of hybrid algorithms and emerging technologies such as the Internet of Things and vehicle connectivity, significantly improving operational efficiency and sustainability. However, challenges persist in their implementation in areas with limited infrastructure, underscoring the need for more accessible and adaptive solutions for diverse contexts.

KEYWORDS: logistics planning / operational efficiency / hybrid algorithms / emerging technologies

## INTRODUCCIÓN

La logística moderna enfrenta desafíos crecientes debido a la alta demanda en la distribución de bienes y servicios, especialmente en entornos urbanos donde las restricciones de tiempo y espacio complejizan la planificación. En este sentido, la generación automática de rutas se ha consolidado como una solución clave que permite la optimización de recursos y la reducción de costos operativos (Cui et al., 2022).

Desde sus inicios, la planificación de rutas ha evolucionado de enfoques manuales hacia métodos computacionales avanzados, impulsados por algoritmos de optimización y aprendizaje automático (Arifuddin et al., 2024). La incorporación de tecnologías como los algoritmos genéticos y los enfoques híbridos y la optimización por enjambre de partículas, ha permitido abordar problemas complejos, como la distribución de última milla y la integración de vehículos autónomos en redes logísticas (Hu et al., 2024; Zhao et al., 2024).

Sin embargo, a pesar de estos avances, persisten importantes desafíos, como la adaptabilidad de los modelos a entornos dinámicos, la integración de flotas heterogéneas y la optimización en tiempo real, factores que dificultan la implementación efectiva de estas soluciones (Nouicer et al., 2023). Además, escenarios logísticos específicos, como las restricciones de ventanas de tiempo y costos diferenciados, representan limitaciones adicionales que deben resolverse para lograr sistemas logísticos más eficientes y sostenibles (Y. Shi et al., 2023).

En años recientes, se han desarrollado una variedad de enfoques innovadores para la generación automática de rutas, incluidos algoritmos basados en heurísticas, como el algoritmo de colonia de hormigas mejorado (Guan & Li, 2023) y métodos híbridos que integran técnicas tradicionales con aprendizaje profundo (Y. Zhou et al., 2022). También han surgido modelos específicos diseñados para contextos emergentes, como flotas de drones heterogéneos y vehículos eléctricos, destacando la versatilidad de estos sistemas (Sang et al., 2024; Wang et al., 2023).

Aunque estas investigaciones han logrado avances significativos, muchas de ellas no se adaptan a escenarios logísticos complejos, como entornos urbanos densos o regiones con infraestructura limitada (Jiang et al., 2024). Esto nos motiva a realizar una revisión sistemática de literatura con el propósito de identificar y analizar las técnicas más avanzadas en la generación automática de rutas evaluando su efectividad y viabilidad en diferentes contextos logísticos. Asimismo, se busca ofrecer una visión integral del estado del arte al destacar aquellas propuestas que mejor se adapten a los desafíos contemporáneos en la optimización de rutas (X. Zhou et al., 2024).

Para abordar este objetivo, el trabajo sigue los lineamientos de la metodología de (Kitchenham et al., 2009) utilizando las bases de datos Scopus y ScienceDirect. Este enfoque permite seleccionar artículos relevantes y de alta calidad, pues se ha centrado

en investigaciones recientes que abordan modelos, algoritmos y aplicaciones para la generación automática de rutas.

El presente artículo se organiza en cinco secciones. La segunda sección aborda el estado del arte. La tercera describe la metodología utilizada para la revisión sistemática. La cuarta presenta los resultados del análisis. Finalmente, la quinta incluye las conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones.

## ESTADO DEL ARTE

La generación automática de rutas para vehículos ha evolucionado y se ha convertido en un elemento crucial dentro de la gestión logística moderna. Esta tecnología ha permitido enfrentar desafíos como la congestión vehicular, las limitaciones de capacidad y la sostenibilidad ambiental, con el objetivo de optimizar los procesos operativos y reducir los costos. En particular, se ha demostrado que la optimización de rutas tiene un impacto directo en áreas como la logística urbana y las entregas de última milla, lo que ha mejorado la eficiencia operativa mediante el uso de datos en tiempo real. Los métodos avanzados, como los algoritmos híbridos y el aprendizaje automático, han sido fundamentales en este progreso, pues han mejorado la toma de decisiones y aumentado la eficiencia operativa (Nouicer et al., 2023; Y. Zhou et al., 2022).

### Inteligencia artificial y aprendizaje automático

La integración de inteligencia artificial (IA) en la planificación de rutas ha facilitado la reducción de costos operativos y tiempos de operación en flotas de vehículos eléctricos. Los enfoques basados en redes neuronales profundas y aprendizaje reforzado han mostrado una notable capacidad para adaptarse a condiciones logísticas cambiantes, lo que mejora la eficiencia y la capacidad de respuesta frente a fluctuaciones en los entornos logísticos. Además, el aprendizaje profundo ha demostrado ser eficaz en la optimización de recursos y ha destacado su potencial para mejorar la sostenibilidad operativa (Nouicer et al., 2023; Y. Zhou et al., 2022).

### Innovaciones tecnológicas en la logística

El uso de tecnologías, como el internet de las cosas (*internet of things*, IoT) y los sistemas de información geográfica (*geographical information system*, GIS), ha optimizado significativamente las capacidades de los sistemas de enrutamiento. En sectores como el de la gestión de residuos urbanos, se ha logrado una importante mejora en la reducción de los tiempos operativos gracias a la integración de datos en tiempo real, lo que, a su vez, ha mejorado la toma de decisiones (Idrissi et al., 2024). Además, la aplicación de vehículos autónomos y drones ha demostrado ser eficaz en la optimización de rutas en escenarios de alta demanda, lo que ha evidenciado el impacto positivo de las tecnologías emergentes en la logística urbana (Liang et al., 2021). La

colaboración entre robots móviles ha sido clave en la transformación de la logística, pues ha evidenciado cómo los algoritmos de búsqueda en grafos pueden mejorar la eficiencia operativa en este tipo de entornos (Kawabe et al., 2023).

### **Enfoques algorítmicos y modelos de optimización**

El desarrollo de algoritmos híbridos, como los que combinan el aprendizaje por refuerzo con las colonias de hormigas, ha demostrado su eficacia para resolver problemas de enrutamiento dinámico. Esta combinación ha permitido mejorar la eficiencia de las operaciones logísticas, especialmente en escenarios cambiantes (Zhao et al., 2024). Asimismo, la integración de algoritmos genéticos y técnicas bioinspiradas, como el comportamiento del lobo gris, ha mostrado ser efectiva en la optimización de rutas bajo restricciones de capacidad (Arifuddin et al., 2024). Los modelos de optimización multiobjetivo han sido particularmente útiles, pues han equilibrado factores como los costos y los tiempos de operación sin comprometer la sostenibilidad, lo que ha permitido mejorar la eficiencia operativa (Wang et al., 2023).

### **Desafíos en la implementación de la generación automática de rutas**

A pesar de los avances, la implementación de la generación automática de rutas enfrenta varios desafíos. La complejidad de los algoritmos de aprendizaje profundo y refuerzo exige una comprensión avanzada de la teoría de la IA, lo cual puede ser una barrera significativa para su adopción (Pal, 2023). Las limitaciones en la capacidad de las baterías de los vehículos eléctricos también restringen el rango de conducción, lo que dificulta la optimización de las rutas (Martins et al., 2021). Además, la integración de vehículos guiados automáticamente (*automatic guided vehicle*, AGV) en los entornos logísticos puede resultar costosa y compleja, mientras que la adaptación de los modelos teóricos a escenarios prácticos, como la recolección de residuos, presenta obstáculos operativos y resistencia por parte de los operadores, lo que dificulta su implementación (Arifuddin et al., 2024; Mojtahedi et al., 2021; Tsolakis et al., 2022).

### **Impacto en la eficiencia operativa y sostenibilidad**

La optimización de rutas mediante IA ha mostrado beneficios claros en términos de eficiencia operativa y sostenibilidad. Se ha logrado una reducción significativa en los costos operativos, como se observa en estudios de recolección de residuos, donde los costos totales se redujeron hasta en un 66 % (Mahdavi et al., 2022). La automatización y el uso de AGV han incrementado la productividad en terminales portuarias y otros entornos logísticos, lo que ha resultado en mejoras en la eficiencia operativa (Tsolakis et al., 2022). Además, la optimización de rutas ha demostrado ser clave en la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero al minimizar las distancias recorridas y mejorar la eficiencia del combustible (Pal, 2023; R. Liu & Wang, 2022).

Asimismo, la integración de vehículos eléctricos en las rutas sostenibles ha contribuido a la reducción de la huella de carbono, lo que promueve prácticas de transporte más ecológicas (Martins et al., 2021). Las tecnologías emergentes, como el transporte internet (TI), también han logrado un ahorro energético significativo, pues han alcanzado hasta un 36 % de eficiencia en comparación con los sistemas tradicionales (J. Li et al., 2023). Finalmente, la optimización de rutas no solo beneficia la logística, sino que también mejora la calidad de vida en áreas urbanas al reducir el tráfico y las emisiones, lo que contribuyen a un entorno más saludable (Abdullahi et al., 2021; Hmamed et al., 2023).

## METODOLOGÍA

La revisión sistemática de literatura se basó en las recomendaciones del marco metodológico de Kitchenham et al. (2009), el cual se estructura en tres fases: planificación, realización e informe. En la fase de planificación, se establecieron los objetivos de la revisión y se definieron los criterios para la búsqueda y selección de estudios. En la fase de realización, se recopilaron y analizaron los artículos relevantes siguiendo un procedimiento estandarizado. Finalmente, en la fase de informe, se sintetizaron los hallazgos obtenidos para estructurar los resultados y extraer conclusiones sobre los avances en la generación automática de rutas.

### Planificación de la revisión

En la fase de planificación, se estableció el tema de investigación con el objetivo de delimitar el alcance de la revisión sistemática y garantizar un enfoque estructurado. A partir de este marco, se definieron preguntas clave que guían el proceso de búsqueda y análisis de información relevante. Las preguntas planteadas fueron las siguientes:

- P1: ¿qué técnicas algorítmicas se utilizan para la generación automática de rutas y cuáles son las más eficientes para optimizar rutas de entrega?
- P2: ¿qué modelos se utilizan para la generación automática de rutas en sistemas de entregas?
- P3: ¿qué tecnologías son utilizadas en sistemas de generación de rutas?
- P4: ¿qué técnicas de integración se utilizan en sistemas de generación de rutas?
- P5: ¿qué factores tecnológicos son considerados en la construcción de sistemas de generación de rutas?

### Realización de la revisión

En esta fase se describió el procedimiento para la revisión de literatura, que incluyó tanto la búsqueda como la selección de las fuentes bibliográficas relevantes.



### Estrategias de búsqueda

Para la búsqueda de fuentes bibliográficas, se emplearon palabras clave relacionadas con las preguntas de investigación sobre la generación automática de rutas. Estas palabras clave se utilizaron para construir cadenas de búsqueda específicas que facilitaron la identificación de estudios relevantes. Por ejemplo, se utilizó la siguiente cadena de búsqueda: ("*route generation*" OR "*route planning*") AND *vehicles* AND (*techniques* OR *optimization* OR *technologies* OR "*route system*" OR *implementation* OR *delivery*). Esta estrategia facilitó la obtención de una selección adecuada de literatura para su análisis y síntesis.

Se establecieron criterios estrictos para garantizar la calidad y pertinencia de los artículos seleccionados. Los artículos debían ser recientes, con una antigüedad no superior a cinco años, y preferentemente publicados en inglés. Además, se exigió que los artículos cuenten con un identificador de objeto digital (*digital object identifier*, DOI), lo que asegura su fiabilidad. Se priorizaron aquellos trabajos que abordaban específicamente la generación automática de rutas para entregas, con propuestas de implementación o aplicaciones en contextos reales. Los criterios de inclusión y exclusión utilizados para la búsqueda y selección de los artículos se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1**

#### Criterios de inclusión y exclusión

Criterios de inclusión	Criterios de exclusión
Artículos que traten sobre generación automática de rutas para entregas	Artículos no indexados
Artículos con DOI	Trabajos que no muestren el proceso de Implementación
Publicación en inglés	Artículos que no se relacionen con la generación de rutas para vehículos de entrega
Artículos centrados en técnicas, metodologías, tecnologías o herramientas para la generación y optimización de rutas	Informes, revistas, boletines, comentarios
Artículos limitados a ciencias de la computación	Publicaciones a partir del año 2021

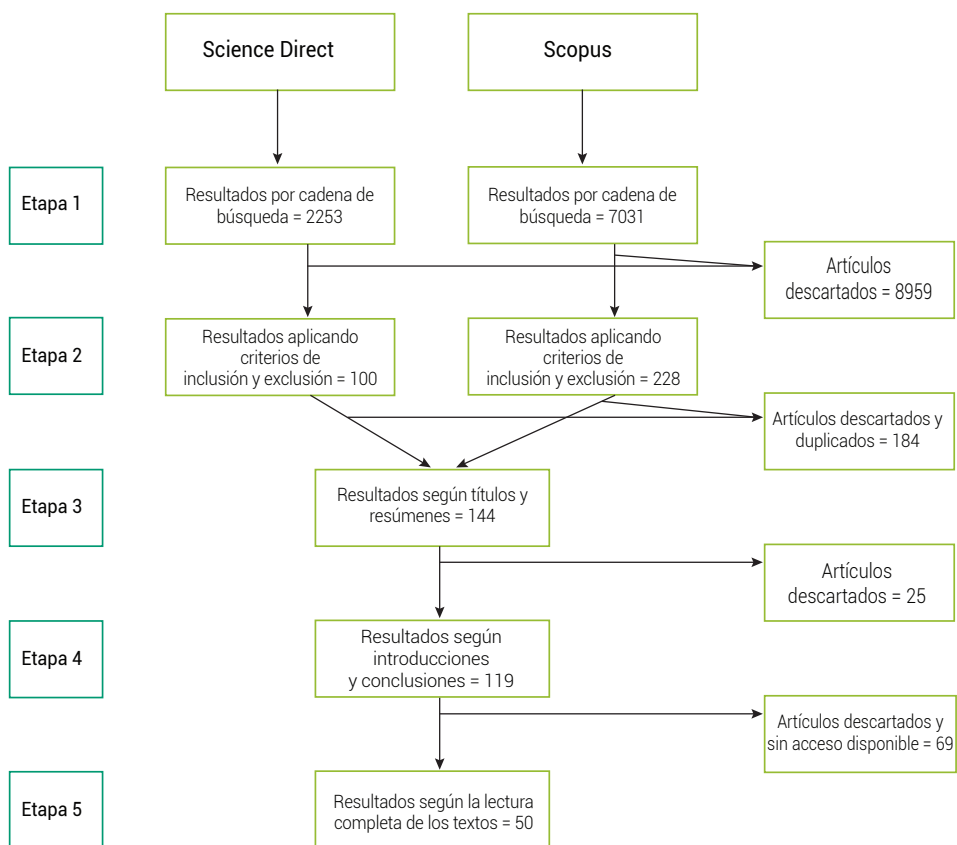
### Selección de estudios

A partir de la cadena de búsqueda, en la primera etapa del filtrado se identificaron 2253 artículos en la base de datos Scopus y 7031 artículos en la base de datos ScienceDirect. En la segunda etapa, se aplicaron los criterios de inclusión y exclusión establecidos en la Tabla 1, y se seleccionaron 228 artículos de Scopus y 100 artículos de ScienceDirect, lo que resultó en un total de 328 artículos. En la tercera etapa, los artículos obtenidos de ambas bases de datos se combinaron, se eliminaron los duplicados y se revisaron

tanto los títulos como los resúmenes relacionados con la generación automática de rutas para entregas, de los cuales se conservaron 144 artículos. En la cuarta etapa, se revisaron las conclusiones e introducciones de los artículos seleccionados para asegurar su relevancia y pertinencia, lo que resultó en la selección de 119 artículos. Finalmente, en la quinta etapa, se llevó a cabo la lectura completa de los textos, de los cuales se eligieron 50 artículos (Figura 1).

**Figura 1**

*Diagrama de flujo del filtrado de artículos*



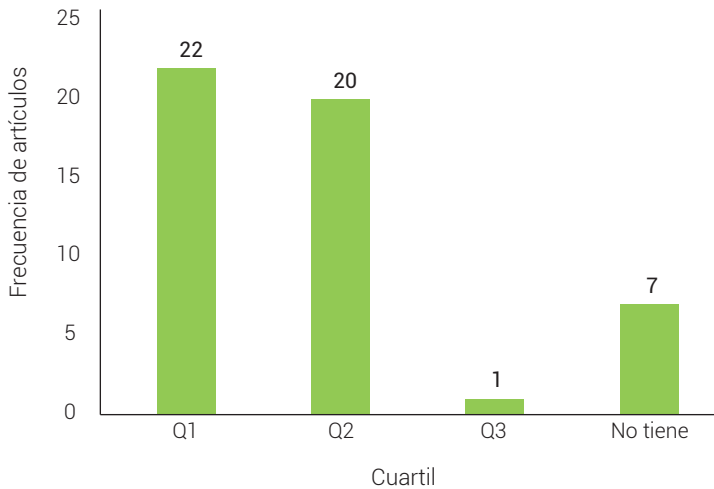
### Extracción y análisis de datos

Se realizó un análisis cuantitativo<sup>1</sup>, el cual se presenta mediante gráficos estadísticos generados a partir de los datos obtenidos durante la revisión. Este análisis permite visualizar y comprender de manera más clara las tendencias y patrones identificados en los artículos seleccionados.

La Figura 2 muestra una distribución destacada en el cuartil 1 (Q1), que agrupa 22 de los *journals* seleccionados, lo que refleja un alto rendimiento y calidad en los estudios reportados. El cuartil 2 (Q2) cuenta con una representación ligeramente menor con 20 casos, mientras que el cuartil 3 (Q3) registra solo 1 caso. Por otro lado, se identifican 7 *journals* que no están clasificados en ninguno de los cuartiles, lo que indica que aún no han sido evaluados. Estos resultados destacaron la predominancia de estudios de alta calidad entre los seleccionados, con una representación significativa en los cuartiles superiores.

**Figura 2**

Cantidad de publicaciones por cuartil



La Tabla 2 presenta la frecuencia del top 10 de palabras clave más utilizadas en los artículos analizados, de los cuales se destacaron términos como *route planning* (21) y *vehicle routing* (15), lo que evidenció el enfoque predominante en la planificación y optimización de rutas. Palabras clave como *genetic algorithms* (11) y técnicas avanzadas como *particle swarm optimization* y *ant colony optimization* (8) subrayaron la relevancia de los métodos bioinspirados en la resolución de problemas complejos.

<sup>1</sup> Los detalles del análisis se pueden ver en el siguiente enlace: [https://drive.google.com/drive/folders/1wPltULsR3lnmL9sy46WkVkJDjUpxmmQ1S?usp=drive\\_link](https://drive.google.com/drive/folders/1wPltULsR3lnmL9sy46WkVkJDjUpxmmQ1S?usp=drive_link)

Además, tecnologías relacionadas con IA, como *deep learning* y *neural networks* (7), reflejaron un interés creciente en soluciones innovadoras. Otros términos, como *clustering algorithms* (6) y *fleet operations* (5), indicaron la importancia de la segmentación de datos y la gestión de recursos. También se incluyeron conceptos como *urban transportation* y *autonomous vehicles* (4), que resaltan enfoques tecnológicos en contextos urbanos. En conjunto, estos términos destacaron el interés en la generación automática de rutas integrando técnicas de optimización, IA y tecnologías emergentes, aunque el top 10 representa solo una parte del amplio panorama de términos relacionados en este campo.

**Tabla 2**

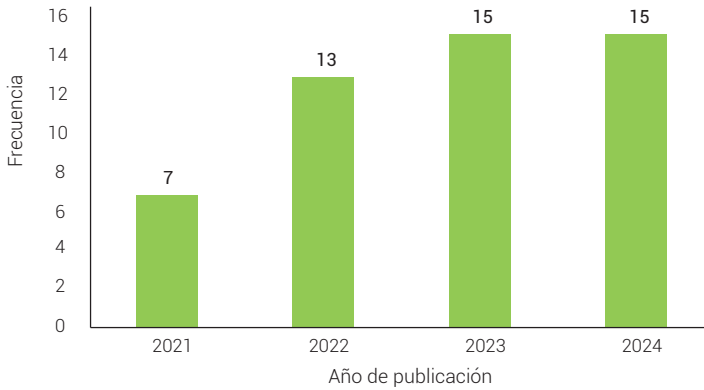
*Top 10 de palabras clave*

Palabras clave	Frecuencia
<i>Route planning</i>	21
<i>Vehicle routing</i>	15
<i>Optimization, optimisations</i>	12
<i>Genetic algorithms</i>	11
<i>Unmanned aerial vehicles (UAV)</i>	9
<i>Particle swarm optimization (PSO), ant colony optimization, time windows, routings</i>	8
<i>Deep learning, neural networks, reinforcement learning, reinforcement learnings, heuristic algorithms, vehicles, antennas</i>	7
<i>Clustering algorithms, clusterings, motion planning</i>	6
<i>Fleet operations, integer programming, aerial vehicle</i>	5
<i>Urban transportation, electric vehicles, autonomous vehicles, tabu search, multi-objective optimization, travel time, buses, vehicle routing problems</i>	4

La Figura 3 muestra la frecuencia de publicaciones por año relacionadas con el tema de investigación. En el 2021, se registraron 7 publicaciones, mientras que, en el 2022, aumentó significativamente a 13 publicaciones, lo que reflejó un mayor interés en el área. Este interés se mantuvo en el 2023 y 2024, con un máximo de 15 publicaciones en cada año. Este comportamiento destacó la relevancia del tema como un área de estudio importante, especialmente en el desarrollo de soluciones innovadoras para la generación automática de rutas, impulsada por la necesidad de optimizar procesos logísticos y tecnológicos.

**Figura 3**

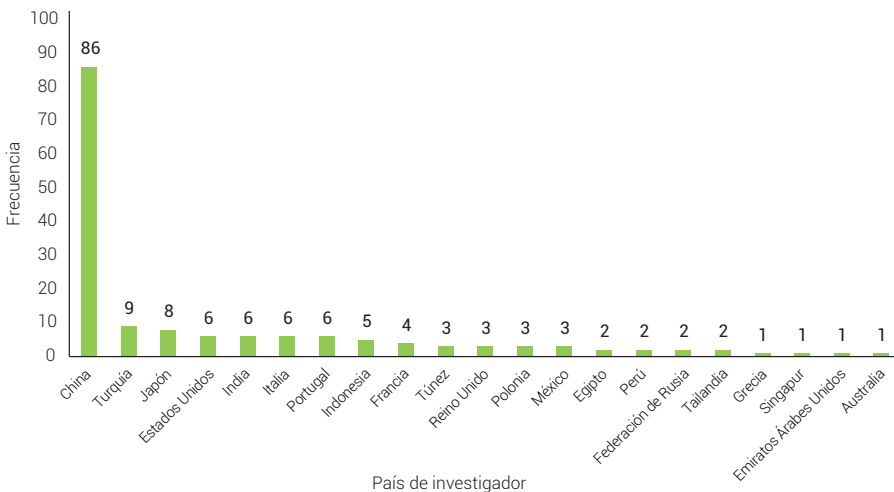
*Cantidad de publicaciones por año*



La Figura 4 muestra la frecuencia de investigadores por país en el campo de estudio. Se destacó un interés predominante en China, con 86 investigadores, lo que refleja un enfoque significativo en la investigación y desarrollo en esta área. Turquía y Japón también tuvieron una participación relevante con 9 y 8 investigadores, respectivamente, seguidos por países como Estados Unidos, India, Italia y Portugal, cada uno con 6 investigadores. En contraste, países como Francia, Túnez, Reino Unido, Polonia e Indonesia presentaron una menor representación, con 4 o menos investigadores. En América Latina, México (3) y Perú (2) evidenciaron un interés emergente en el tema. Estos hallazgos han resaltado una notable concentración de investigadores en Asia y Europa, con una participación más discreta de América Latina.

**Figura 4**

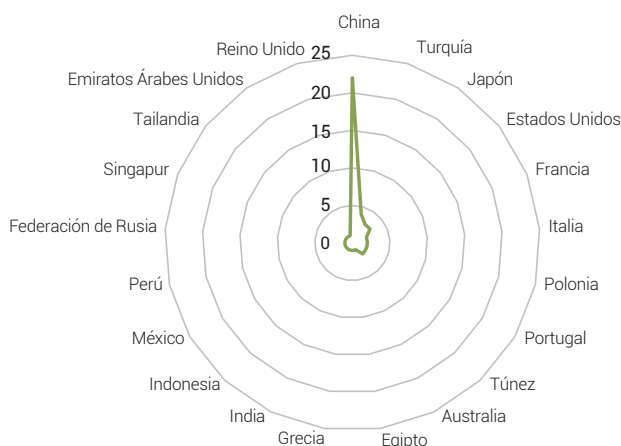
*Cantidad de investigadores por país*



La Figura 5 muestra la frecuencia de publicaciones por país en el ámbito de estudio. Destacó China (22) como líder en contribuciones, lo que refleja un fuerte interés y enfoque en el desarrollo de estos temas. Turquía ocupó el segundo lugar, seguida por Japón y Estados Unidos, con 3 publicaciones cada uno. Países como Francia, Italia, Polonia, Portugal y Túnez también realizaron aportes significativos, con 2 publicaciones cada uno. Otros países, incluidos Australia, Egipto, Grecia, India, Indonesia, México, Perú, Rusia, Singapur, Tailandia, Emiratos Árabes Unidos y Reino Unido, tuvieron una participación más limitada con 1 publicación cada uno. Estas cifras evidenciaron una notable concentración de investigaciones en Asia, acompañada de una expansión hacia otras regiones como Europa y América Latina, donde países como México y Perú reflejaron un interés emergente, de lo que se subraya el enfoque multidisciplinario de esta tecnología.

**Figura 5**

*Publicaciones por país*



## RESULTADOS

En esta etapa, se recopilieron los resultados y respuestas a las cinco preguntas de investigación formuladas en la fase inicial, basadas en los hallazgos obtenidos durante la revisión de la literatura. A continuación, se presenta un análisis detallado de cada una de las preguntas planteadas, con el fin de proporcionar una comprensión clara y concisa de los principales resultados identificados en los estudios seleccionados.

### **P1: ¿qué técnicas algorítmicas se utilizan para la generación automática de rutas y cuáles son las más eficientes para optimizar rutas de entrega?**

Las técnicas algorítmicas son métodos computacionales diseñados para resolver problemas complejos mediante una secuencia de pasos sistemáticos. Para la

generación automática de rutas, estas ayudan a optimizar el proceso de planificación de itinerarios. Algunas de las más eficaces se destacan por su eficiencia, pues son capaces de encontrar soluciones rápidas y de alta calidad con el uso mínimo de recursos.

La efectividad de técnicas algorítmicas, como el ACO-ABC híbrido, el *double* DQN y el GA-GWO híbrido, en la resolución de problemas complejos de generación de rutas, es incuestionable. Estas logran equilibrar de manera eficiente la exploración global con la optimización local al combinar métodos bioinspirados y aprendizaje automático. Sin embargo, su aplicabilidad se ve limitada por la escalabilidad y la dependencia de infraestructuras tecnológicas avanzadas, lo que resalta la necesidad de desarrollar estrategias capaces de funcionar de manera óptima incluso con recursos limitados. Esto permitiría una mayor accesibilidad especialmente en regiones con infraestructuras menos desarrolladas. La Tabla 3 presenta las técnicas algorítmicas utilizadas en la generación automática de rutas.

**Tabla 3**

*Técnicas algorítmicas para la generación automática de rutas y su eficiencia en la optimización de entregas*

Referencia	Técnica algorítmica	Descripción	Resultados
Y. Liu et al. (2022)	Algoritmo heurístico	Técnica que emplea reglas aproximadas o de sentido común para resolver problemas complejos de manera rápida y eficiente.	Se considera eficiente debido a que encuentra soluciones aceptables en tiempo reducido, aunque no garantiza óptimos globales. Es adecuada para problemas complejos con restricciones de tiempo.
Comert & Yazgan (2023)	ACO-ABC híbrido	Optimización combinada entre ACO y ABC, que busca soluciones mediante la exploración cooperativa entre ambas colonias.	Se considera muy eficiente debido a la integración de exploración y refinamiento, lo que mejora la calidad y velocidad de las soluciones. Eficaz en problemas de optimización combinatoria.
Nouicer et al. (2023)	Double DQN	Uso de dos redes neuronales en aprendizaje por refuerzo para evitar sobreestimaciones en las evaluaciones de acción para mejorar la estabilidad del aprendizaje.	Se considera muy eficiente por su capacidad de evitar sobreestimaciones. Ideal para entornos dinámicos y con alta incertidumbre.
Cui et al. (2022)	Algoritmo memético	Técnica que combina la búsqueda global con la mejora local de soluciones a través de un proceso iterativo.	Combinación de búsqueda global y mejora local. Puede ser costoso computacionalmente, pero es útil en problemas con grandes espacios de solución.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Técnica algorítmica	Descripción	Resultados
J. Shi et al. (2023)	ALNS	Metaheurística flexible que usa un enfoque iterativo de destrucción y reconstrucción de soluciones para optimizar.	Muy eficiente debido a su enfoque iterativo y flexible, ideal para problemas de optimización de rutas.
Szwarc et al. (2021)	Algoritmo evolutivo	Técnica inspirada en la evolución biológica (selección, cruce y mutación) para encontrar soluciones óptimas mediante un proceso iterativo.	Capaz de encontrar soluciones óptimas en problemas de optimización con restricciones variadas mediante procesos iterativos de evolución.
Zhao et al. (2024)	ACO-Q-learning	Técnica que combina ACO con Q-Learning para optimizar rutas adaptativamente utilizando exploración colaborativa y decisiones basadas en recompensas.	Muy eficiente debido a su integración de exploración colaborativa y decisiones basadas en recompensas. Mejor en problemas dinámicos de enrutamiento.
X. Zhou et al. (2024)	k-Center COA	Clustering con el algoritmo k-Center y optimización con cucarachas para mejorar la asignación de clústers.	Capaz de agrupar y optimizar la asignación de clústers, ideal para problemas de clustering espacial. Sensible a parámetros iniciales.
R. Liu & Wang (2022)	DD-BRO	Optimización en tiempo real de rutas de autobuses, a través de la integración de datos históricos sobre tráfico y condiciones de rutas.	Muy eficiente para ajustar rutas en tiempo real utilizando datos históricos para mejorar la eficiencia del transporte público.
Kawabe et al. (2023)	Q-Learning-GS	Optimización de navegación en entornos complejos combinando Q-Learning con búsqueda en grafos.	Muy eficiente para entornos complejos y dinámicos, ideal para optimizar navegación en grafos mediante aprendizaje por refuerzo continuo.
Sathyamurthy et al. (2024)	HMAA	Técnica híbrida que combina múltiples metaheurísticas para resolver problemas complejos de enrutamiento mediante un enfoque de fases.	Aprovecha múltiples metaheurísticas para mejorar la calidad de las soluciones, especialmente en problemas de enrutamiento complejos.
Y. Shi et al. (2023)	LBH	Heurística basada en aprendizaje que guía la búsqueda utilizando patrones de soluciones anteriores.	Utiliza aprendizaje basado en soluciones pasadas. Muy eficiente en problemas recurrentes, aunque limitado en escenarios nuevos.
Liang et al. (2021)	HOA	Técnica híbrida de optimización que integra métodos como algoritmos genéticos y recocido simulado para explorar el espacio de soluciones y mejorar los resultados.	Muy eficiente debido a la combinación de exploración y precisión en problemas complejos. Efectiva en optimización multiobjetivo.

(continúa)



(continuación)

Referencia	Técnica algorítmica	Descripción	Resultados
Wang et al. (2023)	RGA	Algoritmo genético con reprogramación dinámica para ajustar soluciones en tiempo real.	Muy eficiente por su capacidad de reprogramación, adaptándose a cambios en tiempo real. Ideal en entornos con restricciones variables.
Guan & Li (2023)	IACO	Optimización con actualización dinámica de reglas de feromonas, inspirada en las hormigas, para encontrar soluciones más efectivas.	Muy eficiente en problemas de optimización robustos, debido a su actualización continua de reglas de feromonas.
Arifuddin et al. (2024)	GA-GWO	Hibridación entre el algoritmo genético y el optimizador de lobo gris para optimización de rutas.	Muy eficiente por su combinación de capacidades globales y estrategias locales, ideal para problemas de enrutamiento.
Y. Zhou et al. (2022)	ISAC	Optimización con Soft Actor-Critic para resolver problemas estocásticos mediante políticas adaptativas.	Muy eficiente en entornos dinámicos y estocásticos para resolver problemas con políticas adaptativas.
Sang et al. (2024)	A*-DWA	Combinación de A* y el algoritmo de ventana dinámica para optimizar la navegación ajustando rutas en tiempo real según el entorno.	Muy eficiente en navegación dinámica al combinar planificación óptima con ajustes en tiempo real.
Sundarraj et al. (2023)	WCPSO-Dijkstra	Combinación de PSO con el algoritmo de Dijkstra para optimizar grafos en enrutamiento.	Muy eficiente en la optimización de grafos y mejora del enrutamiento en redes mediante exploración global y búsqueda precisa.
Hou et al. (2023)	DRL-VRP	Optimización de rutas de vehículos mediante aprendizaje por refuerzo profundo adaptándose a condiciones del entorno.	Muy eficiente para sistemas dinámicos y complejos, debido a la capacidad de aprender políticas de enrutamiento adaptativas.
M. Y. Zhang et al. (2022)	PSO-BAS	Integración de PSO con la búsqueda de área limitada para mejorar la optimización en problemas de enrutamiento.	Muy eficiente debido a su integración de exploración global y búsqueda local precisa. Eficaz en optimización de rutas.

## P2: ¿qué modelos se utilizan para la generación automática de rutas en sistemas de entregas?

Un modelo es una representación abstracta de un sistema o proceso real que permite simular y predecir su comportamiento en diferentes situaciones. Son herramientas esenciales para estructurar problemas complejos, ya que permiten facilitar la toma de decisiones mediante la simplificación de variables y de las restricciones implicadas.

Los modelos de optimización, el VRP dinámico integrado y el modelo de generación de columnas híbrido se destacan como herramientas clave para optimizar rutas en escenarios con demandas fluctuantes y restricciones variables. Estos enfoques son particularmente útiles para enfrentar desafíos logísticos complejos, como la optimización de la última milla y la integración de vehículos eléctricos. Sin embargo, requieren configuraciones iniciales complejas y adaptaciones tecnológicas significativas, lo que puede dificultar su implementación en entornos logísticos menos maduros. La Tabla 5 describe los modelos utilizados en los estudios revisados y destacan sus características principales y su aplicabilidad en la resolución de problemas.

**Tabla 4**

*Modelos utilizados para la generación automática de rutas*

Referencia	Modelo	Descripción del modelo
Küp et al. (2024)	VRP dinámico integrado	Modelo de optimización diseñado para flotas compartidas en operaciones de recogida y entrega, que adapta las rutas dinámicamente según las ventanas temporales y la demanda en tiempo real.
J. Li et al. (2023)	Sistema de rutas autónomo	Modelo para vehículos autónomos que planifica rutas de manera eficiente, considerando restricciones como la autonomía de las baterías y las condiciones cambiantes del entorno en tiempo real.
S. Pan et al. (2024)	VRP cadena de frío multivehículo	Modelo que optimiza las rutas de transporte para productos perecederos al integrar requisitos de refrigeración, control de emisiones y eficiencia en el uso de múltiples vehículos.
Hu et al. (2024)	Generación de columnas híbrido	Modelo para optimización de rutas en última milla con vehículos autónomos, utilizando un enfoque de generación y evaluación iterativa de rutas eficientes para cumplir con las entregas.
Zhao et al. (2024)	Sistema de ahorro energético	Modelo que optimiza las rutas de transporte minimizando el consumo energético mediante el análisis de trayectorias eficientes y la selección de rutas menos exigentes para los vehículos.
Guan & Li (2023)	ACO mejorado	Modelo logístico aplicado a la cadena de frío que utiliza una versión mejorada de optimización de colonia de hormigas para simular comportamientos de búsqueda óptima en la planificación de rutas.
Arifuddin et al. (2024)	GA-GWO híbrido	Modelo híbrido que combina algoritmos genéticos y optimización de manada de lobos grises para planificar rutas de transporte y lograr un balance entre exploración y explotación.
Jiang et al. (2024)	AGV <i>path planning</i>	Modelo que planifica las trayectorias de vehículos guiados automáticamente (AGV), lo que optimiza las operaciones de recogida y entrega en entornos controlados, como almacenes.
Ramirez et al. (2022)	WSN <i>route planning</i>	Modelo de planificación de rutas que utiliza redes de sensores inalámbricos para recolectar datos en tiempo real sobre las condiciones del entorno y optimizar las trayectorias de recolección.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Modelo	Descripción del modelo
Idrissi et al. (2024)	Smart waste VRP	Modelo de optimización para la recolección de residuos basado en niveles de llenado de contenedores y condiciones de tráfico, lo que ajusta dinámicamente las rutas para mejorar la eficiencia.
Zheng et al. (2021)	Metro-integrated routing	Modelo que integra las redes de metro urbano en la planificación logística, lo que permite el uso combinado de transporte público y privado para mejorar la eficiencia en áreas urbanas.
Toathom & Champrasert (2024)	Flood-aware VRP	Modelo de optimización de rutas que incorpora riesgos de inundación en la planificación, ajustando las trayectorias para garantizar la seguridad y minimizar interrupciones durante las entregas.
Raeesi & Zografos (2022)	Recarga coordinada	Modelo que integra la planificación de rutas de vehículos eléctricos con la ubicación y disponibilidad de estaciones de recarga, lo que optimiza la eficiencia energética y los tiempos de operación.
Hulagu & Celikoglu (2022)	Flota heterogénea verde	Modelo de gestión de flotas heterogéneas que incorpora criterios ambientales, como la reducción de emisiones, junto con parámetros operativos para optimizar el transporte sostenible.
Nickkar & Lee (2023)	Framework multinivel	Modelo jerárquico que organiza redes de transporte, como autobuses escolares, en niveles estructurados, lo que facilita la gestión y la planificación eficiente en sistemas complejos.
J. Li et al. (2023)	EV + tráfico	Modelo de planificación de rutas para vehículos eléctricos que considera simultáneamente la autonomía de las baterías y las condiciones de tráfico, ajustando las rutas dinámicamente.
Y. Pan et al. (2024)	UAV-humano	Modelo que coordina la colaboración entre drones y operadores humanos, asignando tareas de forma eficiente y aprovechando las capacidades complementarias de ambos para optimizar las entregas.

### P3: ¿qué tecnologías son utilizadas en sistemas de generación de rutas?

Las tecnologías se refieren a las herramientas, sistemas o plataformas que permiten implementar soluciones eficientes para abordar un conjunto específico de problemas. En este sentido, las tecnologías facilitan la recopilación, procesamiento y análisis de datos, pues proporcionan soporte a la toma de decisiones y mejoran la precisión de las soluciones propuestas.

Las tecnologías emergentes, como el IoT, la conectividad V2X y los sistemas de sensores inalámbricos (WSN), están revolucionando el sector logístico, ya que proporcionan capacidades de monitoreo y optimización en tiempo real, y mejoran considerablemente la eficiencia y sostenibilidad. Sin embargo, la efectividad de estas tecnologías depende en gran medida de la existencia de infraestructuras robustas y marcos regulatorios bien definidos. Esto evidencia la importancia de definir políticas públicas que faciliten su integración. La Tabla 5 detalla las principales tecnologías

utilizadas y se destaca su papel en la mejora de la eficiencia en la generación automática de rutas.

**Tabla 5**

*Tecnologías utilizadas para la generación de rutas*

Referencia	Tecnología	Descripción
Chen et al. (2022)	Sistema energético IoT	Tecnología que integra sensores IoT para monitorear el consumo energético de vehículos en tiempo real, lo que ajusta las operaciones para maximizar la eficiencia energética.
Dutta et al. (2023)	<i>Fast move</i>	Tecnología de reenrutamiento dinámica diseñada para ciudades inteligentes, que ajusta rutas de transporte prioritario en tiempo real ante cambios en el entorno.
Yan et al. (2023)	<i>AGV tracking</i>	Tecnología para seguimiento preciso de trayectorias de vehículos guiados automáticamente, utilizada en entornos controlados como almacenes.
Ramirez-Robles et al. (2024)	Tiempo real <i>off-road</i>	Tecnología autónoma para la planificación de rutas en terrenos irregulares, diseñada para optimizar el movimiento de vehículos fuera de carretera.
D'Emidio et al. (2024)	Vehículos conectados	Tecnología de comunicación V2V (vehículo a vehículo) que permite la sincronización y optimización de rutas mediante el intercambio constante de datos entre vehículos en tiempo real.
Hou et al. (2023)	SoC-VRP	Tecnología de transporte inteligente que utiliza aprendizaje por refuerzo profundo para coordinar rutas de múltiples vehículos en sistemas cooperativos.
X. Zhou et al. (2024)	<i>Clustering k-center</i>	Tecnología de agrupamiento espacial que organiza datos de distribución, lo que optimiza la asignación de recursos y la planificación de entregas.
S. Pan et al. (2024)	Sensores térmicos	Tecnología de monitoreo de temperatura que asegura el mantenimiento adecuado en cadenas de frío y evita la pérdida de calidad en productos perecederos.
Yan et al. (2023)	Sensores ambientales	Tecnología de monitoreo que analiza el impacto ecológico de las operaciones de transporte, lo que ayuda a reducir su huella ambiental.
X. Zhou et al. (2024)	Conectividad V2X	Tecnología que conecta vehículos con infraestructura vial mediante comunicación V2X, lo que mejora la sincronización y eficiencia en las rutas.
J. Li et al. (2023)	Medición de tráfico	Tecnología de sensores avanzados que analiza los niveles de tráfico para proporcionar datos en tiempo real para ajustes en la planificación de rutas.
X. Liu et al. (2021)	Control UAV	Tecnología de sistemas avanzados de control para la gestión de drones en operaciones de vigilancia aérea y transporte autónomo.
Hou et al. (2023)	ITS cooperativo	Tecnología de infraestructura inteligente que coordina el flujo de tráfico mediante sistemas de transporte cooperativos, lo que mejora la eficiencia general.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Tecnología	Descripción
Toathom & Champrasert (2024)	Sensores climáticos	Tecnología que monitorea condiciones climáticas adversas, como inundaciones, lo que ayuda en la planificación segura de rutas durante desastres naturales.

#### P4: ¿qué técnicas de integración se utilizan en sistemas de generación de rutas?

Las técnicas de integración implican la combinación de diferentes metodologías, algoritmos o sistemas para mejorar la eficacia y la coherencia de las soluciones. Puede involucrar la combinación de enfoques de optimización con sistemas de información o plataformas tecnológicas. La Tabla 6 describe las principales técnicas de integración empleadas.

**Tabla 6**

*Técnicas de integración utilizadas para la generación de rutas*

Referencia	Técnica de integración	Descripción
Küp et al. (2024)	<i>Framework</i> VRP dinámico	Técnica que integra la planificación de flota compartida con ventanas temporales dinámicas, lo que permite una asignación flexible y eficiente de vehículos en operaciones logísticas.
T. Li et al. (2022)	Sistema autónomo integrado	Combina tecnologías de conducción autónoma con algoritmos de optimización de rutas, lo que crea un sistema completo para la gestión y operación de vehículos autónomos en entornos complejos.
Raeesi & Zografos (2022)	Recarga coordinada	Técnica que coordina rutas de vehículos eléctricos con estaciones de recarga y cambio de baterías, lo que optimiza tiempos y recursos durante los desplazamientos.
Hulagu & Celikoglu (2022)	Flota heterogénea verde	Integra vehículos con diferentes tecnologías en un mismo sistema logístico aplicando criterios ambientales y de eficiencia operativa para optimizar la gestión de flotas mixtas.
Kawabe et al. (2023)	Q-Learning + grafos	Combina el aprendizaje por refuerzo con algoritmos de búsqueda en grafos, lo que permite tomar decisiones óptimas en rutas mediante la exploración eficiente de posibles trayectorias.
Y. Shi et al. (2023)	Misión-ruta UAV	Integra la planificación de misiones con la generación de rutas específicas para drones, lo que asegura la ejecución coordinada y eficiente de tareas autónomas.
Ho et al. (2022)	MAPF + UTM	Fusiona la planificación de movimiento multiagente con la gestión de tráfico aéreo coordinando el movimiento simultáneo de múltiples agentes en espacios compartidos.
Nickkar & Lee (2023)	<i>Framework</i> multinivel	Organiza redes de transporte escolar en niveles jerárquicos, lo que optimiza la planificación de rutas mediante una estructura escalonada y eficiente.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Técnica de integración	Descripción
J. Li et al. (2023)	EV + tráfico	Integra datos de impedancia de tráfico con planificación de rutas para vehículos eléctricos, lo que mejora la eficiencia operativa en entornos urbanos.
H. Zhang et al. (2022)	Info-tráfico multiobjetivo	Combina datos de tráfico en tiempo real con técnicas de optimización multiobjetivo para ajustar rutas y equilibrar tiempo, costos y eficiencia.
Y. Pan et al. (2024)	UAV-humano	Facilita la colaboración entre drones y operadores humanos integrando tareas autónomas con control remoto para operaciones complejas.
Sang et al. (2024)	A* + DWA	Combina el algoritmo A* mejorado con el algoritmo de ventana dinámica integrando exploración global con ajustes locales para optimizar rutas.
X. Zhou et al. (2024)	Conectividad V2X	Integra comunicación entre vehículos y la infraestructura ( <i>vehicle-to-everything</i> ), lo que mejora la sincronización y coordinación en sistemas de transporte.
Hou et al. (2023)	ITS cooperativo	Facilita la colaboración entre distintas entidades de un sistema de transporte inteligente, lo que promueve decisiones conjuntas y sincronizadas.

**P5: ¿qué factores tecnológicos son considerados en la construcción de sistemas de generación de rutas?**

Los factores tecnológicos son los elementos que determinan la capacidad de un sistema para funcionar de manera eficaz, escalable y adaptable. Estos incluyen la infraestructura tecnológica disponible, la capacidad de procesamiento de datos, la integración de nuevas tecnologías y la capacidad de adaptarse a condiciones cambiantes. La Tabla 7 describe los factores tecnológicos identificados en los estudios revisados.

**Tabla 7**

*Factores tecnológicos utilizadas para la generación de rutas*

Referencia	Factor tecnológico	Descripción
Nouicer et al. (2023)	<i>Big data</i>	Tecnología que permite procesar y analizar grandes volúmenes de datos para obtener <i>insights</i> valiosos mediante el análisis predictivo.
İslim & Çatay (2024)	Baterías inteligentes	Baterías con sistemas de gestión de energía avanzados, lo que mejora la eficiencia y duración, utilizadas en vehículos eléctricos y dispositivos IoT.
Y. Zhou et al. (2022)	Algoritmos de <i>clustering</i>	Técnicas de agrupamiento de datos que organizan grandes cantidades de información, usadas en minería de datos y aprendizaje automático.

(continúa)

(continuación)

Referencia	Factor tecnológico	Descripción
S. Pan et al. (2024)	Sensores inalámbricos	Sensores que captan datos ambientales o de vehículos sin cables, lo que facilita el monitoreo remoto y la conectividad en entornos IoT.
Zhao et al. (2024)	Monitoreo reenergético	Sistema de tecnologías para controlar y optimizar el consumo de energía en tiempo real, utilizado en edificios inteligentes y vehículos eléctricos.
Yan et al. (2023)	Sensores ambientales	Sensores que miden variables ambientales como temperatura y humedad, implementados en monitoreo en tiempo real en ciudades y agricultura.
Pustokhina et al. (2021)	UAV (drones)	Vehículos aéreos no tripulados que recogen datos o realizan tareas específicas, utilizados en logística, seguridad y monitoreo ambiental.
Y. Zhou et al. (2022)	Comunicación V2X	Tecnología de comunicación entre vehículos e infraestructura, lo que mejora la seguridad y eficiencia en el transporte autónomo y el tráfico.
J. Li et al. (2023)	Sensores de tráfico	Dispositivos que captan el flujo vehicular y las condiciones de tráfico, aplicados en la gestión del tráfico en tiempo real y en vehículos autónomos.
R. Liu & Wang (2022)	Navegación autónoma	Tecnología que permite la navegación sin intervención humana usando GPS y sensores avanzados en vehículos autónomos y drones.
Ramirez et al. (2022)	Redes de sensores (WSN)	Red de sensores distribuidos que recopilan y transmiten datos de forma inalámbrica, utilizados en monitoreo ambiental, de salud y de infraestructura.
Hou et al. (2023)	Transporte inteligente (ITS)	Sistema que optimiza el flujo de tráfico y la seguridad mediante el uso de sensores, cámaras y tecnologías de comunicación en tiempo real.
Toathom & Champrasert (2024)	Sensores climáticos	Sensores diseñados para captar datos meteorológicos en tiempo real, utilizados en la agricultura y en la gestión de desastres naturales.
D'Emidio et al. (2024)	Vehículos autónomos	Vehículos que operan sin intervención humana utilizando tecnologías como sensores, inteligencia artificial y navegación autónoma.
Raeesi & Zografos (2022)	Infraestructura de recarga	Infraestructura avanzada para la carga de vehículos eléctricos, lo que optimiza la distribución y gestión de energía en estaciones de recarga.
Dutta et al. (2023)	Logística rápida	Tecnología que mejora la eficiencia en la entrega de productos mediante el uso de vehículos autónomos y soluciones basadas en inteligencia artificial.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos subrayan avances importantes en la generación automática de rutas, especialmente en cuanto a técnicas, modelos y tecnologías; sin embargo, también resaltan los desafíos persistentes que aún dificultan su implementación

efectiva en distintos contextos. La complejidad de optimizar rutas en entornos dinámicos, con restricciones que varían constantemente, sigue siendo un obstáculo clave.

Un análisis detallado de los enfoques algorítmicos demuestra la efectividad de métodos híbridos como el ACO-ABC y el *double* DQN para optimizar rutas en tiempo real. Estos enfoques combinan, de forma armoniosa, la exploración colaborativa y el aprendizaje reforzado al mostrar una gran capacidad para adaptarse a condiciones cambiantes. A pesar de ello, su dependencia de infraestructuras digitales avanzadas limita su uso en entornos con recursos tecnológicos más reducidos, lo que pone de manifiesto la necesidad de desarrollar algoritmos más flexibles y accesibles que faciliten su adopción en una mayor variedad de contextos.

La revisión de modelos de optimización, como el VRP dinámico integrado o el enfoque de generación de columnas híbrido, también muestra su eficacia a la hora de planificar rutas bajo condiciones complejas, como ventanas de tiempo variables o demanda fluctuante. Sin embargo, la configuración inicial tan compleja que requieren estos modelos supone una barrera significativa para su aplicación en entornos logísticos emergentes o con infraestructuras menos maduras. Además, la integración de vehículos eléctricos y autónomos añade una capa adicional de complejidad tanto tecnológica como operativa, por lo que será necesario continuar investigando cómo abordar estos aspectos de forma eficiente.

Tecnologías como el IoT, la conectividad V2X y los WSN tienen un potencial transformador en el ámbito logístico, lo que permite la recolección y análisis de datos en tiempo real. Esto mejora el uso de los recursos y la sostenibilidad logística. Sin embargo, su efectividad depende en gran medida de contar con una infraestructura tecnológica avanzada y marcos regulatorios claros, lo que limita su adopción en regiones con infraestructura más débil.

Uno de los puntos clave de este análisis es la intersección entre las tecnologías avanzadas y la sostenibilidad. La implementación de soluciones como baterías inteligentes y sensores avanzados contribuye a hacer la logística más ecológica, pero su adopción se ve frenada por obstáculos económicos y tecnológicos. La degradación de las baterías y los costos de integración de vehículos eléctricos siguen siendo desafíos importantes, lo que requiere soluciones más profundas para garantizar una transición verdaderamente sostenible.

A pesar de los logros alcanzados, el estudio pone en evidencia que las soluciones actuales aún enfrentan dificultades para adaptarse a entornos urbanos densos o regiones con recursos limitados. La escalabilidad de los modelos y su capacidad para operar eficientemente en escenarios de alta congestión o con restricciones severas sigue siendo un reto pendiente.



En resumen, los resultados del estudio destacan la necesidad de abordar las limitaciones críticas que aún persisten, las cuales deben ser resueltas si queremos asegurar el futuro de la logística. La integración efectiva de tecnologías avanzadas, junto con el desarrollo de modelos más adaptativos, será clave para garantizar sistemas logísticos eficientes, sostenibles y resilientes en un entorno cada vez más dinámico y complejo.

## CONCLUSIONES

Se observa un avance significativo en la generación automática de rutas, especialmente en lo que respecta a técnicas algorítmicas, modelos de optimización, tecnologías emergentes y enfoques sostenibles; no obstante, este progreso también pone en evidencia varios desafíos que aún deben superarse para asegurar una implementación efectiva de estos sistemas en diversos contextos. En el ámbito de la sostenibilidad, la logística ha dado pasos importantes gracias a innovaciones, tales como los vehículos eléctricos y los sensores avanzados, que contribuyen a reducir la huella de carbono.

A pesar de que estos avances son un paso en la dirección correcta hacia una logística más ecológica, problemas como la degradación de las baterías y los altos costos asociados con estas tecnologías siguen siendo barreras que necesitan ser abordadas mediante investigaciones que las hagan más accesibles, estandarizadas y sostenibles a largo plazo. En general, se puede concluir que persisten limitaciones significativas, tales como la falta de adaptabilidad de las soluciones a entornos urbanos densamente poblados o a regiones con infraestructuras tecnológicas limitadas, lo que permitiría el desarrollo de algoritmos más robustos y menos dependientes de la infraestructura tecnológica existente.

Finalmente, se resalta la necesidad de superar limitaciones tecnológicas, económicas y operativas para garantizar implementaciones exitosas en contextos diversos. En ese contexto, los trabajos futuros se centran en la generación de nuevos algoritmos y propuestas de soluciones que incluyan nuevas tecnologías como drones y sensores autónomos, entre otros.

## REFERENCIAS

- Abdullahi, H., Reyes-Rubiano, L., Ouelhadj, D., Faulin, J., & Juan, A. A. (2021). Modelling and multi-criteria analysis of the sustainability dimensions for the green vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 292(1), 143-154. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.10.028>
- Arifuddin, A., Utamima, A., Mahananto, F., Vinarti, R. A., & Fernanda, N. (2024). Optimizing the capacitated vehicle routing problem at PQR company: A genetic algorithm and Grey Wolf Optimizer approach. *Procedia Computer Science*, 234, 420-427. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.03.023>

- Chen, Z., Hajidavalloo, M. R., Li, Z., & Zheng, M. (2022). A cascaded learning framework for road profile estimation using multiple heterogeneous vehicles. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 144(10), 104501. <https://doi.org/10.1115/1.4055041>
- Comert, S. E., & Yazgan, H. R. (2023). A new approach based on hybrid ant colony optimization-artificial bee colony algorithm for multi-objective electric vehicle routing problems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 123, 106375. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106375>
- Cui, S., Sun, Q., & Zhang, Q. (2022). A time-dependent vehicle routing problem for instant delivery based on memetic algorithm. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, Artículo 5099008. <https://doi.org/10.1155/2022/5099008>
- D'Emidio, M., Delfaraz, E., Di Stefano, G., Frittella, G., & Vittoria, E. (2024). Route planning algorithms for fleets of connected vehicles: State of the art, implementation, and deployment. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(7), 2884. <https://doi.org/10.3390/app14072884>
- Dutta, P., Khatua, S., & Choudhury, S. (2023). Fast move: A prioritized vehicle rerouting strategy in smart city. *Vehicular Communications*, 44, 100666. <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2023.100666>
- Guan, X., & Li, G. (2023). Optimization of cold chain logistics vehicle transportation and distribution model based on improved ant colony algorithm. *Procedia Computer Science*, 228, 974-982. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.11.128>
- Hmamed, H., Benghabrit, A., Cherrafi, A., & Hamani, N. (2023). Achieving a sustainable transportation system via economic, environmental, and social optimization: A comprehensive AHP-DEA approach from the waste transportation sector. *Sustainability (Switzerland)*, 15(21), 15372. <https://doi.org/10.3390/su152115372>
- Ho, F., Goncalves, A., Rigault, B., Geraldés, R., Chicharo, A., Cavazza, M., & Prendinger, H. (2022). Multi-agent path finding in unmanned aircraft system traffic management with scheduling and speed variation. *IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine*, 14(5), 8-21. <https://doi.org/10.1109/MITS.2021.3100062>
- Hou, B., Zhang, K., Gong, Z., Li, Q., Zhou, J., Zhang, J., & De la Fortelle, A. (2023). SoC-VRP: A deep-reinforcement-learning-based vehicle route planning mechanism for service-oriented cooperative ITS. *Electronics (Switzerland)*, 12(20), 4191. <https://doi.org/10.3390/electronics12204191>

- Hu, H., Qin, H., Xu, G., Huang, N., & He, P. (2024). Column generation based hybrid optimization method for last-mile delivery service with autonomous vehicles. *Advanced Engineering Informatics*, 61, 102549. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102549>
- Hulagu, S., & Celikoglu, H. B. (2022). Environment-friendly school bus routing problem with heterogeneous fleet: A large-scale real case. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(4), 3461-3471. <https://doi.org/10.1109/TITS.2020.3036696>
- Idrissi, A., Benabbou, R., Benhra, J., & Haji, M. El. (2024). Smart waste collection based on vehicle routing optimization: Case of Casablanca city. *Procedia Computer Science*, 236, 194-201. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.05.021>
- İslim, R. B., & Çatay, B. (2024). An effective matheuristic approach for solving the electric traveling salesperson problem with time windows and battery degradation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 132, 107943. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.107943>
- Jiang, Z., Chen, W., Zheng, X., & Gao, F. (2024). Research on vehicle path planning of automated guided vehicle with simultaneous pickup and delivery with mixed time windows. *IET Collaborative Intelligent Manufacturing*, 6(2), e12105. <https://doi.org/10.1049/cim2.12105>
- Kawabe, T., Nishi, T., & Liu, Z. (2023). Flexible route planning for multiple mobile robots by combining Q-Learning and graph search algorithm. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(3), 1879. <https://doi.org/10.3390/app13031879>
- Kitchenham, B., Pearl Brereton, O., Budgen, D., Turner, M., Bailey, J., & Linkman, S. (2009). Systematic literature reviews in software engineering - A systematic literature review. *Information and Software Technology*, 51(1), 7-15. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2008.09.009>
- Küp, E. T., Cebeci, S., Bayram, B., Aydın, G., Bozkaya, B., & Akhavan-Tabatabaei, R. (2024). An integrated framework for dynamic vehicle routing problems with pick-up and delivery time windows and shared fleet capacity planning. *Symmetry*, 16(4), 505. <https://doi.org/10.3390/sym16040505>
- Li, J., Tian, S., Zhang, N., Liu, G., Wu, Z., & Li, W. (2023). Optimization strategy for electric vehicle routing under traffic impedance guidance. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(20), 11474. <https://doi.org/10.3390/app132011474>
- Li, T., He, Z., & Wu, Y. (2022). An integrated route planning approach for driverless vehicle delivery system. *PeerJ Computer Science*, 8, e1170. <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.1170>

- Liang, S., Song, B., & Xue, D. (2021). Landing route planning method for micro drones based on hybrid optimization algorithm. *Biomimetic Intelligence and Robotics*, 1, 100003. <https://doi.org/10.1016/j.birob.2021.100003>
- Liu, R., & Wang, N. (2022). Data-driven bus route optimization algorithm under sudden interruption of public transport. *IEEE Access*, 10, 5250-5263. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3140947>
- Liu, X., Ma, J., Chen, D., & Zhang, L. Y. (2021). Real-time unmanned aerial vehicle cruise route optimization for road segment surveillance using decomposition algorithm. *Robotica*, 39(6), 1007-1022. <https://doi.org/10.1017/S0263574720000867>
- Liu, Y., Zhang, H., Xu, T., & Chen, Y. (2022). A heuristic algorithm based on travel demand for transit network design. *Sustainability (Switzerland)*, 14(17), 11097. <https://doi.org/10.3390/su141711097>
- Mahdavi, L., Mansour, S., & Sajadieh, M. S. (2022). Sustainable multi-trip periodic redesign-routing model for municipal solid waste collection network: The case study of Tehran. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(24), 35944-35963. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-256948/v1>
- Martins, L. D. C., Tordecilla, R. D., Castaneda, J., Juan, A. A., & Faulin, J. (2021). Electric vehicle routing, arc routing, and team orienteering problems in sustainable transportation. *Energies*, 14(16), 5131. <https://doi.org/10.3390/en14165131>
- Mojtahedi, M., Fathollahi-Fard, A. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., & Newton, S. (2021). Sustainable vehicle routing problem for coordinated solid waste management. *Journal of Industrial Information Integration*, 23, 100220. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2021.100220>
- Nickkar, A., & Lee, Y. J. (2023). Optimal integrated single-framework algorithm for the multi-level school bus network problem. *Algorithms*, 16(11), 528. <https://doi.org/10.3390/a16110528>
- Nouicer, D., Msadaa, I. C., & Grayaa, K. (2023). A novel routing solution for EV fleets: A real-world case study leveraging double DQNs and graph-structured data to solve the EVRPTW problem. *IEEE Access*, 11, 122116-122127. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3327324>
- Pal, S. (2023). Steer towards sustainability: The roadmap to cost and eco-efficient transportation via AI-enhanced routing. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*, 11(12), 874-878. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.57467>
- Pan, S., Liao, H., Zheng, G., Huang, Q., & Shan, M. (2024). Cold chain distribution route optimization for mixed vehicle types of fresh agricultural products considering

- carbon emissions: A study based on a survey in China. *Sustainability (Switzerland)*, 16(18), 8207. <https://doi.org/10.3390/su16188207>
- Pan, Y., Li, L., Qin, J., Chen, J. J., & Gardoni, P. (2024). Unmanned aerial vehicle-human collaboration route planning for intelligent infrastructure inspection. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 39(14), 2074-2104. <https://doi.org/10.1111/mice.13176>
- Pustokhina, I. V., Pustokhin, D. A., Lydia, E. L., Elhoseny, M., & Shankar, K. (2021). Energy efficient neuro-fuzzy cluster based topology construction with metaheuristic route planning algorithm for unmanned aerial vehicles. *Computer Networks*, 196, 108214. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2021.108214>
- Raeesi, R., & Zografos, K. G. (2022). Coordinated routing of electric commercial vehicles with intra-route recharging and en-route battery swapping. *European Journal of Operational Research*, 301(1), 82-109. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.09.037>
- Ramirez, J. E., Santiago, C. M., & Kamiyama, A. (2022). Route planning using wireless sensor network for garbage collection in COVID-19 pandemic. *IJACSA International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 13(4). <https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2022.01304105>
- Ramirez-Robles, E., Starostenko, O., & Alarcon-Aquino, V. (2024). Real-time path planning for autonomous vehicle off-road driving. *PeerJ Computer Science*, 10. <https://doi.org/10.7717/PEERJ-CS.2209>
- Sang, W., Yue, Y., Zhai, K., & Lin, M. (2024). Research on AGV path planning integrating an improved A\* algorithm and DWA algorithm. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(17), 7551. <https://doi.org/10.3390/app14177551>
- Sathyamurthy, E., Herrmann, J. W., & Azarm, S. (2024). Hybrid metaheuristic approaches for the multi-depot rural postman problem with rechargeable and reusable vehicles. *IEEE Access*, 12, 86523-86540. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3414331>
- Shi, J., Zhang, J., Lei, H., Liu, Z., & Wang, R. (2023). Joint mission and route planning of unmanned air vehicles via a learning-based heuristic. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 34(1), 81-98. <https://doi.org/10.23919/JSEE.2023.000005>
- Shi, Y., Liu, W., & Zhou, Y. (2023). An adaptive large neighborhood search based approach for the vehicle routing problem with zone-based pricing. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 124, 106506. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106506>

- Sundarraaj, S., Reddy, R. V. K., Basam, M. B., Lokesh, G. H., Flammini, F., & Natarajan, R. (2023, 7 de agosto). Route planning for an autonomous robotic vehicle employing a weight-controlled particle swarm-optimized Dijkstra algorithm. *IEEE Access*, *11*, 92433-92442. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3302698>
- Szwarc, K., Nowakowski, P., & Boryczka, U. (2021). An evolutionary approach to the vehicle route planning in e-waste mobile collection on demand. *Soft Computing*, *25*(8), 6665-6680. <https://doi.org/10.1007/s00500-021-05665-w>
- Toathom, T., & Champrasert, P. (2024). Vehicle route planning for relief item distribution under flood uncertainty. *Applied Sciences (Switzerland)*, *14*(11). <https://doi.org/10.3390/app14114482>
- Tsolakis, N., Zissis, D., Papaefthimiou, S., & Korfiatis, N. (2022). Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals. *International Journal of Production Research*, *60*(14), 4508-4528. <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1914355>
- Wang, X., Liu, Z., & Li, X. (2023). Optimal delivery route planning for a fleet of heterogeneous drones: A rescheduling-based genetic algorithm approach. *Computers and Industrial Engineering*, *179*. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109179>
- Yan, L., Tang, Y., Peng, C., Cai, Y., Zhang, W., & Wang, J. (2023, 22 de diciembre). Ecological and real-time route selection method for multiple vehicles in urban road network. *Journal of Advanced Transportation*, *2023*, Artículo 3770800. <https://doi.org/10.1155/2023/3770800>
- Zhang, H., Gan, X., Li, S., & Chen, Z. (2022). UAV safe route planning based on PSO-BAS algorithm. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, *33*(5), 1151-1160. <https://doi.org/10.23919/JSEE.2022.000111>
- Zhang, M. Y., Yang, S. C., Feng, X. J., Chen, Y. Y., Lu, J. Y., & Cao, Y. G. (2022). Route planning for autonomous driving based on traffic information via multi-objective optimization. *Applied Sciences (Switzerland)*, *12*(22), 11817. <https://doi.org/10.3390/app122211817>
- Zhao, L., Li, F., Sun, D., & Zhao, Z. (2024). An improved ant colony algorithm based on Q-learning for route planning of autonomous vehicle. *International Journal of Computers, Communications and Control*, *19*(3), 1-15. <https://doi.org/10.15837/ijccc.2024.3.5382>
- Zheng, C., Gu, Y., Shen, J., & Du, M. (2021). Urban logistics delivery route planning based on a single metro line. *IEEE Access*, *9*, 50819-50830. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3069415>

- Zhou, X., Wang, J., Liu, W., Pan, J., Zhao, T., Jiang, F., & Li, R. (2024). An intelligent connected vehicle material distribution route model based on k-center spatial cellular clustering and an improved cockroach optimization algorithm. *Symmetry*, *16*(6), 749. <https://doi.org/10.3390/sym16060749>
- Zhou, Y., Shu, J., Zheng, X., Hao, H., & Song, H. (2022). Real-time route planning of unmanned aerial vehicles based on improved soft actor-critic algorithm. *Frontiers in Neurorobotics*, *16*. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2022.1025817>





# DATOS DE LOS AUTORES

## **IRENE AGUILAR JUÁREZ**

Doctora en Educación por la Escuela Libre de Ciencias Políticas y Administración Pública de Oriente. Maestra en Ingeniería en Sistemas Computacionales. Ingeniera en Computación por el Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec. Graduada en Ingeniería en Computación en la Universidad Autónoma del Estado de México. Es profesora a tiempo completo en el Centro Universitario UAEM Texcoco adscrito a la Universidad Autónoma del Estado de México. Coordinadora en la maestría en Ciencias Computacionales. Cuenta con veinte años de experiencia docente en nivel superior y cinco años en el nivel medio superior de carreras de naturaleza tecnológica. Sus temas de interés son los problemas de investigación que abordan la tecnología educativa que se introduce en la práctica docente para lograr actividades atractivas, motivadoras y enriquecedoras para el estudiante; y la actualización de la plana docente en métodos de didáctica acorde con la evolución tecnológica en la sociedad.

## **MARÍA XÓCHITL ALTAMIRANO HERRERA**

Doctora en Educación y Cultura Digital Pedagógica por el Centro Regional de Educación Superior Paulo Freire A. C. Sus líneas de generación y aplicación del conocimiento son el desarrollo de *software* y sistemas móviles.

## **HORACIO BAUTISTA SANTOS**

Doctor en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores Nivel 1. Sus líneas de generación y aplicación del conocimiento son la investigación operativa, economía social y solidaria, logística y cadenas de suministro agroalimentarias rurales.

### **OLDA BUSTILLOS ORTEGA**

Magíster en Informática con especialidad en Auditoría Informática por la Universidad Latina de Costa Rica. Actualmente, se desempeña como directora de la Escuela de Ingeniería Informática y docente investigadora en la Universidad Internacional de las Américas. Ha recibido reconocimientos por su participación en la XI Conferencia "Servicios creativos y modernos para el comercio y desarrollo sostenible" de La Red Latinoamericana y Caribeña para la Investigación en Servicios (REDLAS), en The 2022 International Conference on Information Technology & Systems (ICITS'22) y como *honorary academician of social sciences* en la International Academy of Social Sciences (IASS) en Palm Beach, Florida, Estados Unidos. Sus intereses de investigación incluyen inteligencia artificial, ciberseguridad y desarrollo de sistemas inteligentes.

### **JONATHAN BRUCE CÁRDENAS RONDOÑO**

Ingeniero de Sistemas por la Universidad de Lima, con experiencia en desarrollo *full-stack* y análisis de tecnologías de la información. En el ámbito académico, se enfoca en temas relacionados con la visión computacional y el diseño de sistemas inteligentes.

### **MARCO ANTONIO CORAL YGNACIO**

Candidato a doctor en Ingeniería de Sistemas por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM). Magíster en Ciencias en Ingeniería de Sistemas y Computación, experto en temas de transformación digital en universidades. Ha sido responsable técnico del proyecto Cero Papel en la UNMSM trabajando con sistemas de gestión documentaria con firma digital, implementación de documentos digitales (grados, títulos y otros), integración de sistemas y generación de servicios para la universidad. Ha sido jefe de la Unidad de Tecnología Educativa, jefe de la Unidad de Servidores y Sistemas de Información de la Red Telemática-UNMSM y jefe de la Oficina de Calidad y Acreditación Académica de la FISI-UNMSM, responsable de la acreditación de los programas de posgrado e implementación de la norma ISO 9001:2015.

### **CARLOS DE LA O FONSECA**

Ingeniero de *Software* por la Universidad Cenfotec. Actualmente, se desempeña como docente investigador. Sus intereses de investigación incluyen metodologías ágiles e inteligencia artificial.

### **BERTHA HAYDEÉ DÍAZ-GARAY**

Doctora en Ciencias Contables y Empresariales por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Magíster en Administración por la Universidad del Pacífico. Ingeniera química por la Universidad Nacional de Ingeniería (Perú). Con especialización internacional en Gestión de la Innovación por la Universidad ESAN de Perú, Stage Internacional de Innovación en La Salle (Universidad Ramón LLull de España) y especialización en Design Thinking y Transformación Digital por MIT Executive Education (Estados Unidos).

### **EDWIN JHONATAN ESCOBEDO CÁRDENAS**

Doctor y magíster en Ciencias de la Computación por la Universidade Federal de Ouro Preto (Brasil). Bachiller en Ciencias de la Computación e Ingeniería Informática por la Universidad Nacional de Trujillo. Actualmente, se desempeña como docente en la carrera de Ingeniería de Sistemas de la Universidad de Lima y es investigador registrado en Renacyt. Sus áreas de interés incluyen la visión computacional, el aprendizaje automático (*machine learning*) y la ciencia de datos.

### **ROGELIO GARCÍA-RODRÍGUEZ**

Candidato a doctor en Tecnología Avanzada por IPN-CICATA Altamira. Magíster en Ciencias de la Computación por el TecNM Instituto Tecnológico de Ciudad Madero. Sus líneas de generación y aplicación del conocimiento son la ingeniería y el desarrollo sustentable.

### **GIAN PAUL IPARRAGUIRRE LEYVA**

Estudiante de Ingeniería de Sistemas en la Universidad Católica Sedes Sapientiae. Actualmente, se desempeña como analista de *networking* con funciones orientadas a la gestión y soporte de infraestructura de tecnologías de la información. Cuenta con experiencia en microinformática, configuración de dispositivos de red, monitoreo de sistemas y soporte técnico especializado. Ha desarrollado investigaciones aplicadas en la generación automática de rutas para entregas integrando inteligencia artificial y modelos de optimización para la mejora de procesos logísticos. Su formación académica se complementa con conocimientos en sistemas operativos, seguridad informática y operación de centros SOC.

### **DANIEL MENA BOCKER**

Ingeniero de *software* por la Universidad Magister. Actualmente, se desempeña como docente investigador y cursa una maestría en Seguridad Informática en la misma institución. Sus intereses de investigación son la ciberseguridad y la inteligencia artificial.

### **EDGARDO ROBERTO MONTERO SARMIENTO**

Magíster por la Escuela de Negocios ESAN. Ingeniero Industrial por la Universidad de Lima. Certificación *scrum master*. Analista financiero europeo certificado (CEFA-EFFAS). Consultor independiente en las áreas de finanzas, estrategia y transformación digital. Exgerente de investigación y desarrollo de la Cámara Peruana de la Construcción. Exgerente de auditoría continua y procesos en BBVA Continental. Exgerente de finanzas en BBVA Continental. Exgerente de planeamiento estratégico en BBVA Continental.

### **JORGE MURILLO GAMBOA**

Magíster en Computación con especialidad en Telemática por el Instituto Tecnológico de Costa Rica. Actualmente, es docente investigador y cuenta con el reconocimiento de IEEE *senior member*, además de ser miembro de la IEEE Computer Society PEAB At Large y del EIT BOK Core Writing Team. Ha recibido distinciones como *valued member and supporter* en junio del 2016 y *certificate of appreciation* en diciembre del 2014 por la IEEE Computer Society. Sus intereses de investigación abarcan la inteligencia artificial, la ciberseguridad y el desarrollo de habilidades y competencias digitales de acuerdo con el modelo SFIA.

### **MARIA TERESA NORIEGA-ARANÍBAR**

Doctora en Ciencias Contables y Empresariales por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, magíster en Ciencias en Industrias Forestales por la Universidad Nacional Agraria La Molina e ingeniera industrial por la Universidad de Lima. Asesora de investigaciones de tesis y de mejora de procesos en empresas. Editora de la revista *Ingeniería Industrial*. Evaluadora del Premio Nacional a la Calidad.

### **OLMAN NÚÑEZ PERALTA**

Magíster en Base de Datos por la Universidad Cenfotec. Actualmente, es docente investigador en la Universidad Internacional de las Américas. Interesado en base de datos, *machine learning* e inteligencia artificial.

### **PABLO PYTEL**

Doctor en Ciencias Informáticas por la Universidad Nacional de La Plata. Magíster en Ingeniería de Software por la Universidad Politécnica de Madrid e Instituto Tecnológico de Buenos Aires. Ingeniero en Sistemas de Información de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Buenos Aires (UTN FRBA). Actualmente, se desempeña como profesor en la UTN FRBA y en la Universidad Nacional de Lanús.

### **ABEL ANTONIO MARTIN REAÑO VERA**

Magíster en Administración de Empresas por la Universidad del Pacífico, Ingeniero Industrial por la Universidad Inca Garcilaso de la Vega, especializado en Comercio Exterior en Japón. Asimismo, especializado en desarrollo textil y confecciones en Taiwán, Corea del Sur y otros países. Capacitado en RSE, sostenibilidad, industria 4.0, ética industrial y *compliance* en Alemania, entre otros temas de interés industrial en diversas entidades del Perú y el mundo.

### **FABIÁN RODRÍGUEZ SIBAJA**

Magíster en Administración de Proyecto por la Universidad para la Cooperación Internacional. Actualmente, es docente investigador. Interesado en metodologías de desarrollo de *software*, inteligencia artificial y sistemas de información de apoyo a los negocios.

### **PABLO ALBERTO ROJAS JAÉN**

Magíster en Administración de Empresas y Tecnología de la Información con doble titulación de la Universidad de Lima y la Universidad Autónoma de Barcelona. Ingeniero de Sistemas por la Universidad de Lima. Profesor asociado a tiempo completo e inventor de tres patentes registradas. Coordinador de los laboratorios ITLAB y SAP Next-Gen de la Universidad de Lima, donde lidera proyectos de coinnovación con tecnologías disruptivas, así como desarrollos móviles, web y realidad virtual.

### **PAULINO SALAS MARTÍNEZ**

Magíster en Ingeniería Industrial por el TecNM Instituto Tecnológico Superior de Tantoyuca. Sus líneas de generación y aplicación del conocimiento son la ingeniería y el desarrollo sustentable.

### **LESLIE JASIEL SÁNCHEZ CORTÉS**

Estudiante de décimo semestre de Ingeniería en Computación en la Universidad Autónoma del Estado de México. Actualmente, se desempeña como docente de programación en Algorithmics Texcoco, donde trabaja con niños y jóvenes en el desarrollo de habilidades digitales y pensamiento lógico. Interesada por el uso de la tecnología como herramienta para la enseñanza. Fue mentora académica en su universidad, donde apoyó a compañeros en materias complejas como electrónica, programación y redes. Esa experiencia le permitió identificar áreas clave de mejora en los procesos de aprendizaje en carreras técnicas, lo que motivó su enfoque en el uso educativo de las tecnologías emergentes.

### **FABIOLA SÁNCHEZ-GALVÁN**

Doctora en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro por la Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. Miembro del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores Nivel 1. Sus líneas de generación y aplicación del conocimiento son la investigación operativa, economía social y solidaria, logística y cadenas de suministro agroalimentarias rurales.

### **NICOLÁS SIMONCINI**

Cuenta con una especialización del Programa de Posgrado en Gestión de Proyectos de la Universidad Tecnológica Nacional. Actualmente, está afiliado a la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional de Buenos Aires, donde ha finalizado la especialización en Ingeniería en Sistemas de Información y se encuentra trabajando en su tesis de maestría en Ingeniería en Sistemas de Información. Ingeniero en Informática por la Universidad de las Fraternidades de Agrupaciones Santo Tomás de Aquino (FASTA) en Mar del Plata, Argentina. Cuenta con más de veinticinco años de experiencia profesional en el ámbito del desarrollo de *software*, en el que se ha desempeñado como líder y gerente de desarrollo en empresas locales y multinacionales. A lo largo de su carrera, ha ocupado roles como desarrollador, líder de desarrollo, gerente de desarrollo, arquitecto de *software*, líder de arquitectos y líder de operaciones. Se encuentra especialmente interesado en el diseño y desarrollo de *frameworks* de *software*, así como en arquitecturas de *software*.

### **NERS ARMANDO VASQUEZ ESPINOZA**

Ingeniero de sistemas por la Universidad de Lima. Actualmente, se desarrolla en áreas de *big data* y nube. Interesado en actualizarse en áreas relacionadas a analítica, IA y *machine learning*.

### **RUTH VÁSQUEZ RIVAS PLATA**

Doctora en Ciencias Contables y Financieras por la Universidad San Martín de Porres y en Ciencias Administrativas por la Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Magíster en Finanzas por la Universidad del Pacífico y en Administración por Keller Graduate School of Management. Ingeniera Industrial por la Universidad de Lima. Cuenta con más de quince años de experiencia en las áreas de presupuesto y finanzas en la empresa privada. Ha sido gerente del Área de Contabilidad y Finanzas. Cuenta con más de veinte años de experiencia docente. Ha sido directora de la carrera de Ingeniería Industrial de la Universidad de Lima.



