LIBRO COLECTIVO

CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA

Innovación y soluciones para los desafíos del mundo actual



CIENCIA | INGENIERÍA | TECNOLOGÍA | DESARROLLO SOSTENIBLE

Ciencia, Ingeniería y Tecnología Aplicada

Editorial Hambatu Sapiens
Octubre2026

Copyright © Editorial Hambatu Sapiens

Copyright del texto © 2026 de Autor

International Publication Technical Data

Title: Ciencia, Ingeniería y Tecnología Aplicada.
Publisher: Editorial Hambatu Sapiens
Author: Escobar Cabrera, Kevin; Constenla Núñez, Jaime Aroldo; Jara Coatt, Pilar; Sáez Delgado, Fabiola; Mella-Norambuena, Javier; Correa Gutiérrez, Paula; Rodríguez Gómez, Richard; Aravena Eriz, Eduardo; Cortés Tenorio, Jorge; García Vásquez, Héctor; Álvarez Sepúlveda, Humberto; Ccorisapra Quintana, Jeferson; Vega Otazu, Edison; Porras Durand, Luis; Lopez Ibañez, Silvia Soledad; Villegas Casaverde, Medalit; Jaramillo Sangurima, Wilson Eduardo; Roque Rodríguez, Francisco Javier; Zegarra Panca, Paulino Rodolfo.
Format: PDF
Pages: 247 pág.
Size: A4 21x29.7cm
System Requirements: *Adobe Acrobat Reader*
Access Mode: *World Wide Web*
ISBN: 978-9907-805-35-2
DOI: https://doi.org/10.63862/ehs-978-9907-805-35-2

Primera edición, año 2026. Publicado por Editorial Hambatu Sapiens.

El contenido de esta obra, así como la veracidad y precisión de los datos presentados, son responsabilidad exclusiva de su autor. Se permite la descarga y distribución libre del libro, siempre que se reconozca debidamente la autoría y no se modifique ni se utilice con fines comerciales. Uso exclusivo para fines educativos y de divulgación.

® CIENCIA, INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA APLICADA.

© 2026. Escobar Cabrera, Kevin; Constenla Núñez, Jaime Aroldo; Jara Coatt, Pilar; Sáez Delgado, Fabiola; Mella-Norambuena, Javier; Correa Gutiérrez, Paula; Rodríguez Gómez, Richard; Aravena Eriz, Eduardo; Cortés Tenorio, Jorge; García Vásquez, Héctor; Álvarez Sepúlveda, Humberto; Ccorisapra Quintana, Jeferson; Vega Otazu, Edison; Porras Durand, Luis; Lopez Ibañez, Silvia Soledad; Villegas Casaverde, Medalit; Jaramillo Sangurima, Wilson Eduardo; Roque Rodríguez, Francisco Javier; Zegarra Panca, Paulino Rodolfo.

Licencia y derechos de uso

Ciencia, Ingeniería y Tecnología Aplicada, está licenciada bajo una Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional **(CC BY-NC-ND 4.0)**.

Para ver una copia de esta licencia, visite:

https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

El contenido de esta obra, así como la veracidad y precisión de los datos presentados, son responsabilidad exclusiva de cada autor. Se permite la descarga y distribución libre del libro, siempre que se reconozca debidamente la autoría y no se modifique ni se utilice con fines comerciales. Uso exclusivo para fines educativos y de divulgación.

Editorial Hambatu Sapiens

Primera edición

Fecha de publicación: 14/10/2026

ISBN 978-9907-805-35-2

Prólogo

La historia de la humanidad está profundamente vinculada con su capacidad para observar, comprender y transformar el entorno mediante el conocimiento. Desde los primeros instrumentos desarrollados por las civilizaciones antiguas hasta los actuales sistemas de inteligencia artificial, la ciencia, la ingeniería y la tecnología han constituido pilares fundamentales del progreso humano. Sin embargo, su importancia no reside únicamente en la creación de herramientas o en la resolución de problemas técnicos, sino también en su capacidad para transformar las formas de pensar, aprender, producir, comunicarse y relacionarse con el mundo.

En el siglo XXI, esta relación adquiere una relevancia particular. La acelerada transformación digital, la automatización de procesos, la expansión de los sistemas inteligentes y la creciente complejidad de los desafíos sociales y productivos demandan nuevas formas de generar y aplicar el conocimiento. Las fronteras tradicionales entre disciplinas se vuelven cada vez más permeables, dando lugar a escenarios en los que la innovación surge de la interacción entre diferentes campos científicos, tecnológicos y humanísticos. En este contexto, comprender la tecnología exige reconocer tanto sus fundamentos técnicos como sus implicaciones educativas, económicas, históricas y sociales.

La obra *Ciencia, Ingeniería y Tecnología Aplicada* nace de esta perspectiva integradora. A través de diez capítulos desarrollados por investigadores y académicos de diferentes áreas del conocimiento, el libro reúne contribuciones que permiten examinar la evolución de la ciencia y sus aplicaciones en escenarios contemporáneos. Su riqueza temática se manifiesta en la diversidad de enfoques que aborda, desde los entornos inteligentes de aprendizaje y las tecnologías inmersivas hasta el estudio histórico de mecanismos antiguos, la transformación del comercio electrónico, los sistemas de apoyo a la toma de decisiones y la simulación de procesos de ingeniería química.

Uno de los aspectos más significativos de esta publicación es su aproximación a la inteligencia artificial y a las tecnologías emergentes desde una perspectiva que supera su dimensión instrumental. Los estudios relacionados con el aprendizaje adaptativo, los metaversos educativos y los avatares inteligentes permiten reflexionar sobre las posibilidades de construir experiencias formativas más dinámicas, personalizadas e

interactivas. Al mismo tiempo, plantean interrogantes sobre la mediación tecnológica, la presencia afectiva, el desarrollo de competencias y la transformación del papel de los docentes en entornos digitales.

La obra también invita a reconsiderar la historia de la tecnología como una fuente indispensable para comprender el presente. Los capítulos dedicados al mecanismo de Anticitera y a los autómatas de Grecia y Roma muestran que la inquietud humana por representar procesos, automatizar movimientos y construir dispositivos capaces de ejecutar operaciones complejas posee antecedentes mucho más antiguos de lo que suele suponerse. Estas investigaciones enriquecen el diálogo entre la historia de la ciencia y las innovaciones contemporáneas, recordándonos que el conocimiento tecnológico se construye mediante procesos históricos de experimentación, continuidad, transformación y, en ocasiones, discontinuidad.

Desde otra perspectiva, los estudios sobre comercio electrónico, confianza digital, experiencia del cliente y comportamiento del consumidor turístico permiten reconocer que la innovación tecnológica también modifica las relaciones económicas y comerciales. La digitalización ha transformado los mecanismos mediante los cuales las organizaciones interactúan con sus usuarios, generan confianza y desarrollan estrategias competitivas. En consecuencia, el análisis de estas dinámicas resulta fundamental para comprender los desafíos de la gestión empresarial y del marketing en mercados cada vez más interconectados.

La ingeniería aplicada encuentra igualmente un espacio relevante en esta publicación. El desarrollo de sistemas multicriterio para apoyar decisiones relacionadas con la vivienda social sostenible y la utilización de herramientas de simulación en procesos de ingeniería química evidencian la importancia de integrar modelos matemáticos, criterios técnicos y tecnologías computacionales para abordar problemas complejos. Estas contribuciones ponen de manifiesto que la ingeniería contemporánea no puede limitarse al diseño de soluciones funcionales, sino que debe considerar también la eficiencia, la sostenibilidad y la pertinencia de sus aplicaciones.

Más allá de la diversidad de los temas tratados, existe un principio que articula el conjunto de esta obra: el conocimiento adquiere mayor trascendencia cuando puede relacionarse con problemas, necesidades y oportunidades concretas. La investigación científica, el

desarrollo tecnológico y la innovación constituyen procesos complementarios que permiten avanzar desde la comprensión de los fenómenos hacia la construcción de propuestas capaces de generar nuevos conocimientos y orientar transformaciones en diferentes ámbitos de la sociedad.

En este sentido, la publicación representa un espacio de encuentro interdisciplinario que reconoce la importancia de compartir resultados, propuestas y reflexiones científicas. Cada capítulo aporta una mirada particular que, al integrarse con las demás, amplía las posibilidades de comprender la relación entre ciencia, ingeniería y tecnología. Esta diversidad constituye una de las principales fortalezas del libro, pues invita al lector a establecer conexiones entre campos que, aunque aparentemente distantes, comparten el propósito de comprender y transformar la realidad.

Editorial Hambatu Sapiens reafirma, mediante esta publicación, su compromiso con la difusión del conocimiento científico y la promoción de espacios académicos que favorezcan el intercambio de ideas, la reflexión crítica y la construcción colectiva del saber. La divulgación de investigaciones y propuestas interdisciplinarias constituye una contribución al fortalecimiento de la cultura científica y al acceso a conocimientos que pueden enriquecer la formación profesional, la práctica investigativa y el desarrollo de nuevas iniciativas.

Se espera que *Ciencia, Ingeniería y Tecnología Aplicada* constituya una fuente de consulta y reflexión para investigadores, docentes, estudiantes, profesionales y lectores interesados en comprender los desafíos y oportunidades que acompañan al desarrollo científico y tecnológico. Más que ofrecer respuestas definitivas, esta obra invita a formular nuevas preguntas, explorar conexiones entre disciplinas y reconocer que el progreso del conocimiento requiere curiosidad intelectual, rigurosidad metodológica, creatividad y responsabilidad social.

La ciencia nos permite comprender el mundo; la ingeniería nos proporciona herramientas para intervenir en él; y la tecnología amplía nuestras posibilidades de transformación. Cuando estas dimensiones dialogan entre sí y se orientan hacia el bienestar colectivo, el conocimiento trasciende sus límites disciplinares y se convierte en una fuerza capaz de contribuir a la construcción de un futuro más innovador, sostenible y humano.

Indice general

International Publication Technical Data ii

Prólogo iv

Indice general vii

Introducción 1

Capítulo I 6

Entornos de Aprendizaje Adaptativos e Inteligentes: Desarrollo de Competencias en IA en Educación Superior Técnico-Profesional 6

Adaptive and Intelligent Learning Environments: Developing AI Skills in Technical and Vocational Higher Education 6

Kevin Escobar Cabrera 6

Dr. Jaime Aroldo Constenla Núñez 6

Dra. Pilar Jara Coatt 6

Capítulo II 31

Simulaciones Inmersivas en Metaversos Educativos: Inteligencia Artificial, Presencia Virtual y Biofeedback para el Entrenamiento Socioemocional Docente 31

Fabiola Sáez-Delgado 31

Javier Mella-Norambuena 31

Paula Correa-Gutiérrez 31

Richard Rodríguez-Gómez 31

Eduardo Aravena Eriz 31

Capítulo III 53

SEL-Resonant Embodied Avatars (SEL-REA) en la Formación Docente: Un Modelo Interdisciplinario de Agencia, Presencia Afectiva y Mediación Tecnológica 53

SEL-Resonant Embodied Avatars (SEL-REA) in Teacher Education: An Interdisciplinary Model of Agency, Affective Presence, and Technological Mediation 53

Fabiola Sáez-Delgado 53

Javier Mella- Norambuena 53

Jorge Cortés-Tenorio 53

Paula Correa-Gutérrez 53

Héctor García-Vásquez 53
Richard Rodríguez-Gómez 53

Capítulo IV 90

¿Una tecnología fuera de su tiempo? El mecanismo de Anticitera y los límites del conocimiento sobre la ciencia helenística 90

A Technology Ahead of Its Time? The Antikythera Mechanism and the Limits of Our Knowledge of Hellenistic Science 90

Humberto Álvarez Sepúlveda 90

Capítulo V 106

¿Puede hablarse de una forma primitiva de robótica en Grecia y Roma? Autómatas, programación mecánica y vida artificial en el mundo clásico 106

Can We Speak of a Primitive Form of Robotics in Ancient Greece and Rome? Automata, Mechanical Programming, and Artificial Life in the Classical World 106

Humberto Álvarez Sepúlveda 106

Capítulo VI 121

Confianza digital en la intención de compra dentro del e-commerce B2C: Un estudio en los nodos comerciales 121

Impact of digital trust on purchase intent within B2C e-commerce: A study in commercial nodes 121

Jeferson Ccorisapra Quintana 121
Edison Vega Otazu 121
Luis Porras Durand 121
Silvia Soledad Lopez Ibañez 121
Medalit Villegas Casaverde 121

Capítulo VII 139

Experiencia del cliente como impulsora de la lealtad en el e-commerce: revisión analítica de la literature 139

Customer experience as a driver of loyalty in e-commerce: an analytical review of the literature 139

Luis Porras Durand 139
Jeferson Ccorisapra Quintana 139

Edison Vega Otazu 139
Silvia Soledad Lopez Ibañez 139
Medalit Villegas Casaverde 139

Capítulo VIII 163

De la estrategia digital a la decisión del viajero: una revisión de la literatura sobre marketing y comportamiento del consumidor turístico 163

From digital strategy to the traveler's decision: a review of the literature on marketing and tourist consumer behavior 163

Medalit Villegas Casaverde 163
Jeferson Ccorisapra Quintana 163
Edison Vega Otazu 163
Silvia Soledad Lopez Ibañez 163
Luis Porras Durand 163

Capítulo IX 183

Análisis Multicriterio PRO: evaluación funcional de un sistema de apoyo a la decisión AHP–TOPSIS para vivienda social sostenible 183

Multicriteria Analysis PRO: Functional Evaluation of an AHP–TOPSIS Decision Support System for Sustainable Social Housing 183

Wilson Eduardo Jaramillo Sangurima 183

Capítulo X 208

Ingeniería de reacciones químicas asistida por simulación aplicada a la hidrogenación selectiva de acetileno 208

Simulation-Assisted Chemical Reaction Engineering Applied to the Selective Hydrogenation of Acetylene 208

Francisco Javier Roque Rodríguez 208
Paulino Rodolfo Zegarra Panca 208

Introducción

El desarrollo científico y tecnológico constituye uno de los principales factores de transformación de las sociedades contemporáneas. Su influencia se manifiesta en prácticamente todos los ámbitos de la actividad humana, desde la educación y la producción industrial hasta las relaciones comerciales, la planificación de infraestructuras y la gestión de procesos complejos. En este escenario, la generación de conocimiento requiere enfoques que permitan comprender los fenómenos desde diferentes perspectivas y establecer conexiones entre la investigación científica, el desarrollo de soluciones tecnológicas y su aplicación en contextos específicos.

La ciencia, la ingeniería y la tecnología mantienen una relación de complementariedad que resulta esencial para comprender los procesos de innovación. Mientras la ciencia busca explicar los fenómenos mediante procedimientos sistemáticos de investigación, la ingeniería utiliza principios científicos, modelos y herramientas técnicas para diseñar soluciones a problemas concretos. Por su parte, la tecnología comprende conocimientos, métodos, procesos y dispositivos que permiten materializar dichas soluciones y ampliar las capacidades humanas. Esta interacción favorece la construcción de respuestas interdisciplinarias frente a los desafíos que caracterizan a las sociedades actuales.

Bajo esta perspectiva, el libro *Ciencia, Ingeniería y Tecnología Aplicada* reúne diez capítulos que abordan diferentes dimensiones del conocimiento científico y tecnológico. La publicación integra investigaciones, revisiones analíticas y propuestas de innovación que permiten examinar tanto los antecedentes históricos de determinadas tecnologías como sus aplicaciones contemporáneas en educación, comercio electrónico, turismo e ingeniería. La diversidad de los temas tratados responde a una concepción amplia de la tecnología, entendida como un fenómeno que involucra dimensiones técnicas, sociales, económicas, educativas e históricas.

Los primeros tres capítulos se concentran en la aplicación de tecnologías inteligentes e inmersivas a los procesos educativos, especialmente en el ámbito de la educación superior y la formación docente. El primer capítulo, titulado *Entornos de Aprendizaje Adaptativos e Inteligentes: Desarrollo de Competencias en IA en Educación Superior Técnico-Profesional*, presenta una propuesta de innovación orientada a integrar aprendizaje

adaptativo, gamificación y tutoría inteligente. Su planteamiento considera la necesidad de desarrollar competencias para utilizar la inteligencia artificial de manera crítica, ética y contextualizada, reconociendo que su incorporación educativa requiere una adecuada articulación entre los recursos tecnológicos y los objetivos pedagógicos.

El segundo capítulo, *Simulaciones Inmersivas en Metaversos Educativos: Inteligencia Artificial, Presencia Virtual y Biofeedback para el Entrenamiento Socioemocional Docente*, introduce una perspectiva interdisciplinaria sobre las posibilidades de los entornos virtuales inmersivos en la formación del profesorado. La articulación de inteligencia artificial, presencia virtual y biofeedback plantea nuevas oportunidades para explorar experiencias de entrenamiento socioemocional mediadas por tecnologías digitales. Este enfoque permite ampliar la discusión sobre las herramientas tecnológicas que pueden incorporarse a los procesos de formación y desarrollo profesional docente.

En continuidad con esta temática, el tercer capítulo, *SEL-Resonant Embodied Avatars (SEL-REA) en la Formación Docente: Un Modelo Interdisciplinario de Agencia, Presencia Afectiva y Mediación Tecnológica*, aborda la interacción entre agentes virtuales, dimensiones afectivas y procesos de mediación tecnológica. Su propuesta sitúa la formación docente en un escenario donde las experiencias de aprendizaje pueden enriquecerse mediante sistemas capaces de representar e incorporar nuevas formas de interacción. De esta manera, los tres capítulos iniciales establecen un espacio de reflexión sobre la transformación de los entornos educativos y las posibilidades de la inteligencia artificial para apoyar procesos formativos.

Los capítulos cuarto y quinto incorporan una dimensión histórica que permite examinar los antecedentes del pensamiento tecnológico y de la automatización. El cuarto capítulo, *¿Una tecnología fuera de su tiempo? El mecanismo de Anticitera y los límites del conocimiento sobre la ciencia helenística*, estudia uno de los dispositivos más significativos de la ingeniería antigua y plantea interrogantes sobre el alcance de los conocimientos científicos y técnicos desarrollados durante el período helenístico. Su análisis contribuye a reconsiderar las interpretaciones tradicionales sobre la evolución de la tecnología y la complejidad de los mecanismos construidos en la Antigüedad.

Por su parte, el quinto capítulo, *¿Puede hablarse de una forma primitiva de robótica en Grecia y Roma? Autómatas, programación mecánica y vida artificial en el mundo*

clásico, profundiza en los antecedentes históricos de la automatización mediante el estudio de los autómatas y los sistemas mecánicos desarrollados en las civilizaciones griega y romana. Esta contribución permite establecer un diálogo conceptual entre las antiguas tecnologías de movimiento automatizado y las nociones contemporáneas de robótica y programación, considerando las diferencias históricas y técnicas que existen entre estos desarrollos.

La inclusión de estas investigaciones históricas resulta especialmente relevante porque permite comprender que la innovación tecnológica no constituye un fenómeno exclusivo de la modernidad. Por el contrario, responde a una trayectoria de construcción del conocimiento en la que diferentes sociedades han desarrollado soluciones técnicas a partir de sus necesidades, recursos y capacidades científicas. Desde esta perspectiva, el estudio del pasado contribuye a enriquecer la comprensión de los procesos tecnológicos actuales.

Los capítulos sexto, séptimo y octavo trasladan el análisis hacia la transformación digital de los mercados y el comportamiento de los consumidores. El sexto capítulo, *Confianza digital en la intención de compra dentro del e-commerce B2C: Un estudio en los nodos comerciales,* examina la relación entre la confianza generada en los entornos digitales y las decisiones de compra de los consumidores. Su temática adquiere relevancia en un contexto donde las plataformas comerciales electrónicas modifican los mecanismos tradicionales de interacción entre empresas y clientes.

El séptimo capítulo, *Experiencia del cliente como impulsora de la lealtad en el e-commerce: revisión analítica de la literatura*, amplía esta discusión mediante el análisis de la experiencia del consumidor y su relación con la fidelización en los entornos comerciales digitales. Este enfoque permite comprender que el desarrollo tecnológico de las plataformas de comercio electrónico debe acompañarse de estrategias orientadas a mejorar la interacción, la percepción de valor y las relaciones sostenibles con los usuarios.

El octavo capítulo, *De la estrategia digital a la decisión del viajero: una revisión de la literatura sobre marketing y comportamiento del consumidor turístico*, incorpora el ámbito turístico al estudio de la transformación digital. A través de una revisión de la literatura, examina las relaciones entre las estrategias de marketing digital y los procesos de decisión del consumidor turístico. Esta contribución amplía el alcance de la obra al considerar un sector económico en el que las tecnologías de información y comunicación

intervienen en la búsqueda de información, la evaluación de alternativas y las decisiones relacionadas con los servicios turísticos.

En conjunto, estos tres capítulos permiten reconocer que la transformación digital no depende exclusivamente de la disponibilidad de herramientas tecnológicas, sino también de la comprensión de los factores humanos que condicionan su utilización. La confianza, la experiencia y el comportamiento del consumidor constituyen dimensiones fundamentales para interpretar las nuevas dinámicas comerciales y orientar estrategias empresariales en escenarios digitales.

El noveno capítulo, *Análisis Multicriterio PRO: evaluación funcional de un sistema de apoyo a la decisión AHP–TOPSIS para vivienda social sostenible*, aborda la aplicación de herramientas de análisis multicriterio a procesos de toma de decisiones. La integración de los métodos AHP y TOPSIS en un sistema de apoyo permite examinar alternativas considerando diferentes criterios de evaluación. Su aplicación al ámbito de la vivienda social sostenible representa un acercamiento a la utilización de herramientas computacionales y modelos de decisión para abordar problemáticas que involucran dimensiones técnicas, económicas y de sostenibilidad.

Finalmente, el décimo capítulo, *Ingeniería de reacciones químicas asistida por simulación aplicada a la hidrogenación selectiva de acetileno*, presenta una aproximación al uso de herramientas de simulación en el análisis de procesos de ingeniería química. La incorporación de modelos y recursos computacionales en el estudio de reacciones químicas permite explorar condiciones operativas y analizar el comportamiento de sistemas de interés industrial. Esta contribución evidencia la importancia de la simulación como herramienta de apoyo para la comprensión, evaluación y optimización de procesos en el campo de la ingeniería.

La organización temática de la obra permite identificar tres grandes ámbitos de aplicación del conocimiento: las tecnologías inteligentes y su mediación en los procesos educativos; la evolución histórica de los mecanismos y sistemas automatizados; y las aplicaciones de herramientas digitales, modelos analíticos y métodos computacionales en actividades económicas y de ingeniería. Aunque cada capítulo responde a objetivos y enfoques particulares, todos comparten el interés por comprender las posibilidades, limitaciones e implicaciones de la ciencia y la tecnología en diferentes contextos.

Desde el punto de vista académico, la publicación busca contribuir a la circulación del conocimiento y al fortalecimiento del diálogo interdisciplinario. La integración de estudios de distintas áreas permite reconocer que los problemas contemporáneos difícilmente pueden comprenderse desde una única disciplina. La educación requiere dialogar con la informática y las ciencias del comportamiento; el comercio digital demanda conocimientos tecnológicos, económicos y sociales; y la ingeniería necesita articular modelos científicos, herramientas computacionales y criterios de sostenibilidad.

Asimismo, la obra reconoce la importancia de mantener una perspectiva crítica frente al desarrollo tecnológico. La incorporación de nuevas herramientas no garantiza, por sí misma, mejoras en los procesos educativos, productivos o comerciales. Su pertinencia depende de la calidad de los diseños, la claridad de los objetivos, las condiciones de implementación y la evaluación de sus resultados. En consecuencia, la innovación debe comprenderse como un proceso fundamentado que requiere análisis, experimentación, validación y reflexión sobre sus efectos.

En este marco, *Ciencia, Ingeniería y Tecnología Aplicada* se presenta como una contribución académica dirigida a investigadores, docentes, estudiantes universitarios, profesionales de la ingeniería, especialistas en tecnología y lectores interesados en las múltiples expresiones del conocimiento aplicado. Sus capítulos ofrecen perspectivas que pueden servir como punto de partida para nuevas investigaciones, discusiones académicas y propuestas de innovación en distintos campos del saber.

En definitiva, esta obra invita a comprender la ciencia, la ingeniería y la tecnología como dimensiones interrelacionadas de un mismo proceso de construcción del conocimiento. Su estudio, aplicación y evolución requieren tanto rigor científico como creatividad, pensamiento crítico y responsabilidad social. Desde esta perspectiva, los diez capítulos que integran el libro representan una invitación a explorar las posibilidades del conocimiento aplicado y a continuar desarrollando investigaciones que contribuyan a responder a los desafíos de una sociedad en permanente transformación.

Capítulo I

Entornos de Aprendizaje Adaptativos e Inteligentes: Desarrollo de Competencias en IA en Educación Superior Técnico-Profesional

Adaptive and Intelligent Learning Environments: Developing AI Skills in Technical and Vocational Higher Education

Kevin Escobar Cabrera
Estudiante del Doctorado en Innovación Educativa
Facultad de Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0009-0003-4213-6336

Dr. Jaime Aroldo Constenla Núñez
Departamento Currículum, Evaluación y Tecnologías en Educación
Facultad de Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-3373-6888

Dra. Pilar Jara Coatt
Departamento de Curriculum, Evaluación y Tecnologías en Educación
Facultad de Educación
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
https://orcid.org/0000-0002-9975-8713

Resumen

Este capítulo presenta una propuesta de innovación educativa basada en el enfoque metodológico de la Investigación Basada en el Diseño (DBR) para abordar el uso inadecuado, acrítico y la "delegación cognitiva" de la Inteligencia Artificial (IA) en la educación superior. Ante los desafíos éticos y pedagógicos actuales, se propone el diseño e implementación de un prototipo unificado en la plataforma Moodle que articula tres componentes centrales: aprendizaje adaptativo, gamificación profunda y un tutor inteligente especializado sustentado en una arquitectura de Generación Aumentada por Recuperación (RAG). El núcleo innovador del proyecto radica en otorgarle a la IA una doble función: como herramienta de apoyo para la personalización y retroalimentación del aprendizaje en la asignatura de *Elementos de la Matemática* y como objeto de aprendizaje en sí mismo. Esto último se operativiza mediante "Desafíos Meta-IA", diseñados para que los estudiantes desarrollen de forma progresiva la competencia en IA a través de la práctica crítica del *prompting*, la evaluación de sesgos o limitaciones, y la responsabilidad ética. Finalmente, la propuesta valida su viabilidad técnica, pertinencia y escalabilidad mediante un enfoque evaluativo mixto (cuantitativo y cualitativo) estructurado en cinco ciclos iterativos de diseño y pilotaje.

Palabras clave: Competencia en Inteligencia Artificial; Aprendizaje Adaptativo; Gamificación Profunda; Investigación Basada en el Diseño (DBR)

Abstract

This chapter presents a proposal for educational innovation based on the Design-Based Research (DBR) methodological approach to address the inappropriate, uncritical use and "cognitive delegation" of Artificial Intelligence (AI) in higher education. In light of current ethical and pedagogical challenges, we propose the design and implementation of a unified prototype on the Moodle platform that integrates three central components: adaptive learning, deep gamification, and a specialized intelligent tutor based on a Retrieval-Augmented Generation (RAG) architecture. The innovative core of the project lies in assigning AI a dual role: as a support tool for personalizing learning and providing feedback in the course "Elements of Mathematics," and as a learning object in its own right. The latter is operationalized through "Meta-AI Challenges," designed to help students progressively develop AI competence through the critical practice of prompting, the evaluation of biases or limitations, and ethical responsibility. Finally, the proposal validates its technical feasibility, relevance, and scalability through a mixed-methods (quantitative and qualitative) evaluation approach structured into five iterative cycles of design and pilot testing.

Keywords: Artificial Intelligence Competence; Adaptive Learning; Deep Gamification; Design-Based Research (DBR)

Introducción

Identificación y validación del problema

Actualmente, la educación superior se encuentra en un proceso de constantes cambios debido a la irrupción de herramientas basadas en inteligencia artificial (IA), las cuales han transformado significativamente los procesos de enseñanza y aprendizaje (Carballo, 2025; Molina & Medina, 2025; Rajkumar et al., 2026; Younas et al., 2025). Sin embargo, este avance también ha traído nuevas tensiones y desafíos pedagógicos, como la pérdida de autenticidad intelectual en un contexto donde los estudiantes universitarios disponen de herramientas de IA capaces de generar respuestas a problemas complejos en segundos y de forma automática en distintos ámbitos disciplinares. Este mal uso de la IA, además de vulnerar principios éticos, puede conllevar una excesiva dependencia tecnológica (Blake, 2026; Carballo, 2025) y, con ello, debilitar la autonomía intelectual, generando un fenómeno de delegación cognitiva que, según Pozo y Gómez (2026), ocurre cuando el uso de la IA no se encuentra mediado pedagógicamente.

En este contexto, se identifica un problema relevante: el uso inadecuado y poco crítico de la inteligencia artificial por parte de los estudiantes de educación superior. Esta situación puede asociarse a una insuficiente formación en competencias en IA, entendidas como la capacidad de conocer, utilizar, evaluar críticamente y abordar las implicancias éticas de su uso (Lintner, 2024). Un componente relevante, que según Long et al. (2026) aún no ha sido explorado en profundidad, son los métodos de enseñanza como mediadores de este proceso, ya que cuando la IA se integra mediante estrategias pedagógicas estructuradas, como el aprendizaje personalizado, los sistemas adaptativos, la gamificación y las tecnologías inmersivas, se observan mejores resultados en la participación estudiantil y la adquisición de conocimientos.

Ante la escasez de propuestas pedagógicas innovadoras que orienten el uso de la inteligencia artificial hacia el desarrollo de competencias más complejas, en particular la competencia en IA, es que se propone un entorno de aprendizaje que articula el aprendizaje adaptativo, la gamificación y el uso de un tutor inteligente para promover el desarrollo de competencias en IA en educación superior. El carácter innovador de la propuesta radica en la conceptualización de una arquitectura pedagógica unificada,

diseñada explícitamente para responder a las demandas sobre competencias en IA para la educación superior.

Competencia en inteligencia artificial en educación superior

El desarrollo de la competencia en inteligencia artificial (IA) en educación superior ha cobrado creciente relevancia debido a la incorporación progresiva de estas tecnologías en los ámbitos académico y profesional. En la literatura se distinguen tres conceptos estrechamente relacionados: las habilidades en IA, la alfabetización en IA y la competencia en IA, cuya evolución conceptual sigue una lógica similar a la observada previamente en el ámbito de las competencias digitales (Department for Science, Innovation and Technology [DSIT], 2026).

En un primer nivel se encuentran las habilidades en IA, entendidas como capacidades técnicas específicas para interactuar con sistemas inteligentes o utilizar determinadas herramientas que la incorporan (DSIT, 2026). Sobre esta base se desarrolla la alfabetización en IA, definida como la capacidad para comprender, evaluar y utilizar sistemas de inteligencia artificial de manera informada y colaborativa (Long & Magerko, 2020). A diferencia de las habilidades, la alfabetización incorpora conocimientos sobre el funcionamiento, las posibilidades y las limitaciones de estas tecnologías, permitiendo reconocer cuándo y cómo resulta pertinente utilizarlas (DSIT, 2026).

Finalmente, la competencia en IA representa un nivel de mayor complejidad, ya que integra conocimientos, habilidades y actitudes para aplicar la inteligencia artificial de forma eficaz, crítica, ética y contextualizada (Jara-Coatt y Rodríguez-Gómez, 2026). Mientras la alfabetización se orienta principalmente a la comprensión y uso informado de la IA, la competencia enfatiza la capacidad de aplicar dichos conocimientos en la resolución de problemas reales, considerando además aspectos como la confianza, el juicio crítico y la responsabilidad en su utilización (Chiu, 2025). Este enfoque resulta especialmente pertinente en educación superior, donde se espera que los estudiantes desarrollen autonomía y pensamiento crítico para desenvolverse en entornos tecnológicos complejos.

Aprendizaje adaptativo en educación superior

El aprendizaje adaptativo se ha consolidado en la educación superior como una estrategia clave para responder a la heterogeneidad del alumnado, personalizando la experiencia educativa mediante la adecuación dinámica de contenidos y recursos según el progreso individual. Potenciado por la inteligencia artificial y el *Learning Analytics*, este enfoque permite identificar brechas y diseñar rutas diferenciadas con retroalimentación oportuna, lo que favorece el rendimiento, el compromiso y la autonomía del estudiante sin desplazar el rol orientador del docente. Sin embargo, el éxito de estos sistemas radica en una correcta articulación entre la tecnología y el diseño pedagógico, convirtiéndose en un pilar fundamental para guiar trayectorias personalizadas hacia el desarrollo de competencias en inteligencia artificial.

Gamificación profunda para el aprendizaje

La gamificación es una estrategia utilizada para aumentar la motivación y el compromiso estudiantil, aunque sus resultados dependen de su enfoque. Mientras la gamificación superficial se limita a recompensas como puntos o rankings, la gamificación profunda integra mecánicas de juego con objetivos educativos para promover la resolución de problemas, la toma de decisiones y la participación activa (Mozelius, 2021). Su implementación exitosa en la educación superior requiere un diseño pedagógico sólido y capacitación docente para garantizar aprendizajes significativos (Albán et al., 2024). Esto es primordial, dado que solo bajo un diseño intencionado y fundamentado pedagógicamente, la gamificación puede representar una estrategia mediadora para desarrollar habilidades cognitivas complejas (Escobar et al., 2026). Asimismo, cuando se articula con metodologías activas como el aprendizaje adaptativo, potencia el desarrollo de competencias (Hünicken, 2021), posicionándose como una herramienta idónea para abordar desafíos complejos como el uso inadecuado de la inteligencia artificial.

Tutores inteligentes para el aprendizaje

Los tutores inteligentes son una de las aplicaciones más consolidadas de la inteligencia artificial en educación, ofreciendo un acompañamiento flexible que adapta la retroalimentación según el desempeño del estudiante para complementar, y no reemplaza, la labor docente (García, 2025). En la educación superior, resultan clave en asignaturas complejas con ritmos heterogéneos al fortalecer el aprendizaje autorregulado y reducir

brechas académicas, existiendo evidencia de que generan mejoras significativas en el rendimiento respecto a las metodologías tradicionales cuando se integran de forma coherente (Carbonell & Hernández, 2024). Además, la incorporación de modelos de lenguaje avanzados ha potenciado su capacidad de interacción y personalización contextualizada (Mousavinasab et al., 2021), destacando actualmente por su precisión cognitiva e instrucción adaptativa (Latif et al., 2026).

Vacíos de investigación

A pesar del interés en incorporar la inteligencia artificial (IA) en la educación superior, la literatura evidencia una fragmentación y vacíos pedagógicos significativos. En primer lugar, la mayoría de las investigaciones utilizan la IA únicamente como herramienta de apoyo, siendo escasas las que la plantean como un objetivo formativo para desarrollar explícitamente competencias en IA (González & Pallarés, 2026). En segundo lugar, estrategias como el aprendizaje adaptativo, la gamificación y los tutores inteligentes suelen estudiarse de forma independiente, desaprovechando el potencial pedagógico de su articulación unificada. Por último, existe una limitada presencia de modelos que promuevan un uso crítico, ético y contextualizado que conciba a la IA no solo como soporte, sino como un objeto de aprendizaje en sí mismo; vacíos que justifican el diseño de un prototipo integrado para el desarrollo progresivo de competencias tecnológicas en los estudiantes.

Desarrollo

Propuesta de innovación

En este apartado se presenta la propuesta de innovación, describiendo el diseño conceptual del prototipo y los elementos que sustentan su funcionamiento. Para ello, se expone una visión general de la propuesta, su arquitectura, los componentes que la integran, el carácter innovador que la distingue de otros enfoques y la forma en que articula la inteligencia artificial con principios pedagógicos orientados al desarrollo de competencias en inteligencia artificial en educación superior.

Descripción general del prototipo

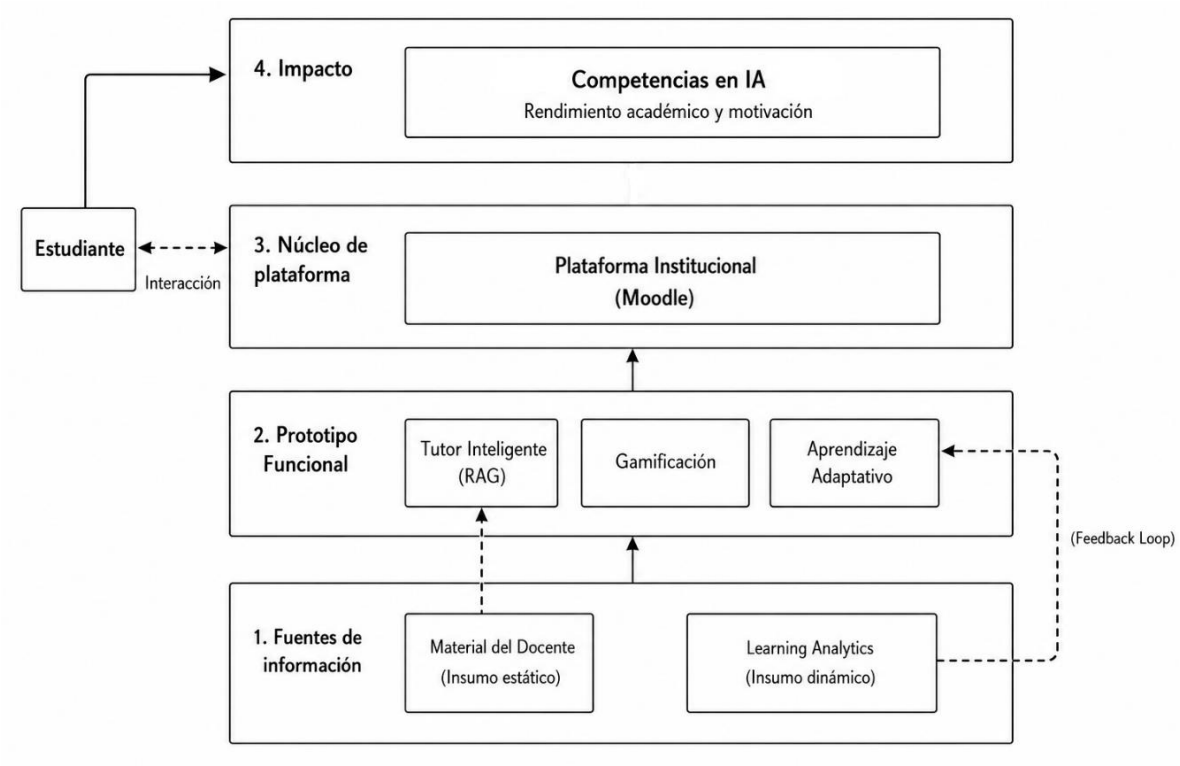
El prototipo propuesto se implementa en la plataforma Moodle con el objetivo de integrar el aprendizaje adaptativo, la gamificación y un tutor inteligente en un único entorno centrado en el estudiante, promoviendo así el desarrollo progresivo de competencias en inteligencia artificial (IA). Esta propuesta busca superar el uso meramente instrumental de la tecnología mediante una estrategia pedagógica que articula componentes técnicos y educativos para fomentar el aprendizaje activo, la reflexión crítica y el acompañamiento continuo. Para demostrar su funcionamiento, el sistema se contextualiza de manera auténtica en la asignatura de primer año *Elementos de la Matemática* en la Universidad Técnica Federico Santa María (UTFSM); sin embargo, posee una arquitectura modular que facilita su escalabilidad y adaptación a otras disciplinas y asignaturas de la educación superior.

Arquitectura general del prototipo

La arquitectura del prototipo se organiza en cuatro capas jerárquicas e interrelacionadas que articulan las dimensiones tecnológica y pedagógica, situando en su base las fuentes de información: el material estático del docente y la información dinámica aportada por el *Learning Analytics*. Mientras los recursos académicos del profesor alimentan al tutor inteligente mediante una arquitectura *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) para garantizar respuestas contextualizadas, la analítica del aprendizaje nutre el sistema adaptativo a través de un ciclo de retroalimentación (*feedback loop*) que ajusta dinámicamente las rutas formativas. Todo este ecosistema funcional, que integra al tutor, la gamificación y la adaptabilidad, opera de manera complementaria sobre la plataforma Moodle como entorno central de gestión, permitiendo que la interacción del estudiante con los recursos mejore su rendimiento, motivación y desarrollo progresivo de competencias en IA.

Figura 1

Modelo conceptual del prototipo de aprendizaje adaptativo gamificado con tutor inteligente



Componentes del prototipo

El prototipo se fundamenta en tres componentes integrados: el aprendizaje adaptativo, que personaliza el recorrido formativo mediante rutas diferenciadas y criterios de progresión basados en actividades diagnósticas y el desempeño del estudiante; el tutor inteligente, sustentado en una arquitectura *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) que garantiza respuestas contextualizadas al alinearse de forma exclusiva con los materiales proporcionados por el docente; y la gamificación, que promueve la motivación y el compromiso activo a lo largo de la asignatura mediante una narrativa transversal, un sistema de niveles, puntos, insignias y el desbloqueo progresivo de actividades.

Carácter innovador e integración pedagógica de la inteligencia artificial

El carácter innovador de la propuesta radica en la integración unificada de la gamificación profunda, el aprendizaje adaptativo y el tutor inteligente dentro de un diseño pedagógico que trasciende el uso puramente instrumental de la tecnología para convertirla en una mediadora del aprendizaje. A diferencia de los enfoques tradicionales u homogéneos, las mecánicas de juego se vinculan directamente con los objetivos educativos para fomentar

la toma de decisiones, mientras que la adaptabilidad responde de forma personalizada a las necesidades de cada estudiante. Desde esta perspectiva, la inteligencia artificial asume una doble función estratégica: opera como una herramienta que brinda acompañamiento y retroalimentación continua, y simultáneamente actúa como un objeto de aprendizaje, impulsando a los alumnos a analizar de manera crítica sus alcances, limitaciones e implicancias éticas para consolidar su competencia en IA.

Enfoque metodológico

La presente propuesta se enmarca en el enfoque del Design-Based Research (DBR), una metodología orientada al diseño, implementación y estudio de innovaciones educativas en contextos reales. Este enfoque busca generar conocimiento teórico y práctico a partir de la intervención en escenarios auténticos de aprendizaje. De acuerdo con el Design-Based Research Collective (2003), el DBR se define como una metodología sistemática que combina el diseño de soluciones educativas con su análisis iterativo en contextos reales, con el propósito de comprender y mejorar los procesos de enseñanza y aprendizaje. Este enfoque se caracteriza por su naturaleza cíclica, su orientación a la resolución de problemas complejos y su énfasis en la interacción entre teoría y práctica. En este sentido, el DBR resulta especialmente pertinente para esta propuesta, ya que permite abordar la complejidad del desarrollo de competencias en inteligencia artificial mediante la integración de múltiples dimensiones, como la gamificación, la tecnología y el diseño pedagógico.

Ciclos iterativos de diseño

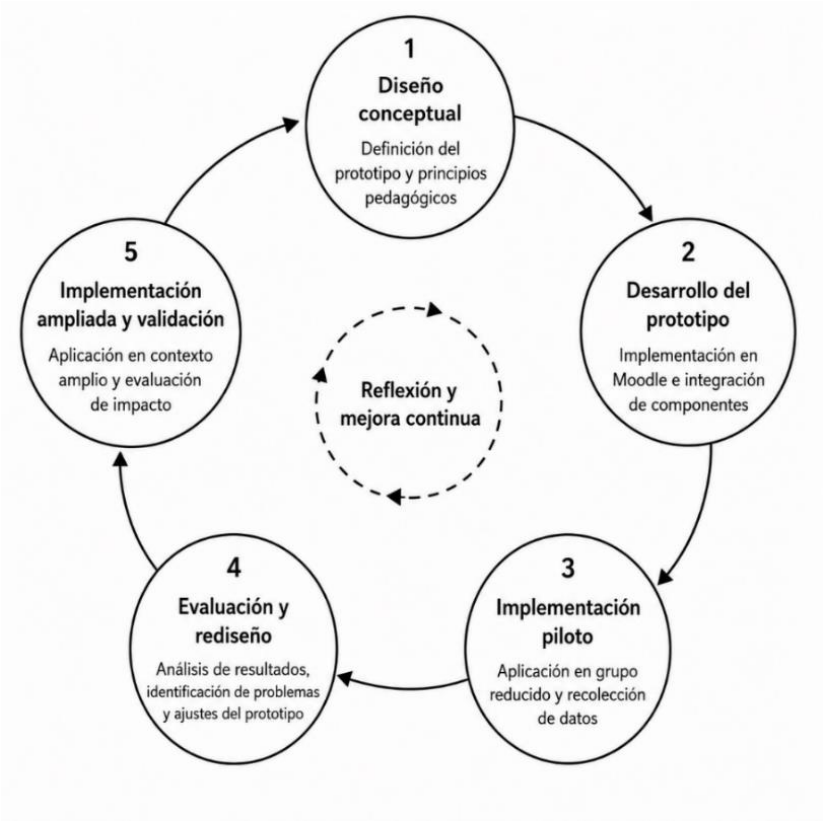
Bajo el enfoque de la Investigación Basada en el Diseño (DBR), la innovación se concibe como un proceso esencialmente iterativo y alejado de los modelos de desarrollo lineales. Esto significa que el prototipo propuesto no se entiende como un producto terminado, sino como una solución educativa dinámica y flexible, cuya evolución y perfeccionamiento progresivo dependen de la evidencia empírica recolectada durante su puesta en práctica a través de ciclos sucesivos de diseño, evaluación y rediseño.

Para operativizar este enfoque, la propuesta se estructura en cinco ciclos específicos de desarrollo. Los dos primeros abarcan el diseño conceptual de la arquitectura, estableciendo la integración pedagógica de sus componentes, y el posterior desarrollo técnico del prototipo dentro de la plataforma Moodle con el tutor basado en RAG. El

tercer ciclo da paso a una implementación piloto con un grupo reducido de estudiantes para detectar fallas y analizar interacciones, insumos que alimentan el cuarto ciclo centrado en el análisis y rediseño del sistema; finalmente, el quinto ciclo consolida el proceso mediante una implementación ampliada a gran escala que permite validar de forma definitiva la propuesta y generar principios de diseño transferibles.

Figura 2

Ciclos iterativos para el desarrollo del prototipo bajo el enfoque Design-Based Research



Lógica de iteración y pivotaje

Un elemento central de la Investigación Basada en el Diseño (DBR) es la mejora continua de la intervención mediante procesos sistemáticos de evaluación, reflexión y rediseño, asumiendo que el prototipo es una propuesta dinámica y optimizable en lugar de una solución definitiva. Este proceso de iteración busca perfeccionar la arquitectura del sistema, lo que permite realizar ajustes precisos en las reglas del aprendizaje adaptativo, el funcionamiento del tutor inteligente basado en RAG, las mecánicas de gamificación y su articulación pedagógica global. Para fundamentar de manera objetiva cada ciclo de rediseño, las decisiones se sustentan en diversas fuentes de evidencia empírica extraídas de la experiencia de uso, tales como los registros de *Learning Analytics*, los patrones de

interacción con el tutor, la progresión en las rutas formativas, el rendimiento académico y el desarrollo de competencias en inteligencia artificial, fortaleciendo así su potencial de escalabilidad institucional.

Justificación metodológica

La adopción del enfoque DBR resulta pertinente para esta propuesta, ya que permite diseñar, implementar y perfeccionar progresivamente un prototipo educativo en un contexto auténtico de enseñanza. Más allá de evaluar su efectividad, este enfoque posibilita comprender los mecanismos mediante los cuales el aprendizaje adaptativo, la gamificación y el tutor inteligente contribuyen al desarrollo de competencias en inteligencia artificial en educación superior.

Asimismo, la naturaleza iterativa del DBR favorece que las decisiones de rediseño se fundamenten en la evidencia obtenida durante cada ciclo de implementación, fortaleciendo tanto la calidad del prototipo como su potencial de transferencia a contextos institucionales de mayor escala. En este sentido, el enfoque metodológico adoptado articula teoría y práctica, contribuyendo simultáneamente al diseño de una propuesta de innovación educativa y a la generación de conocimiento sobre el desarrollo de competencias en inteligencia artificial en educación superior.

Prototipo del sistema: Organización del entorno virtual de aprendizaje

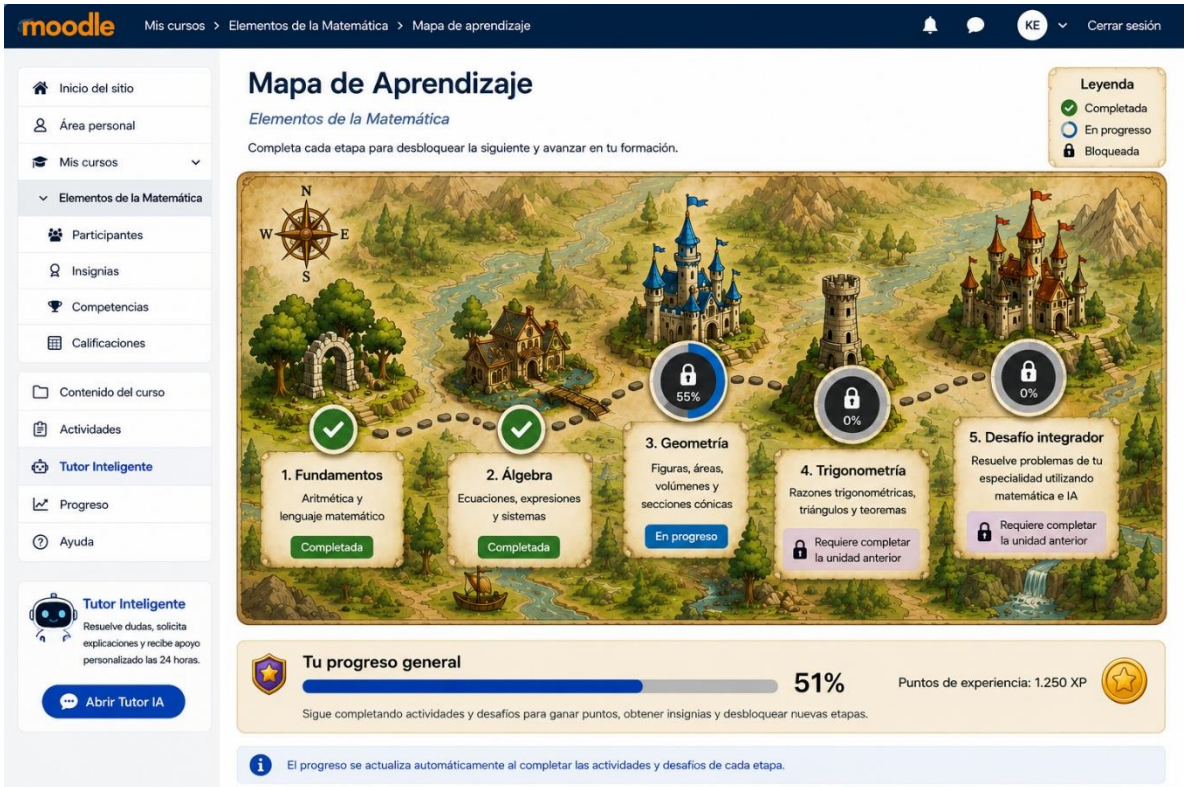
El prototipo se implementa como un curso completo en la plataforma institucional Moodle para acompañar al estudiante durante todo el semestre en la asignatura *Elementos de la Matemática*, rompiendo con la disposición lineal tradicional al ofrecer un entorno dinámico e integrado. La estructura curricular respeta fielmente el programa oficial de la materia —organizado en las unidades de Aritmética, Álgebra, Geometría y Trigonometría— a través de un recorrido secuencial que combina teoría, práctica, evaluaciones formativas y recursos de apoyo, cuyo acceso está condicionado al progreso individual. Al centralizar el aprendizaje adaptativo, la gamificación y el tutor inteligente en un único espacio virtual, Moodle permite al alumno realizar actividades, resolver dudas, monitorear su avance y experimentar la narrativa lúdica sin salir de la plataforma, garantizando una experiencia formativa continua, coherente y orientada tanto al logro disciplinar como al desarrollo progresivo de competencias en IA.

Experiencia gamificada del estudiante

La experiencia del estudiante se organiza mediante una narrativa transversal que acompaña el desarrollo de la asignatura durante todo el semestre y proporciona sentido al recorrido formativo. En lugar de presentar cada unidad como un conjunto aislado de contenidos, el prototipo propone un camino progresivo donde cada etapa representa un nuevo desafío que debe ser superado para continuar avanzando.

Este recorrido se materializa mediante un mapa de aprendizaje que representa las distintas unidades del curso y permite visualizar el progreso alcanzado (véase Figura 3). A medida que el estudiante completa las actividades y demuestra el logro de los aprendizajes esperados, se desbloquean nuevas unidades y desafíos, manteniendo una secuencia coherente con la planificación de la asignatura.

Figura 3
Mapa de aprendizaje gamificado implementado en Moodle para la asignatura Elementos de la Matemática

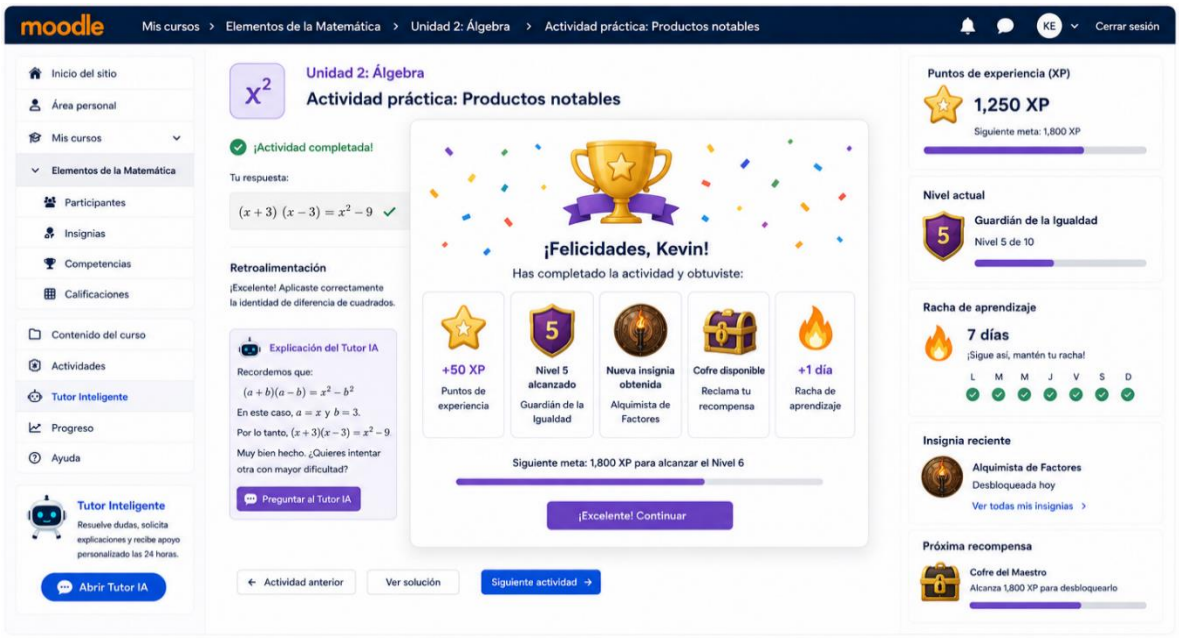


Como complemento, el prototipo incorpora elementos propios de la gamificación, tales como puntos de experiencia, niveles, insignias y recompensas, los cuales hacen visible el progreso alcanzado sin sustituir los objetivos académicos del curso (véase Figura 4).

Estos elementos buscan fortalecer la motivación, favorecer la participación activa y generar una percepción permanente de avance durante el proceso de aprendizaje.

Figura 4

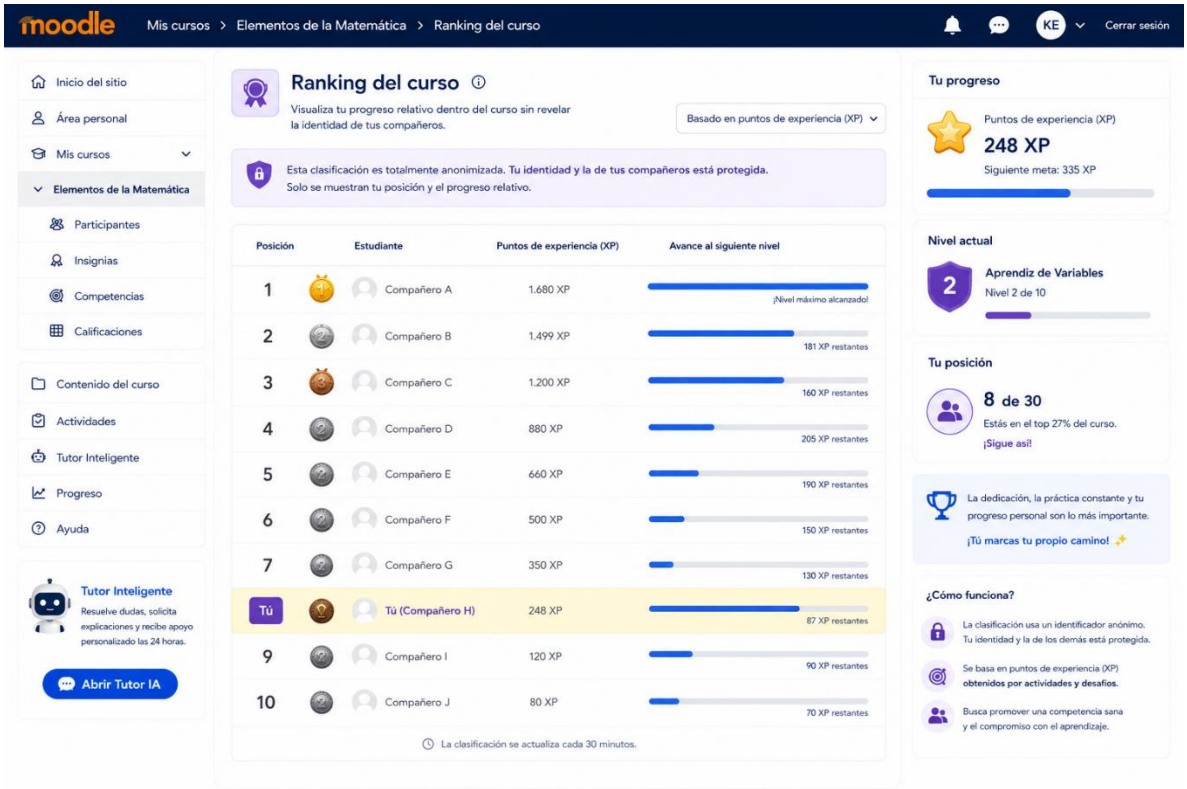
Retroalimentación gamificada al completar una actividad de aprendizaje en Moodle



Finalmente, el entorno incorpora un sistema de clasificación anonimizado que permite a cada estudiante conocer su posición relativa dentro del curso sin exponer la identidad de sus compañeros (véase Figura 5). De esta manera, se promueve una competencia saludable que incentiva el compromiso con el aprendizaje, resguardando al mismo tiempo el bienestar de los participantes.

Figura 5

Sistema de clasificación anonimizado basado en puntos de experiencia implementado en Moodle



Motor inteligente del prototipo

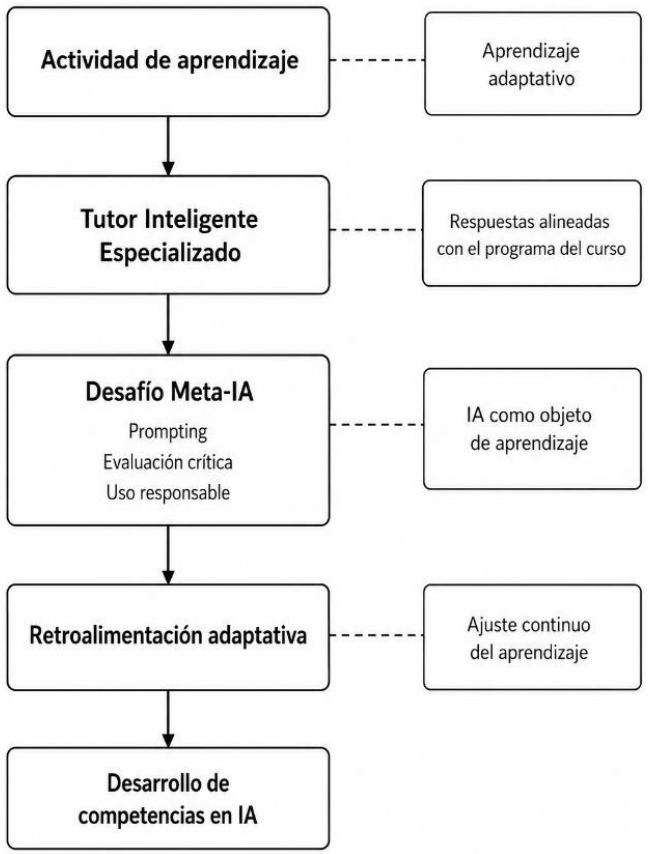
El funcionamiento del prototipo se sustenta en un motor inteligente que coordina el aprendizaje adaptativo, la analítica del aprendizaje (*Learning Analytics*) y un tutor inteligente especializado para ofrecer una experiencia educativa completamente personalizada. El componente adaptativo procesa los datos de evaluaciones diagnósticas y formativas obtenidos mediante la analítica para ajustar progresivamente las rutas de aprendizaje, recomendando reforzamientos o habilitando nuevos desafíos según el ritmo individual de cada estudiante. Por su parte, el tutor inteligente opera bajo un modelo de lenguaje abierto y una arquitectura híbrida con Generación Aumentada por Recuperación (RAG), alimentada con los recursos específicos del docente; esto le permite resolver dudas conceptuales, guiar la resolución de problemas y sugerir material complementario alineándose estrictamente con la secuencia didáctica oficial y resguardando que no se entreguen contenidos de unidades aún no cursadas.

Desarrollo de competencias en inteligencia artificial

Uno de los principales aportes del prototipo es concebir la inteligencia artificial con una doble función: como herramienta de apoyo educativo y como objeto de aprendizaje en sí mismo. Para operacionalizar este enfoque, el entorno virtual incorpora "desafíos Meta-IA" distribuidos estratégicamente a lo largo de las unidades, los cuales invitan al estudiante a interactuar críticamente con el tutor inteligente mientras resuelve problemas matemáticos. Estas actividades promueven el desarrollo progresivo de competencias tecnológicas mediante la formulación de instrucciones efectivas (*prompting*), la evaluación crítica de las respuestas, la identificación de sesgos o limitaciones del sistema y la reflexión sobre el uso ético y responsable de la IA. De este modo, tal como se sintetiza en el modelo conceptual de la propuesta, el estudiante utiliza la tecnología para resolver desafíos disciplinares al mismo tiempo que adquiere las competencias necesarias para interactuar de forma fundamentada con estas herramientas emergentes gracias a un ciclo continuo de retroalimentación adaptativa.

Figura 6

Modelo conceptual para el desarrollo de competencias en inteligencia artificial mediante el tutor inteligente especializado



Estrategia evaluativa

Enfoque de evaluación

La evaluación del prototipo se concibe como un proceso integral que considera tanto la calidad de su diseño como su implementación y los resultados obtenidos durante su aplicación. En este sentido, se adopta un enfoque mixto que combina indicadores cuantitativos y cualitativos, permitiendo analizar no solo el impacto del prototipo sobre el aprendizaje, sino también la forma en que los estudiantes interactúan con sus distintos componentes. Para ello, la evaluación se organiza en tres fases: diseño, ejecución e impacto, las cuales permiten valorar progresivamente el funcionamiento y la efectividad de la propuesta.

Además de los indicadores de desempeño e interacción, la evaluación incorpora una dimensión reflexiva orientada a analizar la forma en que los estudiantes utilizan la inteligencia artificial durante el proceso de aprendizaje. En este sentido, se considera tanto la capacidad para mejorar el desempeño a partir de la retroalimentación recibida como la habilidad para justificar de manera crítica y fundamentada el uso de herramientas de inteligencia artificial en la resolución de actividades.

Indicadores de evaluación

Los indicadores se estructuran en función de las tres fases del prototipo (véase Tabla 1).

Tabla 1
Dimensiones e indicadores propuestos para la evaluación del prototipo según la fase de implementación

Fase	Dimensión evaluada	Indicador
Diseño	Calidad del diseño pedagógico	Porcentaje de actividades que presentan alineación entre objetivos de aprendizaje, actividades, evaluación e integración pedagógica de la inteligencia artificial.
	Integración de la gamificación	Porcentaje de módulos que incorporan de forma conjunta narrativa, progresión y desafíos gamificados.
	Adaptabilidad	Porcentaje de actividades que ajustan automáticamente la ruta de aprendizaje según el desempeño del estudiante.
Ejecución	Participación	Porcentaje de estudiantes que completan al menos el 80 % de las actividades propuestas.

	Interacción con el tutor inteligente	Promedio de interacciones realizadas por estudiante con el tutor inteligente durante el desarrollo del curso.
	Aprendizaje a partir del error	Porcentaje de estudiantes que mejoran su desempeño entre intentos sucesivos en actividades adaptativas.
Impacto	Aprendizaje disciplinar	Evaluaciones oficiales de la asignatura (certámenes y actividades evaluativas)
	Competencias en inteligencia artificial	Porcentaje de estudiantes que alcanzan el nivel esperado en la rúbrica de competencias en inteligencia artificial, evidenciando un uso crítico y fundamentado de estas herramientas.
	Percepción de la experiencia	Nivel de satisfacción y percepción del prototipo medido mediante un cuestionario tipo Likert.

Dimensiones evaluadas

La evaluación del prototipo considera tres dimensiones principales, las cuales permiten valorar tanto los resultados del aprendizaje como la experiencia del estudiante durante la implementación.

- **Competencias en inteligencia artificial:** entendidas como la capacidad del estudiante para utilizar la inteligencia artificial de manera crítica, ética y fundamentada durante la resolución de actividades disciplinares. Esta dimensión considera habilidades relacionadas con la formulación de instrucciones (*prompting*), la evaluación crítica de las respuestas generadas y el uso responsable de estas tecnologías como apoyo al aprendizaje.

- **Aprendizaje matemático:** referido al nivel de logro alcanzado por los estudiantes en los resultados de aprendizaje de la asignatura, medido mediante las evaluaciones oficiales del curso, tales como certámenes y actividades evaluativas.

- **Motivación y compromiso:** asociados al grado de participación, persistencia e involucramiento del estudiante con el entorno gamificado, considerando tanto su percepción sobre la experiencia de aprendizaje como su interacción con los distintos componentes del prototipo.

Instrumentos de recolección de datos

La evaluación del prototipo contempla el uso de distintos instrumentos de recolección de datos, seleccionados de acuerdo con las dimensiones evaluadas y el enfoque metodológico de la propuesta (véase Tabla 2). En conjunto, estos instrumentos permiten obtener evidencia sobre el desarrollo de competencias en inteligencia artificial, el aprendizaje disciplinar, la interacción con el prototipo y la percepción de los estudiantes respecto a la experiencia de aprendizaje.

Tabla 2

Instrumentos de recolección de datos según las dimensiones evaluadas del prototipo

Dimensión evaluada	Instrumento de recolección de datos
Competencias en inteligencia artificial	Rúbrica de competencias en inteligencia artificial, aplicada en modalidad pretest y postest para evaluar el desarrollo progresivo de la competencia.
Aprendizaje matemático	Evaluaciones oficiales de la asignatura, tales como certámenes y actividades evaluativas desarrolladas durante el semestre.
Motivación y percepción	Cuestionario tipo Likert orientado a evaluar la experiencia de aprendizaje, la motivación y la percepción del prototipo.
Interacción con el prototipo	Registros de la plataforma Moodle (*Learning Analytics*), utilizados para analizar la interacción con el tutor inteligente, las actividades adaptativas y los elementos de gamificación.

Validación del prototipo

Viabilidad técnica y operativa

La viabilidad del prototipo se sustenta en la utilización de tecnologías ampliamente consolidadas y de acceso abierto, lo que permite su implementación sin requerir desarrollos propietarios ni infraestructura altamente especializada. La propuesta se implementa sobre la plataforma Moodle, un sistema de gestión del aprendizaje ampliamente utilizado en educación superior, cuya arquitectura modular facilita la incorporación de nuevas funcionalidades mediante plugins e integraciones externas.

Uno de los principales atributos del prototipo es que la totalidad de sus componentes puede desarrollarse utilizando tecnologías disponibles actualmente. El aprendizaje adaptativo se implementa mediante las funcionalidades de restricción de acceso, finalización de actividades y *Learning Analytics* de Moodle, complementadas con plugins de código abierto orientados a la personalización del aprendizaje y la gamificación.

Por su parte, el tutor inteligente especializado se construye a partir de modelos de lenguaje abiertos ejecutados localmente, complementados mediante una arquitectura *Retrieval-Augmented Generation* (RAG) que combina una base de conocimiento alineada con el programa oficial de la asignatura y los recursos específicos proporcionados por cada docente. Esta aproximación permite ofrecer respuestas contextualizadas sin depender exclusivamente de servicios comerciales de inteligencia artificial y favorece el control institucional sobre la información utilizada por el sistema y la coherencia de las respuestas con los contenidos oficiales de la asignatura.

La arquitectura propuesta también contempla la posibilidad de incorporar motores externos especializados cuando las características institucionales lo permitan. En particular, la integración de herramientas especializadas para el apoyo a la resolución de problemas matemáticos o la recomendación de recursos educativos previamente seleccionados por el docente constituyen extensiones factibles que pueden incorporarse progresivamente sin modificar la estructura general del prototipo.

Finalmente, la naturaleza modular del diseño favorece una implementación escalable. El prototipo puede desarrollarse inicialmente en un entorno local de pruebas y posteriormente migrarse a infraestructura institucional, permitiendo aumentar progresivamente la capacidad de procesamiento, incorporar nuevos modelos de inteligencia artificial o ampliar el número de estudiantes atendidos sin alterar el diseño pedagógico propuesto. En consecuencia, la propuesta presenta una alta viabilidad técnica y operativa, al sustentarse en tecnologías consolidadas, de código abierto y compatibles con la infraestructura tecnológica utilizada habitualmente por las instituciones de educación superior.

Pertinencia

La propuesta presenta una alta pertinencia pedagógica y tecnológica al responder a una necesidad creciente de la educación superior: promover un uso crítico y fundamentado de la inteligencia artificial dentro de los procesos de enseñanza y aprendizaje. A diferencia de enfoques centrados únicamente en facilitar el acceso a herramientas de IA, el prototipo incorpora estas tecnologías como parte de una estrategia pedagógica orientada al desarrollo de competencias, favoreciendo que los estudiantes aprendan no solo a

utilizarlas, sino también a comprender sus alcances, limitaciones e implicancias en la resolución de problemas disciplinares.

Asimismo, la propuesta resulta especialmente pertinente para el contexto de la educación superior técnico-profesional, donde la formación en competencias digitales y el desarrollo de habilidades para interactuar con tecnologías emergentes constituyen desafíos cada vez más relevantes. La integración del aprendizaje adaptativo, gamificación y un tutor inteligente especializado permite ofrecer una experiencia de aprendizaje personalizada, promoviendo simultáneamente el aprendizaje disciplinar y el desarrollo progresivo de competencias en inteligencia artificial. Finalmente, el carácter modular del prototipo facilita su adaptación a distintas asignaturas y contextos institucionales, favoreciendo su transferencia a otros escenarios educativos.

Escalabilidad

El prototipo presenta un alto potencial de escalabilidad debido a su arquitectura modular y al uso de tecnologías abiertas, lo que permite su implementación progresiva en distintos contextos educativos. Inicialmente puede desarrollarse como un entorno piloto para una asignatura específica y, posteriormente, ampliarse a otras asignaturas, programas formativos o carreras, incorporando nuevos contenidos, actividades y recursos manteniendo la misma estructura de funcionamiento.

Desde el punto de vista tecnológico, la propuesta admite una implementación gradual. Durante las primeras etapas puede ejecutarse sobre un servidor local destinado al desarrollo y validación del prototipo, mientras que, en fases posteriores, la arquitectura permite migrar hacia infraestructura institucional con mayor capacidad de procesamiento, facilitando la incorporación de nuevos usuarios, modelos de inteligencia artificial y funcionalidades adicionales sin requerir modificaciones sustanciales en el diseño del sistema.

Asimismo, la separación entre la lógica pedagógica y los componentes tecnológicos favorece la incorporación futura de nuevas herramientas de inteligencia artificial, servicios especializados o recursos educativos, permitiendo que el prototipo evolucione conforme avancen las tecnologías disponibles y las necesidades institucionales.

Conclusiones

La presente propuesta presenta el diseño de un prototipo de aprendizaje adaptativo gamificado orientado al desarrollo de competencias en inteligencia artificial en educación superior técnico-profesional. El prototipo integra componentes pedagógicos, tecnológicos y evaluativos para promover un uso crítico y fundamentado de la IA en contextos auténticos de aprendizaje. Desde una perspectiva conceptual, el trabajo contribuye a fortalecer la articulación entre inteligencia artificial, aprendizaje adaptativo y gamificación, proponiendo un prototipo que concibe la IA no solo como una herramienta de apoyo, sino también como un objeto de aprendizaje. En este contexto, los desafíos Meta-IA favorecen el desarrollo progresivo de habilidades relacionadas con el prompting, evaluación crítica y uso responsable de estas tecnologías.

Finalmente, la arquitectura propuesta proporciona una base para futuras implementaciones y procesos de validación en contextos reales de educación superior. Como línea futura de investigación, se espera evaluar su efectividad mediante estudios empíricos que analicen su contribución al desarrollo de competencias en inteligencia artificial como resultado principal, considerando además el aprendizaje disciplinar, la motivación y la interacción con el entorno virtual como dimensiones complementarias de análisis. En conjunto, la propuesta contribuye a la discusión sobre el diseño de entornos de aprendizaje orientados al desarrollo de competencias en inteligencia artificial, destacando el potencial de integrar el aprendizaje adaptativo, la gamificación y un tutor inteligente especializado dentro de una misma estrategia pedagógica.

Referencias bibliográficas

Albán, J., Oña, A., Manobanda, E., y Cocha, M. (2024). El uso de la gamificación en la educación superior para mejorar el aprendizaje y la motivación. *Reincasol*, *3*(6), 778-805. https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/10004574.pdf

Blake, J. (2026). Docencia e inteligencia artificial generativa en educación superior en América Latina: Focos y vacíos de la investigación emergente (revisión sistemática 2023-2025). *Revista Realidad Educativa*, *6*(1). https://revistas.uft.cl/index.php/rre/article/view/600/919

Carballo, O. (2025). Educación Superior en la Era de la Inteligencia Artificial: Entre la Innovación y la Ética [Editorial]. *Educ. Super.*, (39), 7-8. https://scielo.do/j/es/a/JbdKNZPSvtjRX6DQLLnR94b/?lang=es

Carbonell, N., & Hernández, M. Á. (2024). Impacto de los sistemas de tutoría inteligente. Una revisión sistemática. *EDUTEC. Revista Electrónica de Tecnología Educativa*, (89), 121-143. https://doi.org/10.21556/edutec.2024.89.3025

Chiu, T. K. F., Ahmad, Z., Ismailov, M., & Sanusi, I. T. (2024). What are artificial intelligence literacy and competency? A comprehensive framework to support them. *Computers and Education Open*, *6*, 100171. https://doi.org/10.1016/j.caeo.2024.100171

Department for Science, Innovation and Technology. (28 de enero de 2026). *AI Skills for Life and Work: Rapid Evidence Review*. GOV.UK. https://www.gov.uk/government/publications/ai-skills-for-life-and-work-rapid-evidence-review/ai-skills-for-life-and-work-rapid-evidence-review#defining-ai-literacy-competence-and-skills

Design-Based Research Collective. (2003). Design-Based Research: An Emerging Paradigm for Educational Inquiry. *Educational Researcher*, *32*(1), 5-8. https://doi.org/10.3102/0013189X032001005

Du Plooy, E., Casteleijn, D., y Franzsen, D. (2024). Aprendizaje adaptativo personalizado en la educación superior: una revisión exploratoria de las características clave y su impacto en el rendimiento académico y la participación. *Heliyon*, *10*(21), e39630. https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11544060/

Escobar, K., Constenla, J. A., & Jara, P. (2026). La gamificación como metodología de innovación para el desarrollo del pensamiento computacional en educación superior: Tensiones, aportes y desafíos. En L. F. González (Ed.), *Educação no século XXI: Perspectivas contemporâneas sobre ensino-aprendizagem VII* (pp. 165–176). Editora Artemis. https://doi.org/10.37572/EdArt_25062607912

García, L. (2025). El Sistema Tutor Inteligente (STI) en educación a distancia. *Contextos Universitarios Mediados*, *23*(4), 12–28. https://aretio.hypotheses.org/23801

González, C., y Pallarés, N. (5 de marzo de 2026). *Enseñar a los estudiantes a usar la IA: de la competencia digital al resultado de aprendizaje*. Universidad Sí. El blog de Studia XXI. https://www.universidadsi.es/ensenar-a-los-estudiantes-a-usar-la-ia-de-la-competencia-digital-al-resultado-de-aprendizaje/

Hünicken, L. A. (2021). Gamificación y aprendizaje adaptativo para el desarrollo de competencias: El caso de la asignatura Algoritmos y Estructuras de Datos. *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología*, (29), 104-105. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-99592021000200013

Jara-Coatt, P. y Rodríguez-Gómez, R. (2026). Ética de la personalización con IAG: autonomía, datos y equidad en contextos educativos. En libro Personalización del Aprendizaje en la Era de la Inteligencia Artificial Generativa: Fundamentos Pedagógicos, Competencias Críticas y Equidad Educativa 10.37572/EdArt_1505269706

Latif, E., Liu, V., & Zhai, X. (2026). A systematic review of intelligent and robot tutoring systems: evolution, pedagogical design, and AI-driven classification. *Smart Learning Environments*, *13*(1), 1. https://link.springer.com/article/10.1186/s40561-025-00427-9

Lintner, T. (2024). A systematic review of AI literacy scales. *npj Science of Learning*, *9*(1), 1-13. https://doi.org/10.1038/s41539-024-00264-4

Long, D., & Magerko, B. (2020). What is AI Literacy? Competencies and Design Considerations. En *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1–16). Association for Computing Machinery. https://doi.org/10.1145/3313831.3376727

Long, D. Y., Wang, S., Rashid, S. M., & Lu, X. T. (2026). Inteligencia artificial en la educación superior: una revisión sistemática de su impacto en la participación estudiantil y el papel mediador de los métodos de enseñanza. *Frontiers in Education, 10*. https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1648661

Molina, E., & Medina, E. (2025). *Revolución de la IA en Educación Superior: Lo que hay que saber* (Brief N°4; Innovaciones Digitales en Educación). Banco Mundial.

https://documents1.worldbank.org/curated/en/099809404152514027/pdf/IDU-91d6e888-fcbd-4694-ac88-18bcae998934.pdf

Mousavinasab, E., Zarifsanaiey, N., Niakan Kalhori, S. R., Rakhshan, M., Keikha, L., y Ghazi Saeedi, M. (2021). Intelligent tutoring systems: a systematic review of characteristics, applications, and evaluation methods. *Interactive Learning Environments*, *29*(1), 142–163. https://doi.org/10.1080/10494820.2018.1558257

Mozelius, P. (marzo de 2021). Gamificación profunda y superficial en la educación superior: ¿cuál es la diferencia? En *INTED2021 Proceedings: 15th International Technology, Education and Development Conference* (pp. 6563-6570). IATED Academy. https://doi.org/10.21125/inted.2021.0663

Pozo, L., & Gómez, J. (2026). Inteligencia artificial generativa y autonomía intelectual en la educación universitaria. *El Faro. Revista Digital de Docencia Universitaria*, *3*(3), 300-317. https://doi.org/10.63790/ejvxqs58

Rajkumar, S. R., Dan, M., & Shah, S. H. (2026). AI and ICT are reshaping higher education in the digital era. *Global Education Insights*. https://doi.org/10.65140/gei202601.14

Shi, P., & Liu, W. (2025). Adaptive learning oriented higher educational classroom teaching strategies. *Scientific Reports*, *15*(1), 15661. https://www.nature.com/articles/s41598-025-00536-y

Younas, M., El-Dakhs, D. A. S., & Noor, U. (2025). The impact of artificial intelligence-based learning tools in academic innovation: A review of Deep seek, GPT, and Gemini (2020–2025). *Frontiers in Education*, *10*, 1689205. https://doi.org/10.3389/feduc.2025.1689205

Capítulo II

Simulaciones Inmersivas en Metaversos Educativos: Inteligencia Artificial, Presencia Virtual y Biofeedback para el Entrenamiento Socioemocional Docente

Immersive Simulations in Educational Metaverses: Artificial Intelligence, Virtual Presence, and Biofeedback for Teachers' Social-Emotional Training

Fabiola Sáez-Delgado
Research and Innovation Group in Socioemotional Learning, Well-Being and Mental Health to Foster Thriving (THRIVE4ALL)
Facultad de Educación, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.
fsaez@ucsc.cl
https://orcid.org/0000-0002-7993-5356

Javier Mella-Norambuena
Departamento de Ciencias, Universidad Técnica Federico Santa María, Concepción. Chile
javier.mellan@usm.cl
https://orcid.org/0000-0002-4288-142X

Paula Correa-Gutiérrez
Estudiante Doctorado en Innovación Educativa
Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile.
pcorrea@doctoradoedu.ucsc.cl
https://orcid.org/0009-0009-0484-639X

Richard Rodríguez-Gómez
Facultad de Educación, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Chile
richard.rodriguez@ucsc.cl
https://orcid.org/0000-0002-9339-2888

Eduardo Aravena Eriz
Universidad Valle Central, Chile
eduardoaravenaeriz@gmail.com
https://orcid.org/0009-0002-5920-9995

Resumen

Este capítulo examina el potencial pedagógico, neuropsicológico y tecnológico de las simulaciones inmersivas en metaversos educativos, potenciadas por inteligencia artificial generativa, analítica multimodal del aprendizaje (MMLA) y biofeedback fisiológico, para el desarrollo de competencias socioemocionales docentes frente a incidentes críticos de aula. A partir de una revisión conceptual de literatura reciente, se analizan los fundamentos neuropsicológicos de la inmersión (ilusión de lugar y de plausibilidad), las arquitecturas de agentes conversacionales autónomos que sustituyen a los personajes no jugadores (PNJ) tradicionales, y los protocolos de bio-debriefing basados en variabilidad de la frecuencia cardíaca y actividad electrodérmica. Se revisa evidencia meta-analítica reciente sobre la efectividad de la realidad virtual en la formación docente, junto con las brechas metodológicas, cybersickness, carga cognitiva, costos de escalabilidad, y los dilemas éticos asociados a la privacidad de datos biométricos y los sesgos algorítmicos. El capítulo concluye que estos entornos constituyen laboratorios neuropedagógicos de ensayo seguro que permiten cerrar la brecha histórica entre el conocimiento declarativo y el conocimiento procedimental socioemocional del profesorado, aunque su adopción sostenible requiere marcos éticos robustos y evidencia longitudinal de transferencia al aula real.

Palabras clave: Metaverso educativo; realidad virtual inmersiva; inteligencia artificial generativa; entrenamiento socioemocional docente; biofeedback; analítica multimodal del aprendizaje.

Abstract

This chapter examines the pedagogical, neuropsychological, and technological potential of immersive simulations in educational metaverses—enhanced by generative artificial intelligence, multimodal learning analytics (MMLA), and physiological biofeedback—for the development of teachers' social-emotional competencies in response to critical classroom incidents. Based on a conceptual review of recent literature, the chapter analyzes the neuropsychological foundations of immersion (illusion of presence and plausibility), the architectures of autonomous conversational agents that replace traditional non-player characters (NPCs), and bio-debriefing protocols based on heart rate variability and electrodermal activity. Recent meta-analytic evidence on the effectiveness of virtual reality in teacher training is reviewed, along with methodological gaps, cybersickness, cognitive load, scalability costs, and ethical dilemmas associated with the privacy of biometric data and algorithmic biases. The chapter concludes that these environments constitute safe neuropedagogical testing grounds that help bridge the historical gap between teachers' declarative knowledge and their socioemotional procedural knowledge, although their sustainable adoption requires robust ethical frameworks and longitudinal evidence of transfer to the real classroom.

Keywords: Educational metaverse; immersive virtual reality; generative artificial intelligence; social-emotional training for teachers; biofeedback; multimodal learning analytics.

Introducción

El escenario socioemocional docente: complejidad, incidentes críticos y la necesidad de nuevas metodologías de formación

La profesión docente atraviesa un periodo de complejidad sin precedentes (Lozano-Peña et al., 2021). La gestión de la convivencia escolar, el aumento de problemas de salud mental en el estudiantado, 94.9% de los directores escolares reporta un incremento de estos problemas en los últimos cinco años (Lewandowska et al., 2025), y la recurrencia de incidentes críticos de aula, definidos como sucesos inesperados y altamente desestabilizadores que interrumpen la dinámica pedagógica (Anselmann, 2023), exigen que el profesorado despliegue competencias socioemocionales avanzadas. La autorregulación emocional, la empatía táctica, la desescalada de conflictos y la toma de decisiones bajo presión no son habilidades periféricas, sino pilares estructurales del desempeño profesional y del bienestar docente (Cervellione et al., 2025; Gebre et al., 2025).

Sin embargo, los enfoques tradicionales de formación docente (inicial y continua) han dependido predominantemente de metodologías expositivas, análisis de casos en papel o dinámicas de role-playing analógico. Si bien estas estrategias aportan fundamentos teóricos, presentan severas limitaciones en términos de validez ecológica y activación fisiológica real. El entrenamiento en papel no logra reproducir el estrés agudo, la aceleración cardíaca ni la carga cognitiva instantánea que experimenta un docente cuando se enfrenta a una disrupción severa en el aula. Existe, por tanto, una brecha entre el conocimiento declarativo ('saber qué hacer') y el conocimiento procedimental socioemocional en tiempo real ('saber cómo autorregularse y actuar bajo distrés').

Esta brecha se ve agravada por evidencia reciente sobre el estrés fisiológico crónico del profesorado: un estudio transversal con 235 docentes en ejercicio documentó alteraciones autonómicas objetivas y patrones diferenciados de variabilidad de la frecuencia cardíaca, asociados al estrés percibido y la ansiedad, con diferencias significativas según género (Calderón-García et al., 2024).Frente a este panorama, intervenciones de biofeedback centradas en la respiración han demostrado ser viables y efectivas para reducir la ansiedad y el estrés social en contextos escolares, incluso en poblaciones infantiles (Aranberri-Ruiz

et al., 2022), lo que sugiere que estas mismas técnicas pueden trasladarse al entrenamiento del profesorado en formación.

De la simulación tradicional a la inmersión: la llegada del metaverso y los mundos virtuales

La simulación en la formación docente ha evolucionado desde los entornos basados en actores o microenseñanza hasta sistemas digitales complejos. La aparición de los mundos virtuales y el concepto del metaverso, un ecosistema digital persistente, tridimensional, interconectado y multiusuario (Mystakidis, 2022), transforma radicalmente esta premisa.

A diferencia de las plataformas de videoconferencia o los simuladores 2D limitados a árboles de decisión preprogramados, los entornos inmersivos tridimensionales permiten recrear representaciones foto-realistas o semi-realistas de aulas escolares, salas de reuniones de apoderados y espacios comunitarios. En estos espacios, los docentes interactúan mediante avatares articulados, experimentando una sensación de presencia física y social que emula las barreras espaciales y relacionales del mundo analógico. La simulación inmersiva abre la posibilidad de construir laboratorios de ensayo seguro (sandbox) donde el docente puede equivocarse, ensayar múltiples estrategias de afrontamiento socioemocional y experimentar sus consecuencias sin generar un impacto negativo real en estudiantes humanos.

La evidencia empírica reciente respalda este potencial: una revisión sistemática y meta-análisis de 52 estudios sobre realidad virtual en formación docente (2014-2024) reportó un efecto global moderado y estadísticamente significativo (Hedges' g = 0.524), significativamente mayor en entornos de alta inmersión e interactividad que en formatos no inmersivos (Han et al., 2025). Asimismo, tres décadas de experimentación psicológica en realidad virtual confirman de manera consistente que los entornos inmersivos bien diseñados generan respuestas conductuales, emocionales y fisiológicas comparables a las situaciones reales, lo que valida su uso como plataforma de entrenamiento de alta fidelidad (Bailenson et al., 2025).

Agenciamiento y presencia en entornos inmersivos: fundamentos neuropsicológicos del aprendizaje

El valor diferencial de los entornos virtuales inmersivos radica en los mecanismos neurobiológicos y cognitivos que desencadenan. De acuerdo con la teoría de Slater (2009), la inmersión eficaz genera dos ilusiones constitutivas:

- Ilusión de Lugar (Place Illusion – PI): la percepción somatosensorial de 'estar realmente ahí' en el espacio virtual.
- Ilusión de Plausibilidad (Plausibility Illusion – Psi): la convicción subjetiva de que los eventos que están ocurriendo son reales y responden a las acciones del usuario.

Cuando la PI y la Psi convergen, el cerebro humano procesa las situaciones virtuales activando las mismas redes neuronales y respuestas del sistema nervioso autónomo (p. ej., variaciones en la frecuencia cardíaca y la conductancia electrodérmica) que se encenderían en una situación del mundo real (Sanchez-Vives & Slater, 2005). A esto se suma el fenómeno de la presencia corporeizada (embodiment) y el Efecto Proteo (Yee & Bailenson, 2007), según el cual los individuos adaptan sus actitudes y comportamientos al avatar que encarnan. El Modelo Cognitivo-Afectivo de Aprendizaje Inmersivo (CAMIL; Makransky & Petersen, 2021) sostiene que estas propiedades de los medios inmersivos incrementan la motivación intrínseca, la agencia y la retención procedimental al acoplar la emoción con la cognición situacional.

Estos fundamentos han sido corroborados en el ámbito específico de la formación docente: la síntesis de hallazgos canónicos de investigación en realidad virtual señala que la sensación de presencia y agencia sobre el propio avatar constituye el principal predictor de la transferencia conductual del entorno virtual al contexto real, por encima de la fidelidad gráfica del entorno (Bailenson et al., 2025).

Desarrollo

Tecnologías de Frontera y Arquitecturas de Simulación Socioemocional

Plataformas inmersivas y mundos virtuales: ambientes foto-realistas, avatares y diseño de escenarios disruptivos

Las plataformas de metaverso educativo de última generación sobrepasan los entornos estáticos del pasado. Al integrar gráficos procesados mediante motores de videojuegos de alta fidelidad (p. ej., Unreal Engine 5 o Unity), los entornos simulan de manera fidedigna la iluminación, la acústica espacializada y la densidad espacial de un aula real.

Diversas iniciativas recientes ilustran esta convergencia tecnológica. Docter et al. (2024) desarrollaron una aplicación de realidad virtual integrada con inteligencia artificial que permite a docentes en formación sostener interacciones verbales ricas con estudiantes virtuales, mostrando resultados preliminares favorables como prueba de concepto. En la misma línea, Álvarez et al. (2024) evaluaron la aceptación de usuario de una plataforma de realidad virtual inmersiva orientada a la gestión del clima de aula, confirmando su viabilidad para la formación inicial del profesorado. Estas plataformas se articulan, además, con simuladores de microenseñanza que descomponen el desempeño docente en subdimensiones evaluables de manera diferenciada (Zhang et al., 2024).

El diseño de escenarios para el entrenamiento socioemocional requiere una cuidada gradación de la complejidad emocional:

- Nivel Micro: desatenciones, murmullos o desenganche académico.
- Nivel Meso: interrupciones directas, desafíos a la autoridad docente, respuestas sarcásticas o estallidos emocionales de baja intensidad.
- Nivel Macro (Incidentes Críticos): situaciones de acoso escolar in situ, crisis de desregulación emocional severa, conflictos abiertos entre pares o confrontaciones verbales de alta tensión con apoderados.

Tabla 1.
Plataformas inmersivas y mundos virtuales: ambientes foto-realistas, avatares y diseño de escenarios disruptivos

Dimensión	**Simulación Tradicional (Analógica / 2D)**	**Simulación Inmersiva de Frontera en Metaverso**
Fidelidad Sensorial	Baja (lectura de casos, imágenes estáticas)	Alta (entorno 3D, audio espacial, foto-realismo)
Respuesta Fisiológica	Mínima o simulación consciente	Reacciones autonómicas automáticas (estrés, activación)
Dinámica de Interacción	Guiones predeterminados, actuación rigurosa	Agentes inteligentes con adaptación lingüística y afectiva
Sensación de Agencia	Distante ("Lo que debería hacer")	Corporeizada ("Lo que estoy haciendo con mi avatar")
Analítica de Datos	Retroalimentación cualitativa posterior	Analítica multimodal en tiempo real (MMLA + biofeedback)
Evidencia de Efectividad	Escasa evidencia cuantitativa consolidada	Efecto moderado significativo, g = 0.524 (Han et al., 2025)

Integración de IA Generativa y Agentes Multimodales (LLM) en Personajes No Jugadores (PNJ) para interacciones socioemocionales dinámicas

Las simulaciones inmersivas tradicionales aplicadas a la formación docente han enfrentado históricamente un severo cuello de botella metodológico: la rigidez funcional de los Personajes No Jugadores (PNJ). Históricamente, estos avatares dependían de árboles de decisión prescriptivos (decision trees) o de arquitecturas basadas en reglas finitas. Esta condición reducía la interacción a guiones predecibles, incapaces de capturar la fluidez, la ambigüedad y la carga afectiva no estructurada características de las crisis de aula en el mundo real.

La alternativa metodológica convencional, el protocolo Human-in-the-Loop o técnica del 'Mago de Oz', en la cual un operador humano controla remotamente la voz y movimientos del avatar estudiantil, si bien garantiza validez ecológica, resulta insostenible a gran escala debido a sus elevados costos operativos y a la variabilidad inter-evaluadora.

La convergencia de la inteligencia artificial generativa y los modelos de lenguaje de gran escala multimodales (LLM) redefine de forma sustancial este paradigma, permitiendo la creación de agentes autónomos inmersivos (Park et al., 2023). Estos agentes no solo procesan y generan lenguaje natural en tiempo real, sino que operan bajo arquitecturas cognitivo-afectivas simuladas que emulan la complejidad de la conducta infantil y adolescente en escenarios educativos. Un ejemplo aplicado de esta integración es el sistema Interactive Virtual Training for Teachers (IVT-T), que combina agentes

conversacionales con analítica conductual para el entrenamiento en gestión de conducta en el aula (Delamarre et al., 2021), así como los prototipos de aula virtual asistida por IA que permiten interacción verbal espontánea con estudiantes sintéticos (Docter et al., 2024).

Arquitectura de un Agente Estudiantil Generativo

La construcción de un PNJ con capacidad de entrenamiento socioemocional docente se articula en tres capas tecnológicas interconectadas:

1. Módulo Sensorial y Perceptivo Multimodal: el sistema capta la respuesta del docente a través de múltiples modalidades de entrada. La señal de voz del profesor es procesada mediante algoritmos de Reconocimiento Automático del Habla (STT) y, simultáneamente, por motores de análisis prosódico que evalúan parámetros acústicos como la frecuencia fundamental (F0), el volumen (decibelios) y la velocidad del habla. Esta capa determina la polaridad semántica y la intención comunicativa del docente (p. ej., validación empática versus orden coercitiva) y su estado de activación fisiológica implícito (Picard, 1997).

2. Motor Cognitivo-Afectivo (Cognitive and Emotional Engine): a diferencia de los LLM comerciales estándar orientados al cumplimiento de instrucciones, el motor del PNJ integra modelos teóricos de computación afectiva, tales como el Modelo OCC (Ortony, Clore, & Collins, 1988) o el espacio vectorial PAD (Pleasure, Arousal, Dominance). El agente posee un perfil psicosocial preconfigurado (p. ej., un estudiante de 14 años con historial de ansiedad social y respuestas defensivas ante la fiscalización pública) y una memoria de trabajo episódica (Park et al., 2023). Cada intervención del docente altera dinámicamente las coordenadas emocionales del agente conforme a funciones complejas dependientes del input semántico-prosódico y el perfil basal.

3. Síntesis de Expresión y Conducta 3D: el output del motor cognitivo-afectivo no se limita a texto. Se traduce mediante modelos de Text-to-Speech (TTS) afectivo, capaces de sintetizar voz con variaciones en el timbre, temblores vocálicos o suspiros. Esta señal de audio se sincroniza en tiempo real con la deformación de malla facial del avatar (blendshapes) mediante motores de captura y animación procedural (p. ej., FLAME o Apple ARKit Blendshapes), generando microexpresiones faciales e iconografía corporal coordinadas lingüística y emocionalmente.

Dinámicas de Escalada y Desescalada Socioemocional en Tiempo Real

Esta arquitectura habilita un bucle de interacción socioemocional dinámico. Ante un incidente crítico simulado, por ejemplo, un estudiante virtual que se niega a realizar una tarea y responde con sarcasmo, la trayectoria de la simulación no está predeterminada; es un sistema emergente dependiente de la competencia socioemocional del docente:

- Trayectoria de Escalada (Respuesta Reactiva/Coercitiva): si el docente responde alzando el tono de voz, interrumpiendo al estudiante o emitiendo amenazas punitivas, el analizador multimodal detecta una alta activación acústica y baja polaridad empática. El LLM del agente procesa esto como una amenaza a su estatus y autonomía, desencadenando respuestas de confrontación abierta o cierre comunicativo absoluto.

- Trayectoria de Desescalada (Afrontamiento Socioemocional Regulado): si el docente aplica técnicas de autorregulación, mantiene un tono de voz pausado, utiliza lenguaje no violento y valida la emoción subyacente del estudiante, la entrada semántico-prosódica es categorizada como segura. El motor afectivo del PNJ reduce gradualmente sus niveles de activación, haciendo descender la tensión de la escena y abriendo la posibilidad de un acuerdo pedagógico.

Biofeedback, sensado fisiológico y Analítica Multimodal del Aprendizaje (MMLA) en tiempo real

El entrenamiento socioemocional en entornos virtuales no puede evaluarse de manera exclusiva mediante la conducta manifiesta o la autoevaluación verbal posterior. Durante un incidente crítico de aula, gran parte de los procesos de desregulación emocional ocurren a nivel neurofisiológico antes de articularse en el discurso. La integración de sistemas de biofeedback y Analítica Multimodal del Aprendizaje (MMLA) en plataformas inmersivas permite operacionalizar el estado interno del docente, transformando señales biológicas invisibles en métricas cuantitativas continuas (Giannakos et al., 2019).

Modalidades de Sensado Biométrico en Visores de Realidad Virtual (HMD)

Los visores de realidad virtual de frontera (Head-Mounted Displays) integran actualmente biosensores de grado médico o se conectan inalámbricamente con dispositivos wearables, capturando tres tipos principales de bioseñales:

1. Actividad Electrodérmica (EDA / GSR): medida a través de la conductancia de la piel. La EDA es un indicador directo de la activación de la rama simpática del Sistema Nervioso Autónomo (SNA). Se divide en el nivel tónico (SCL), que refleja cambios basales a largo plazo, y las respuestas fásicas (SCR), que identifican picos de estrés o sobresalto (arousal) en milisegundos tras la aparición de un estímulo estresante.

2. Variabilidad de la Frecuencia Cardíaca (HRV): analiza las fluctuaciones en los intervalos interlatido (intervalos R-R). En el ámbito del entrenamiento socioemocional docente, la HRV es el correlato neurofisiológico más robusto de la capacidad de autorregulación e inhibición ejecutiva (Appelhans & Luecken, 2006). Indicadores como el RMSSD y la relación LF/HF permiten diferenciar entre un estado de amenaza (dominancia simpática, caída de HRV) y un estado de desafío o flexibilidad emocional (tono vagal alto, variabilidad preservada). Programas de biofeedback centrados en la respiración han demostrado, en muestras escolares amplias, reducciones significativas de la ansiedad y el estrés social tras el entrenamiento (Aranberri-Ruiz et al., 2022), evidencia directamente transferible al diseño de protocolos de bio-debriefing docente.

3. Seguimiento Ocular (Eye-Tracking) y Pupilometría: mapea las áreas de interés (AOI) de la mirada del docente en el entorno 3D. Revela patrones de atención selectiva y sesgos de amenaza. Asimismo, la dilatación pupilar fásica proporciona un proxy preciso de la carga cognitiva instantánea procesada por la corteza prefrontal.

Fusión de Datos y Protocolos de Bio-Debriefing

La MMLA actúa como la capa integradora que alinea temporalmente las corrientes de datos heterogéneas mediante estampas de tiempo de alta precisión, vinculándolas con los eventos del entorno virtual y el análisis de voz. Esto permite implementar el Bio-Debriefing estructurado: inmediatamente después de la simulación, el docente revisa la grabación tridimensional de su actuación contrastada con un tablero gráfico (dashboard) que muestra sus curvas de estrés (GSR), autorregulación (HRV) y fijación visual.

Este proceso desencadena la toma de conciencia somática, quebrando la racionalización defensiva del docente al confrontarlo con sus datos biológicos reales, y promueve la re-evaluación cognitiva, permitiéndole re-ensayar la escena bajo mejores condiciones de autorregulación. La evidencia sobre el uso de video 360° con fines reflexivos respalda este enfoque: intervenciones de reflexión apoyada en video inmersivo han mostrado mejoras en la autoeficacia de gestión de aula y reducciones en los niveles de estrés autoinformado de docentes en formación (Atal et al., 2024).

Modelos de transferencia socioemocional: del entrenamiento virtual a la autorregulación en el aula real

El propósito último de las simulaciones inmersivas no es el dominio del entorno virtual, sino la transferencia efectiva al aula física. Para lograr esto, la simulación debe articularse bajo un modelo instruccional basado en el debriefing estructurado y la re-consolidación de respuestas emocionales: Fase Inmersiva (vivencia del incidente), Fase de Bio-Debriefing Analítico (revisión en tercera persona con métricas de HRV/GSR) y Fase de Metacognición con Re-ensayo para afianzar el aprendizaje procedimental.

Estudios recientes que evaluaron simulaciones de realidad virtual totalmente inmersiva en contextos de aula numerosa reportan mejoras no solo en las competencias de gestión conductual, sino también en variables afectivas y de satisfacción con el aprendizaje, lo que sugiere que el componente emocional de la experiencia inmersiva es un mediador relevante de la transferencia (Bi et al., 2025). Este hallazgo refuerza la necesidad de diseñar los protocolos de debriefing no solo como retroalimentación técnica, sino como un espacio de procesamiento emocional guiado.

Fortalezas diferenciales del metaverso frente a la formación presencial: anonimato protector, flexibilidad logística e inmediatez del feedback

Más allá de su potencia tecnológica, el metaverso educativo posee tres fortalezas estructurales que lo diferencian cualitativamente de la formación presencial tradicional y que explican, en parte, su creciente adopción en contextos de desarrollo profesional docente.

Figura 1.
Características diferenciales del metaverso educativo aplicado al entrenamiento socioemocional docente.

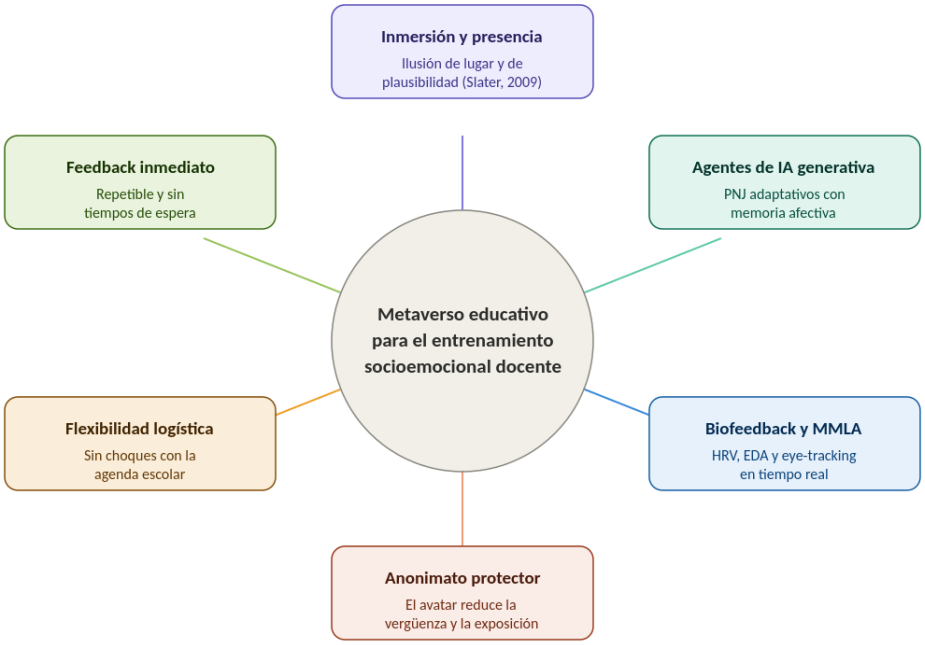


Figura 1. Características diferenciales del metaverso educativo aplicado al entrenamiento socioemocional docente.

Anonimato protector y desinhibición segura

A diferencia del role-playing analógico o de la observación entre pares, la mediación del avatar introduce un grado de anonimato funcional que reconfigura la exposición social del docente en formación. El profesor puede reaccionar ante un incidente crítico simulado, alzar la voz, quebrarse emocionalmente, equivocarse en la desescalada, sin que ese comportamiento quede ligado de forma directa e identificable a su persona real: el avatar puede tener un nombre, una apariencia y rasgos distintos a los del docente que lo opera, lo que dificulta su identificación inmediata por parte de observadores o compañeros de formación.

Esta característica no es un efecto secundario menor, sino un mecanismo psicológico documentado. Evidencia reciente muestra que los avatares de menor fidelidad visual, más estilizados, menos fotorrealistas, promueven una sensación de anonimato que reduce la evaluación social percibida y el estrés fisiológico durante conversaciones sensibles, con aplicaciones explícitamente señaladas para el ámbito educativo (Harari et al., 2025). En la misma línea, un estudio conductual y psicofisiológico encontró que hablar frente a una

audiencia de avatares tipo caricatura genera significativamente menos ansiedad que hacerlo frente a humanos reales, sin sacrificar la sensación de presencia ni la validez del entrenamiento (Girondini et al., 2023). Trasladado al entrenamiento socioemocional docente, este hallazgo sugiere que el metaverso permite al profesor 'ser él mismo' en su reacción emocional genuina, sin la autocensura ni la vergüenza anticipatoria que suele inhibir el ensayo honesto de estrategias de autorregulación en un taller presencial frente a colegas y superiores, precisamente porque el entorno externaliza y despersonaliza parcialmente esa reacción a través del avatar.

Flexibilidad logística frente a las limitaciones estructurales de la capacitación presencial

La formación presencial en gestión socioemocional enfrenta barreras de implementación bien documentadas. Reunir a la totalidad del cuerpo docente en un horario común es logísticamente complejo: las escuelas operan bajo una agenda saturada de imprevistos, situaciones críticas con estudiantes, capacitaciones obligatorias del Ministerio de Educación, auditorías e inspecciones, simulacros de emergencia, actos y fechas conmemorativas, que interrumpen de manera recurrente los procesos formativos planificados. La investigación sobre implementación de desarrollo profesional docente confirma que las restricciones de tiempo, la superposición con otras demandas curriculares y el desgaste asociado al estrés laboral figuran entre las barreras más citadas para que la capacitación presencial logre traducirse en cambios efectivos de práctica (Ketsman et al., 2024).

Frente a este panorama, las plataformas de metaverso educativo, accesibles de forma asíncrona, remota y repetible, eliminan buena parte de esta fricción logística. La evidencia comparada entre modelos de desarrollo profesional docente en formato digital y presencial documenta tasas de participación superiores al 75% y niveles de efectividad percibida comparables o superiores cuando se remueven las barreras de horario fijo y desplazamiento físico (Gu et al., 2025). De modo similar, la adaptación de un programa intensivo de formación docente de un formato presencial a uno virtual mantuvo la calidad de la experiencia de aprendizaje y amplió el acceso de docentes limitados por restricciones de tiempo, geografía o financiamiento (Chandran et al., 2021). El metaverso hereda y amplifica esta ventaja: cada docente puede completar su entrenamiento socioemocional en sesiones breves, en el momento disponible dentro de su propia

jornada, sin necesidad de coordinar la agenda de un equipo completo ni de sacrificar horas lectivas.

Inmediatez y repetibilidad del feedback

La formación presencial tradicional, basada en observación de pares, retroalimentación de un facilitador o análisis de casos en papel, entrega retroalimentación diferida: el docente recibe comentarios minutos, horas o incluso días después de haber actuado, cuando la huella fisiológica y emocional del incidente ya se ha disipado. Los sistemas de entrenamiento virtual asistidos por IA revierten esta lógica al ofrecer un ciclo de retroalimentación inmediato y continuo: plataformas como el Interactive Virtual Training for Teachers (IVT-T) analizan la conducta del docente en tiempo real y ajustan la respuesta del agente virtual instantáneamente, sin mediación de un evaluador externo (Delamarre et al., 2021). Esta inmediatez, sumada a la posibilidad de repetir el mismo escenario crítico las veces que sea necesario (algo estructuralmente imposible en un aula real o en un taller presencial de duración fija), permite que el docente ensaye, falle, reciba retroalimentación y vuelva a intentarlo en un mismo bloque de tiempo, acortando drásticamente el ciclo de aprendizaje experiencial respecto de los formatos tradicionales (Han et al., 2025).

Discusión

Brechas metodológicas y limitaciones tecnológicas actuales

Pese al enorme potencial de los metaversos e IA en la formación docente, la literatura y la práctica evidencian serias limitaciones que demandan prudencia analítica:

- El Valle Inquietante (Uncanny Valley): expresiones faciales de los avatares que resultan rígidas o incongruentes con el tono de voz pueden romper la Ilusión de Plausibilidad.

- Cybersickness: náuseas, fatiga visual y desorientación provocados por latencias en el renderizado, lo que limita el tiempo de exposición inmersiva; la evidencia meta-analítica reciente identifica el malestar físico y la fatiga cognitiva como barreras persistentes para sesiones prolongadas (Han et al., 2025).

- Carga Cognitiva Excesiva: el exceso de estímulos tecnológicos puede sobrecargar la memoria de trabajo del docente, compitiendo con la autorregulación emocional; investigaciones sobre aprendizaje basado en simulación muestran que el desempeño tiende a decaer tras aproximadamente 45 minutos de exposición continua, probablemente por sobrecarga sensorial (Han et al., 2025).

- Brecha de Escalabilidad: el costo de los dispositivos de frontera y los requerimientos de conectividad limitan su adopción masiva en contextos vulnerables; los costos reportados en la literatura oscilan entre aproximadamente 150 y 2.500 dólares por estación de trabajo, evidenciando una considerable variabilidad en la inversión tecnológica necesaria (Han et al., 2025).

- Brecha de Evidencia en Servicio: la investigación disponible se concentra abrumadoramente en docentes en formación inicial, mientras que los estudios con docentes en ejercicio siguen siendo escasos, lo que limita la comprensión de cómo estas herramientas operan en profesionales con trayectoria consolidada (Han et al., 2025).

Desafíos éticos, privacidad de datos biofisiológicos y sesgos de IA en la formación docente

La incorporación de estas tecnologías introduce dilemas éticos inéditos:

- Psicografía Biométrica y Privacidad: el rastreo de HRV y GSR genera datos sensibles que revelan la vulnerabilidad emocional profunda del docente, requiriendo protocolos éticos estrictos para evitar usos punitivos o de vigilancia institucional del desempeño.

- Sesgos Algorítmicos en Agentes Estudiantiles: los modelos de lenguaje que alimentan a los PNJ pueden reproducir y amplificar sesgos raciales, de género o estereotipos socioeconómicos presentes en sus datos de entrenamiento, riesgo ampliamente documentado en la literatura sobre IA generativa y agentes conversacionales aplicados a educación (Park et al., 2023).

- Riesgo de Re-traumatización: simulaciones extremadamente vívidas de incidentes de aula severos pueden desencadenar respuestas de distrés psicológico real en docentes con antecedentes de trauma profesional, lo que exige protocolos de

consentimiento informado, opciones de salida segura ('safe exit') y acompañamiento profesional durante el debriefing.

Futuras líneas de investigación y la convergencia Phygital en la educación

El avance de la disciplina demanda orientar las investigaciones futuras hacia los siguientes ejes estratégicos:

- Estudios Longitudinales de Transferencia: evaluar la retención y aplicación de las competencias socioemocionales en el aula real a mediano y largo plazo, superando el predominio actual de intervenciones breves de una sola sesión (Han et al., 2025).
- Investigación con Docentes en Servicio: ampliar la evidencia empírica más allá de la formación inicial, incorporando a profesionales con trayectoria consolidada y necesidades formativas diferenciadas.
- Sistemas Adaptativos en Tiempo Real (Closed-Loop VR): desarrollar entornos que ajusten la hostilidad del PNJ de forma automática basándose en las bioseñales del docente.
- Ecosistemas Phygital: investigar la hibridación continua entre sensores en entornos escolares reales y plataformas de simulación inmersiva.

Conclusiones

Las simulaciones en metaversos y mundos virtuales enriquecidos con IA de frontera no deben concebirse como meros artefactos sustitutivos, sino como laboratorios neuropedagógicos de alta fidelidad. Al permitir la convergencia entre presencia inmersiva, interactividad adaptativa basada en agentes inteligentes y diagnóstico objetivo mediante analítica multimodal, estos entornos ofrecen una solución inédita para resolver la histórica brecha entre la teoría socioemocional y la ejecución procedimental bajo presión.

La evidencia meta-analítica disponible confirma un efecto moderado y significativo de la realidad virtual sobre las competencias docentes, particularmente cuando se combinan alta inmersión, alta interactividad y objetivos de aprendizaje bien alineados (Han et al., 2025). No obstante, la consolidación de este campo requiere avanzar simultáneamente en

tres frentes: la robustez técnica de los agentes generativos, la validez ecológica de los protocolos de bio-debriefing, y la instalación de marcos éticos que protejan la privacidad biométrica y mitiguen los sesgos algorítmicos. Solo bajo estas condiciones las simulaciones inmersivas podrán consolidarse como un componente estructural y no meramente experimental de la formación socioemocional del profesorado del siglo XXI.

Referencias Bibliográficas

Álvarez, I. M., Manero, B., Romero-Hernández, A., Cárdenas, M., & Masó, I. (2024). Virtual reality platform for teacher training on classroom climate management: Evaluating user acceptance. Virtual Reality, 28(2), 78. https://doi.org/10.1007/s10055-024-00973-6

Anselmann, V. (2023). How to promote preservice teachers' reflections through critical incident training. Frontiers in Education, 8, 1212158. https://doi.org/10.3389/feduc.2023.1212158

Appelhans, B. M., & Luecken, L. J. (2006). Heart rate variability as an index of regulated emotional responding. Review of General Psychology, 10(3), 229–240. https://doi.org/10.1037/1089-2680.10.3.229

Aranberri-Ruiz, A., Aritzeta, A., Olarza, A., Soroa, G., & Mindeguia, R. (2022). Reducing anxiety and social stress in primary education: A breath-focused heart rate variability biofeedback intervention. International Journal of Environmental Research and Public Health, 19(16), 10181. https://doi.org/10.3390/ijerph191610181

Atal, D., Admiraal, W., & Saab, N. (2024). Effects of 360° video virtual reality-supported reflection on student teachers' classroom management self-efficacy and their stress levels. Teaching and Teacher Education, 144, 104573. https://doi.org/10.1016/j.tate.2024.104573

Bailenson, J. N., DeVeaux, C., Han, E., Markowitz, D. M., Santoso, M., & Wang, P. (2025). Five canonical findings from 30 years of psychological experimentation in virtual reality. Nature Human Behaviour, 9, 1328–1338. https://doi.org/10.1038/s41562-025-02216-3

Bi, X., Hu, Y., Li, L., Zhang, J., & Yang, X. (2025). Immersive virtual reality for classroom management training: Enhancing pre-service teachers' skills, emotions, and learning satisfaction. Education and Information Technologies, 30, 12387–12411. https://doi.org/10.1007/s10639-024-13248-z

Calderón-García, A., Álvarez-Gallardo, E., Belinchón-deMiguel, P., y Clemente-Suárez, V. J. (2024). Gender differences in autonomic and psychological stress responses among educators: a heart rate variability and psychological assessment study. *Frontiers in Psychology*, 15, Article 1422709. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1422709

Cervellione, B., Lombardo, E. & Iacolino, C. (2025). Psychological resources and interventions for teachers' emotional competence and well-being: A systematic review. Frontiers in Psychology, 16, 1640968. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1640968

Chandran, K. B., Haynie, K. C., Tawbush, R., & Wyss, J. M. (2021). Effectively adapting and implementing in-person teacher professional development to a virtual format. Journal of STEM Outreach, 4(3). https://doi.org/10.15695/jstem/v4i3.12

Checa, D., & Bustillo, A. (2020). A review of immersive virtual reality applications of school education. Educational Technology Research and Development, 68(6), 2827–2853. https://doi.org/10.1007/s11423-020-09834-8

Dede, C. (2009). Immersive interfaces for engagement and learning. Science, 323(5910), 66–69. https://doi.org/10.1126/science.1167311

Delamarre, A., Shernoff, E., Buche, C., Frazier, S., Gabbard, J., & Lisetti, C. (2021). The interactive virtual training for teachers (IVT-T) to practice classroom behavior management. International Journal of Human-Computer Studies, 152, 102646. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2021.102646

Dieker, L. A., Rodriguez, J. A., Lignugaris/Kraft, B., Hynes, M. C., & Hughes, C. E. (2014). The future of simulation in teacher education. Journal of Digital Learning in Teacher Education, 30(2), 54–60. https://doi.org/10.1080/21532974.2014.891876

Docter, M. W., de Vries, T. N. D., Nguyen, H. D., & van Keulen, H. (2024). A proof-of-concept of an integrated VR and AI application to develop classroom management competencies in teachers in training. Education Sciences, 14(5), 540. https://doi.org/10.3390/educsci14050540

Gebre, Z., Demissie, M., & Yimer, B.. (2025). The impact of teacher socio-emotional competence on student engagement: A meta-analysis. Frontiers in Psychology, 16, 1526371. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1526371

Giannakos, M. N., Sharma, K., Pappas, I. O., Kostakos, V., y Velloso, E. (2019). Multimodal data as a means to understand the learning experience. *International Journal of Information Management, 48*, 108-119. https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.02.003

Girondini, M., Stefanova, M., Pillan, M., & Gallace, A. (2023). Speaking in front of cartoon avatars: A behavioral and psychophysiological study on how audience design impacts on public speaking anxiety in virtual environments. International Journal of Human-Computer Studies, 179, 103106. https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2023.103106

Girvan, C. (2018). What is a virtual world? Definition and classification. Educational Technology Research and Development, 66(5), 1087–1100. https://doi.org/10.1007/s11423-018-9593-9

Gu, Y., He, J., Huang, W., & Sun, B. (2025). Professional development for teachers in the digital age: A comparative analysis of online training programs and policy implementation. Behavioral Sciences, 15(8), 1076. https://doi.org/10.3390/bs15081076

Han, X., Luo, H., Wang, Z., & Zhang, D. (2025). Using virtual reality for teacher education: A systematic review and meta-analysis of literature from 2014 to 2024. Frontiers in Virtual Reality, 6, Article 1620905. https://doi.org/10.3389/frvir.2025.1620905

Harari, R., Ravandi, B., Nabiyouni, M., Altaweel, A., Nodooshan, H. S., Karimi, H., & Wang, H. H. (2025). Presence vs. anonymity tradeoff: Contextual influences of avatar visual fidelity on physiological and psychological responses. Computers in

Human Behavior, 166, Article 108596. https://doi.org/10.1016/j.chb.2025.108596

Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., & Mella-Norambuena, J. (2021). Teachers' social–emotional competence: History, concept, models, instruments, and recommendations for educational quality. Sustainability, 13(21), 12142. https://doi.org/10.3390/su132112142

Lewandowska, A., Jankowski, M., Gujski, M., Andrzejczyk, A., Teliga-Czajkowska, J., & Silczuk, A. (2025). Perspectives of school principals on mental health promotion and prevention among school-aged children—A 2025 cross-sectional survey in Lodz administrative region in Poland. Healthcare, 13(13), 1498. https://doi.org/10.3390/healthcare13131498

Makransky, G., & Petersen, G. B. (2021). The Cognitive Affective Model of Immersive Learning (CAMIL): A theoretical framework detailing the relationship between features, media affordances, psychological outcomes, and learning within immersive virtual reality. Educational Psychology Review, 33(3), 937–981. https://doi.org/10.1007/s10648-020-09586-2

Mystakidis, S. (2022). Metaverse. Encyclopedia, 2(1), 486–497. https://doi.org/10.3390/encyclopedia2010031

Ortony, A., Clore, G. L., & Collins, A. (1988). The cognitive structure of emotions. Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9780511571299

Park, J. S., O'Brien, J. C., Cai, C. J., Morris, M. R., Liang, P., & Bernstein, M. S. (2023). Generative agents: Interactive simulacra of human behavior. Proceedings of the 36th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology (UIST '23), 1–22. https://doi.org/10.1145/3586183.3606763

Picard, R. W. (1997). Affective computing. MIT Press. https://doi.org/10.7551/mitpress/1140.001.0001

Radianti, J., Majchrzak, T. A., Fromm, J., & Wohlgenannt, I. (2020). A systematic review of immersive virtual reality applications for higher education: Design elements,

theoretical frameworks, and research agenda. Computers & Education, 147, 103778. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2019.103778

Ketsman, O., Kennedy, K., y Reeves, T. (2024). Interrogating an implementation filter: What constrains changes in teacher practice in response to professional development. *Professional Development in Education, 51*(8), 1875-1889. https://doi.org/10.1080/19415257.2024.2351945

Sanchez-Vives, M. V., & Slater, M. (2005). From presence to consciousness through virtual reality. Nature Reviews Neuroscience, 6(4), 332–339. https://doi.org/10.1038/nrn1651

Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1535), 3549–3557. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138

Stavroulia, K. E., & Lanitis, A. (2019). Building virtual reality environments for training teachers in managing challenging behaviors: A review. Cybernetics and Systems, 50(2), 200–216. https://doi.org/10.1080/01969722.2018.1558265

Yee, N., & Bailenson, J. (2007). The Proteus effect: The effect of transformed self-representation on behavior. Human Communication Research, 33(3), 271–290. https://doi.org/10.1111/j.1468-2958.2007.00299.x

Yilmaz, R. M., & Yilmaz, R. (2023). Examination of the usage of virtual reality in teacher training from 2002 to 2021: A bibliometric mapping analysis. Computers & Education, 193, 104676. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104676

Zhang, J., Pan, Q., Zhang, D., Meng, B., & Hwang, G.-J. (2024). Effects of virtual reality based microteaching training on pre-service teachers' teaching skills from a multi-dimensional perspective. Journal of Educational Computing Research, 62(4), 1058–1084. https://doi.org/10.1177/07356331231226179

Capítulo III

SEL-Resonant Embodied Avatars (SEL-REA) en la Formación Docente: Un Modelo Interdisciplinario de Agencia, Presencia Afectiva y Mediación Tecnológica

SEL-Resonant Embodied Avatars (SEL-REA) in Teacher Education: An Interdisciplinary Model of Agency, Affective Presence, and Technological Mediation

Fabiola Sáez-Delgado
Research and Innovation Group in Socioemotional Learning, Well-Being and Mental Health to Foster Thriving (THRIVE4ALL)
Facultad de Educación, Universidad Católica de la Santísima Concepción
fsaez@ucsc.cl
https://orcid.org/0000-0002-7993-5356
Concepción, Chile

Javier Mella- Norambuena
Departamento de Ciencias, Universidad Técnica Federico Santa María
javier.mellan@usm.cl
https://orcid.org/0000-0002-4288-142X

Jorge Cortés-Tenorio
Programa de Formación Pedagógica, Facultad de Educación, Universidad Católica de la Santísima
jcortes@historia.ucsc.cl
https://orcid.org/0000-0002-9975-8713

Paula Correa-Gutérrez
Programa de Doctorado en Innovación Educativa
pcorrea@doctoradoedu.ucsc.cl
https://orcid.org/0009-0009-0484-639X

Héctor García-Vásquez
Programa de Licenciatura en Educación Multimodal, Universidad de Playa Ancha
garciavasquez92@gmail.com
https://orcid.org/0000-0001-9654-4034

Richard Rodríguez-Gómez
Docente, Facultad de Educación, Universidad Católica de la Santísima, Concepción, Chile
Richard.rodríguez@ucsc.cl
https://orcid.org/0000-0002-9339-2888

Resumen

La formación docente en competencias socioemocionales enfrenta una brecha persistente entre el conocimiento declarativo sobre el Aprendizaje Socioemocional (SEL), «saber qué hacer» y la capacidad de autorregulación fisiológica en tiempo real ante incidentes críticos de aula, «saber responder bajo tensión». Este capítulo introduce y delimita conceptualmente el constructo *SEL-Resonant Embodied Avatars* (SEL-REA), concebido como un dispositivo tecno-pedagógico e inmersivo diseñado intencionalmente para inducir sintonía afectiva, simulación encarnada y seguridad psicológica en programas de entrenamiento profesional. A través de un marco interdisciplinario que integra la neurociencia afectiva, la cognición encarnada, la computación afectiva y el modelo SEL, se examina cómo las propiedades cinéticas, el seguimiento multimodal y el Efecto Proteo transforman al avatar de una mera representación gráfica en un mediador corporalmente situado. Asimismo, se propone una tipología de tres arquetipos funcionales, se presenta una guía metodológica para la fase de *debriefing* metacognitivo fundamentada en el aprendizaje experiencial y se discuten las implicaciones éticas sobre la privacidad de datos biométrico-afectivos y la transferencia de aprendizajes al aula real. El capítulo concluye articulando sus limitaciones, líneas futuras de investigación e implicaciones prácticas para la formación inicial y continua del profesorado en contextos iberoamericanos.

Abstract

Teacher education in social and emotional competencies faces a persistent gap between declarative knowledge about Social and Emotional Learning (SEL), "knowing what to do", and real-time physiological self-regulation during critical classroom incidents, "knowing how to respond under stress." This chapter introduces and conceptually defines the construct of *SEL-Resonant Embodied Avatars* (SEL-REA), designed as an immersive techno-pedagogical device that fosters affective attunement, embodied simulation, and psychological safety within professional development programs. Grounded in an interdisciplinary framework combining affective neuroscience, embodied cognition, affective computing, and the SEL model, it examines how kinetic properties, multimodal tracking, and the Proteus Effect transform the avatar from a simple graphical representation into a body-situated mediator. Furthermore, a typology of three functional archetypes is proposed, a methodological framework for metacognitive debriefing rooted in experiential learning is presented, and critical ethical considerations regarding biometric-affective data privacy and classroom transfer are discussed. The chapter concludes by outlining research limitations, future avenues, and practical implications for initial and continuing teacher education across Ibero-American contexts.

Palabras clave: SEL-REA, SEL-Resonant Embodied Avatars, Aprendizaje Socioemocional, Cognición Encarnada, Resonancia Afectiva, Efecto Proteo, Formación Docente, Debriefing Metacognitivo, Mundos Virtuales, Ética de Datos Biométricos.

Introducción

Complejidad del Aula e Incidentes Críticos

El escenario educativo contemporáneo se caracteriza por una alta complejidad ecológica, donde la simultaneidad, la multidimensionalidad y la imprevisibilidad imponen constantes demandas socioemocionales al profesorado. Los denominados incidentes críticos en el aula, definidos como acontecimientos altamente perturbadores que desestabilizan el clima de aprendizaje y desafían la identidad profesional del docente, requieren respuestas inmediatas que articulen la empatía, la autorregulación y la toma de decisiones responsable (Kabilan et al., 2025; Mena et al., 2024; Savina et al., 2025). Esta exigencia se intensifica en escenarios de vulnerabilidad social, ruralidad o transición pospandemia, donde la regulación emocional y la autorregulación académica del profesorado se ven especialmente comprometidas (Sáez-Delgado et al., 2024b).

A pesar de la creciente relevancia otorgada al bienestar y a las competencias socioemocionales del profesorado, los modelos de formación tradicionales han mantenido predominantemente un enfoque intelectualizado y descontextualizado (Han et al., 2025). Las metodologías convencionales (talleres conceptuales, análisis de casos en papel o discusiones grupales) permiten la adquisición de un conocimiento declarativo sólido sobre el Aprendizaje Socioemocional (SEL), pero fracasan al simular la carga alostática y la respuesta neurobiológica que experimenta el profesor ante una situación de crisis real (Bardach et al., 2023). Bajo niveles elevados de tensión fisiológica, los sistemas de control ejecutivo superior tienden a inhibirse, dando paso a respuestas reactivas o defensivas que contradicen el saber teórico del docente.

Antecedentes desde la Perspectiva Educativa

Desde la perspectiva educativa, la literatura ha consolidado un corpus robusto sobre las competencias socioemocionales docentes, su historia conceptual, sus modelos y los instrumentos disponibles para evaluarlas (Lozano-Peña et al., 2021), así como revisiones sistemáticas que sintetizan los programas de intervención dirigidos a desarrollarlas tanto en educación primaria y secundaria (Lozano-Peña et al., 2022, 2023) como en poblaciones docentes específicas, incluyendo profesorado de educación diferencial, lenguaje y matemática (Sáez-Delgado et al., 2025a). En el plano internacional, el marco de referencia más citado sigue siendo el propuesto por el Collaborative for Academic,

Social, and Emotional Learning (CASEL, 2020), que articula cinco competencias nucleares (autoconciencia, autorregulación, conciencia social, habilidades relacionales y toma de decisiones responsable) y que constituye la columna vertebral sobre la cual se organiza la tipología de arquetipos SEL-REA presentada en este capítulo.

Estudios en el contexto iberoamericano han profundizado en la relación entre competencia socioemocional docente, resiliencia y bienestar profesional en escuelas primarias (Jara-Coatt et al., 2026a) y públicas (Jara-Coatt et al., 2025b), así como en los modelos de competencia socioemocional orientados a la innovación educativa (Jara-Coatt et al., 2025a). En la tradición hispanohablante, Bisquerra (2005) y Fernández-Berrocal y Extremera (2005) sentaron tempranamente las bases de la educación emocional en la formación inicial del profesorado, argumentando que la competencia emocional docente no es un atributo personal accesorio, sino una condición profesional que debe formarse deliberadamente. En clave internacional, Jennings y Greenberg (2009) formalizaron el modelo del "aula prosocial", según el cual la competencia socioemocional del profesorado media directamente el clima de aula y los resultados de los estudiantes, un antecedente conceptual directo de la premisa que sostiene este capítulo: que entrenar la regulación emocional docente tiene efectos en cascada sobre el ambiente de aprendizaje. Complementariamente, Collie et al. (2025) han conceptualizado la competencia socioemocional percibida del profesorado como un mecanismo vital del SEL adulto, marco que permite justificar por qué la formación SEL docente y, no solo la del estudiantado, debe ocupar un lugar central en la agenda educativa.

En el plano metodológico, cabe destacar que la revisión de literatura que fundamenta este capítulo se apoyó en lineamientos actualizados para la conducción de revisiones con y sin apoyo de inteligencia artificial (Sáez-Delgado et al., 2026e), lo que permitió combinar búsqueda sistemática y verificación manual de fuentes primarias.

Antecedentes desde la Perspectiva Psicológica

Desde la psicología cognitiva y la neurociencia afectiva, el problema de la brecha entre el saber declarativo y la respuesta situada ha sido documentado ampliamente por la tradición de la cognición encarnada (embodied cognition), que sostiene que los procesos cognitivos y emocionales están indisolublemente arraigados en la experiencia corporal y sensoriomotora (Wilson, 2002). Immordino-Yang y Damasio (2007) fundamentaron,

desde la neurociencia afectiva y social, que la emoción no es un obstáculo para el aprendizaje racional sino su condición de posibilidad, premisa que justifica por qué un entrenamiento puramente conceptual resulta insuficiente para modificar la respuesta docente bajo estrés. A nivel intrapersonal, el bienestar psicológico y la salud mental docente han sido modelados en función de la inteligencia emocional y las estrategias de afrontamiento (Sáez-Delgado et al., 2023), la conciencia emocional (Sáez-Delgado et al., 2025b) y la asociación entre resiliencia e inteligencia emocional durante contextos de crisis, como la pandemia por COVID-19 (López-Angulo et al., 2022).

En el plano de la mediación tecnológica de la experiencia corporal, el fenómeno del Efecto Proteo (Yee & Bailenson, 2007), y su posterior sistematización meta-analítica (Ratan et al., 2020), demuestra que la apariencia y los atributos del avatar modulan de forma medible el comportamiento y las actitudes de quien lo encarna. Evidencia experimental adicional muestra que habitar un avatar con atributos distintos a los propios puede incluso reducir sesgos implícitos de forma sostenida (Banakou et al., 2016; Peck et al., 2013), lo que amplía el potencial del Efecto Proteo más allá del entrenamiento en autorregulación, hacia la formación en equidad y sensibilidad intercultural del profesorado.

Antecedentes desde la Perspectiva Tecnológica

La integración de mundos virtuales y tecnologías inmersivas en la formación docente no es una propuesta especulativa: cuenta con antecedentes consolidados. El sistema TLE TeachLivE™, pionero en el uso de avatares de mixed reality controlados por un operador humano ("human-in-the-loop") para el ensayo de manejo conductual de aula, demostró la viabilidad técnica y pedagógica de simular incidentes críticos con estudiantes virtuales (Dieker et al., 2015). En el contexto iberoamericano, Martínez-Pérez et al. (2019) documentaron la competencia digital de futuros docentes para la enseñanza mediante realidad virtual, mientras que revisiones meta-analíticas recientes confirman efectos positivos, aunque heterogéneos, de la integración de tecnologías inmersivas sobre el aprendizaje en educación primaria (Sandoval-Henríquez et al., 2025).

Un antecedente directo y determinante para este capítulo es el estudio de Sáez-Delgado et al. (2026b), que evaluó el impacto de un programa formativo basado en reflexión autocrítica y mundos virtuales sobre las competencias didácticas y socioemocionales de

docentes de matemática, aportando evidencia empírica preliminar de que la inmersión en mundos virtuales puede movilizar competencias socioemocionales docentes, no solo didácticas. A esto se suma el análisis comparativo de la calidad de plataformas de mundos virtuales según los estándares ISO 25010 y modelos de madurez (Sáez-Delgado et al., 2026f), que provee criterios técnicos objetivables, posteriormente retomados en el apartado 4.2 de este capítulo, para evaluar la idoneidad de una plataforma antes de alojar experiencias SEL-REA. En paralelo, la irrupción de la inteligencia artificial generativa reconfigura el rol del operador humano en estos entornos: se ha documentado tanto el potencial de la IA para personalizar la preparación docente superando neuromitos sobre estilos de aprendizaje (Escobar-Casallas et al., 2026), como las tensiones entre inteligencia artificial generativa y profesorado (Chiappe et al., 2025) y las concepciones docentes sobre IA para el aprendizaje matemático inclusivo (Gómez et al., 2026).

Antecedentes desde la Perspectiva Ética

Toda tecnología que registra señales biométricas y afectivas para fines formativos abre, simultáneamente, una superficie de riesgo. McStay (2018, 2020) ha caracterizado este campo como "IA emocional" (emotional AI), advirtiendo que la captura de biometría blanda, microexpresiones, prosodia, variabilidad cardiaca, constituye una forma de vigilancia afectiva cuya gobernanza no puede darse por sentada, incluso cuando la intención declarada sea formativa y no punitiva. En el ámbito específico de la formación docente mediada por inteligencia artificial, Barajas Motta et al. (2025) han examinado cómo cerrar la brecha entre IA y formación docente inclusiva en el marco de la Educación 4.0, subrayando la necesidad de diseños que no reproduzcan sesgos de representación. Esta preocupación se articula también con la dimensión de género en la formación socioemocional docente, documentada en relación con el bienestar y el desgaste profesional (Baeza-Sepúlveda et al., 2026b) y con la violencia escolar en Chile (Baeza-Sepúlveda et al., 2026a).

Propósito y Estructura del Capítulo

La integración de mundos virtuales y tecnologías inmersivas ofrece, en consecuencia, una oportunidad paradigmática para cerrar la brecha entre saber declarativo y respuesta situada. No obstante, la efectividad de estos entornos no depende únicamente de la sofisticación gráfica del escenario, sino de la naturaleza del objeto de mediación: el

avatar. En este capítulo sostenemos que, para lograr un aprendizaje socioemocional genuino, es necesario trascender la visión del avatar como un mero ícono gráfico o representante bidimensional. Se propone el constructo SEL-Resonant Embodied Avatars (SEL-REA) como una innovación teórico-práctica orientada a suscitar la resonancia afectiva y la vivencia encarnada necesarias para el entrenamiento docente bajo condiciones de alta fidelidad emocional y seguridad psicológica. Cabe precisar, para evitar ambigüedades terminológicas en lectores hispanohablantes, que la sigla SEL-REA no debe confundirse con la sigla "REA" empleada habitualmente para designar "Recursos Educativos Abiertos": el constructo aquí propuesto corresponde siempre a la unidad compuesta SEL-REA (SEL-Resonant Embodied Avatars), nunca a "REA" de forma aislada. El capítulo se organiza en siete apartados adicionales: fundamentación teórica interdisciplinaria del constructo (apartado 2), tipología de arquetipos funcionales (apartado 3), criterios tecno-pedagógicos de diseño (apartado 4), guía metodológica de formación y debriefing (apartado 5), consideraciones éticas (apartado 6), discusión con limitaciones, líneas futuras e implicancias prácticas (apartado 7) y conclusiones (apartado 8).

Desarrollo

Fundamentación Teórica del Constructo SEL-REA

El acrónimo SEL-REA (SEL-Resonant Embodied Avatars) articula cinco corpus teóricos independientes pero complementarios, situándose en la intersección de la psicología cognitiva, la neurociencia afectiva, la tecnología educativa y el aprendizaje socioemocional.

Cognición Encarnada (Embodied Cognition) y Sentido de Encarnación

La teoría de la cognición encarnada cuestiona la metáfora racionalista de la mente como software desapegado del cuerpo, argumentando que los procesos cognitivos y afectivos están indisolublemente arraigados en las experiencias sensoriomotoras (Wilson, 2002). En entornos inmersivos, un avatar SEL-REA debe inducir el denominado Sense of Embodiment (Sentido de Encarnación), estructurado en tres componentes fundamentales (Kilteni et al., 2012):

- Ubicación Espacial (Self-Location): la percepción egocéntrica de estar situado dentro del espacio virtual y coincidir espacialmente con la corporalidad del avatar.

- Sentido de Agencia (Sense of Agency): la convicción subjetiva de que los movimientos, gesticulaciones y expresiones del avatar son causados de forma directa e inmediata por las acciones del docente.

- Propiedad Corporal (Body Ownership): el fenómeno neuropsicológico por el cual el cerebro integra el cuerpo virtual como una extensión legítima de la propia biología.

Neurociencia Afectiva y Resonancia Afectiva

La resonancia afectiva hace referencia a la capacidad biológica del organismo para sintonizar con el estado emocional expresado por otro sujeto mediante mecanismos de simulación encarnada (Gallese, 2005). Activada por el sistema de neuronas espejo y los circuitos visceromotores subcorticales, la resonancia permite que el docente experimente una réplica somática y visceral del conflicto observado. Esta perspectiva es consistente con el argumento de Immordino-Yang y Damasio (2007), según el cual la separación entre razón y emoción es una ficción pedagógicamente costosa: aprender a regular una emoción bajo presión requiere activar, y no evitar, los circuitos afectivos implicados. Un avatar SEL-REA está diseñado para proyectar claves kinésicas, prosódicas y microexpresivas que desencadenan en el docente respuestas biológicas auténticas (variabilidad cardiaca, reactividad galvánica), permitiendo ensayar la autorregulación no desde un plano especulativo, sino en el plano somático.

El Efecto Proteo (Proteus Effect) e Identidad Inmersiva

Formulado originalmente por Yee y Bailenson (2007), el Efecto Proteo establece que los usuarios adaptan inconscientemente sus actitudes y comportamientos para alinearlos con los atributos visuales de su avatar. Meta-análisis posteriores han confirmado que este efecto es robusto, aunque de tamaño pequeño a moderado y sensible a variables de diseño y contexto (Ratan et al., 2020). Al adoptar un SEL-REA caracterizado por posturas de apertura, serenidad y aplomo, el docente experimenta una modulación positiva en su percepción de autoeficacia y conducta asertiva, facilitando la incorporación de nuevos repertorios de afrontamiento ante el estrés. La evidencia sobre embodiment de avatares con atributos distintos a los propios, por ejemplo, en estudios sobre reducción de sesgo racial implícito mediante la encarnación de un avatar de otra apariencia (Banakou et al., 2016; Peck et al., 2013), sugiere además que el Efecto Proteo podría explotarse

deliberadamente en el diseño de SEL-REA orientados a la formación en equidad y sensibilidad intercultural docente, una línea que se retoma en el apartado 7.4.

Presencia, Ilusión de Lugar y Plausibilidad

Para que la resonancia afectiva y el Efecto Proteo operen, el docente debe experimentar el entorno virtual como suficientemente "real" en dos sentidos complementarios que Slater (2009) distingue con precisión: la Place Illusion (PI), o ilusión de estar físicamente presente en el lugar virtual, y la Plausibility Illusion (Psi), o ilusión de que los eventos que ocurren en ese lugar son genuinamente reales y responden a las propias acciones. Cuando ambas ilusiones coexisten, los usuarios tienden a responder ante los estímulos virtuales con reacciones fisiológicas y conductuales comparables a las de situaciones reales, incluso sabiendo racionalmente que no lo son (Slater & Sanchez-Vives, 2016). Esta propiedad es la que legitima, desde el punto de vista teórico, que un incidente crítico simulado con un SEL-REA Estudiante pueda inducir una activación fisiológica genuina en el docente, condición necesaria para el ensayo de autorregulación en el sentido pleno del término.

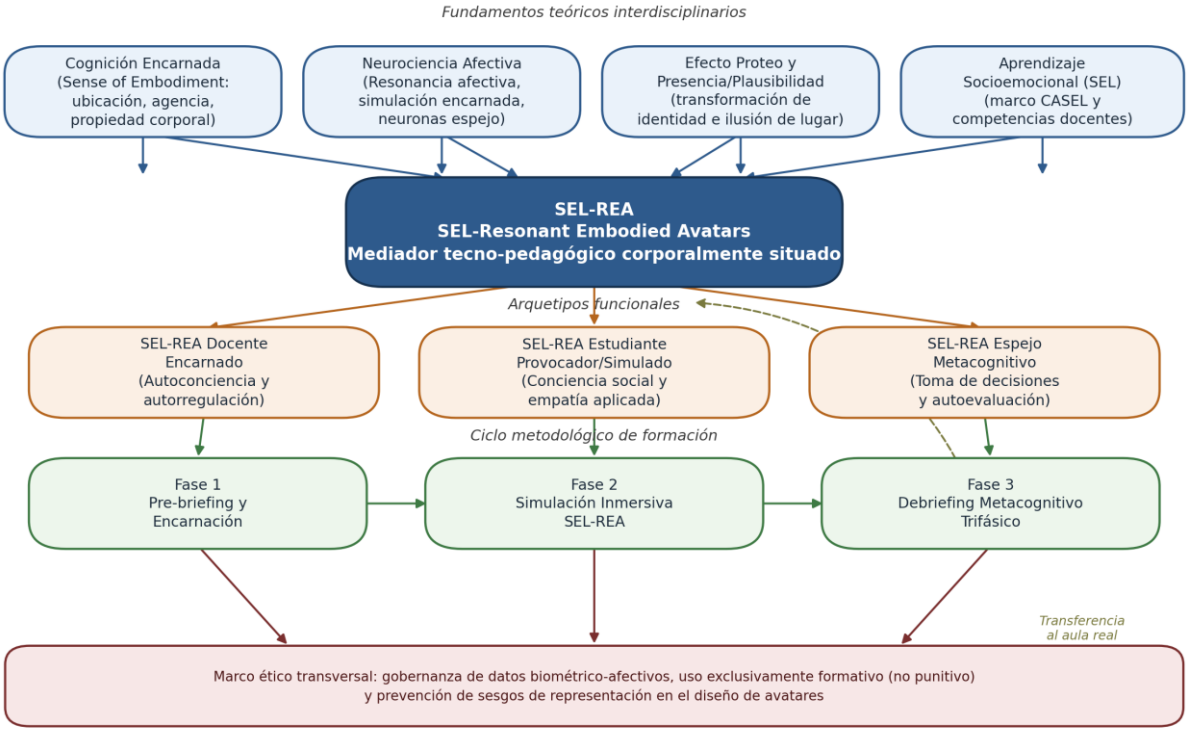
Aprendizaje Socioemocional (SEL) como Marco Integrador

El cuarto pilar teórico corresponde al marco del Aprendizaje Socioemocional, que aporta al modelo SEL-REA su vocabulario de competencias y su lógica de evaluación. El marco CASEL (2020), autoconciencia, autorregulación, conciencia social, habilidades relacionales y toma de decisiones responsable, se utiliza en este capítulo como sistema de clasificación de los objetivos formativos de cada arquetipo de avatar (apartado 3). Este marco es compatible y se articula con el modelo histórico-conceptual de la competencia socioemocional docente propuesto por Lozano-Peña et al. (2021), así como con evidencia empírica sobre la relación entre competencia socioemocional docente, clima de aula y resultados estudiantiles (Jennings & Greenberg, 2009) y sobre la competencia socioemocional percibida como mecanismo del SEL adulto (Collie et al., 2025). La convergencia de estos cinco pilares, cognición encarnada, neurociencia afectiva, Efecto Proteo, presencia/plausibilidad y SEL, es lo que permite definir a SEL-REA no como una tecnología más, sino como un constructo teórico-práctico integrador, según se sintetiza en la Figura 1.

Figura 1.

Modelo interdisciplinario SEL-REA: fundamentos teóricos, arquetipos funcionales, ciclo metodológico y marco ético transversal. Elaboración propia.

Figura 1. Modelo Interdisciplinario SEL-Resonant Embodied Avatars (SEL-REA)



La Figura 1 posiciona la sigla SEL-REA en el centro de un modelo de cuatro niveles: (a) los cuatro fundamentos teóricos descritos en los apartados 2.1 a 2.5 convergen en el constructo central; (b) el constructo se despliega operativamente en tres arquetipos funcionales (apartado 3); (c) los arquetipos se activan secuencialmente a lo largo de un ciclo metodológico de tres fases (apartado 5); y (d) todo el modelo opera bajo un marco ético transversal de gobernanza de datos y prevención de sesgos (apartado 6), que retroalimenta el diseño de los arquetipos, tal como indica la flecha de transferencia al aula real.

Tipología y Arquetipos de Avatares SEL-REA en la Formación Docente

Para garantizar la intencionalidad pedagógica y asegurar una transferencia efectiva de las habilidades socioemocionales desde el entorno inmersivo al aula real, se establecen tres arquetipos funcionales de avatares SEL-REA. Esta tipología no solo opera como la traducción práctica del marco CASEL (2020) descrito en el apartado 2.5, sino que se

alinea estrechamente con los principios de la cognición encarnada y la neurociencia afectiva.

Si bien esta integración encuentra un antecedente operativo directo en el modelo *human-in-the-loop* del sistema TeachLivE™ (Dieker et al., 2015), la presente propuesta avanza al incorporar la inteligencia artificial generativa y la captura de señales prosódicas y microexpresivas abordadas en los apartados anteriores. Como se argumentó previamente, es necesario trascender la visión del avatar como un mero ícono gráfico. Apoyados en revisiones recientes sobre Agentes de IA Multimodales (Zhu, 2026), se sostiene que esta integración permite que el avatar opere como un verdadero "mediador corporalmente situado". En términos operativos, esto implica que un sistema de inteligencia artificial, supervisado activamente por un facilitador humano (modelo híbrido *human-in-the-loop*), modula al avatar-estudiante para generar deliberadamente un incidente crítico (simulando, por ejemplo, estados de desregulación o conducta disruptiva). De este modo, el sistema asiste en generar una interacción altamente creíble que elicita respuestas socioemocionales genuinas en el docente, sentando así las bases para su posterior análisis reflexivo sin romper la ilusión de plausibilidad. A continuación, se detallan los tres arquetipos, diferenciados por su rol operativo y función psico-pedagógica que justifican su eficacia en la experiencia formativa.

Tabla 1.

Tipología de arquetipos funcionales SEL-REA y su soporte tecnológico. Elaboración propia.

Arquetipo	**Operador / Control**	**Función Psico-Pedagógica**	**Dimensión SEL Focalizada (CASEL, 2020)**	**Soporte Tecnológico Multimodal**
SEL-REA Docente Encarnado	Docente en formación (usuario principal).	Permite la inmersión activa y la vivencia en primera persona. Ensaya presencia directiva, autorregulación kinésica y contención verbal.	Autoconciencia y Autorregulación Emocional.	Seguimiento multimodal de los movimientos y el tono de voz del usuario en tiempo real (entre otros).

SEL-REA Estudiante Provocador/Simulado	Inteligencia artificial o facilitador (human-in-the-loop)	Genera el incidente crítico mediante la simulación de estados de desregulación, ansiedad, apatía o conducta disruptiva.	Conciencia Social y Empatía Aplicada.	Proyección de claves kinésicas, prosódicas y microexpresivas mediante respuestas adaptativas.
SEL-REA Espejo Metacognitivo	Sistema (reproducción diferida 3D)	Reproduce la actuación grabada del docente desde una perspectiva en tercera persona para facilitar el análisis reflexivo post-simulación basado en evidencia.	Toma de Decisiones Responsable y Autoevaluación.	Registro y reproducción de la conducta observable (impacto verbal y no verbal) para el análisis en diferido.

La articulación de esta tipología no responde únicamente a decisiones instrumentales de diseño de software, sino que se fundamenta en mecanismos neurocognitivos y afectivos documentados por la evidencia reciente en entornos inmersivos:

En primer lugar, respecto al **SEL-REA Docente Encarnado**, la efectividad de este arquetipo se sostiene en el Sentido de Encarnación (*Sense of Embodiment*) abordado en el apartado 2.1. Más allá de la mera agencia kinésica, investigaciones recientes demuestran que las señales autorreferenciales y la personalización del avatar modulan profundamente la percepción del propio cuerpo en la realidad virtual, impactando directamente en la auto-identificación y el sentido de agencia del usuario (Fiedler et al., 2024). Al experimentar este alto grado de propiedad sobre el cuerpo digital, el docente en formación puede concentrar sus recursos cognitivos en la regulación emocional y la contención, mitigando la carga extrínseca que supondría interactuar a través de una interfaz tradicional menos inmersiva.

En segundo lugar, el valor pedagógico del SEL-REA Estudiante Provocador/Simulado se sustenta en su capacidad para mantener la Ilusión de Plausibilidad (*Plausibility Illusion*) detallada en el apartado 2.4, induciendo así una respuesta alostática genuina. La evidencia empírica actual confirma que los humanos virtuales conversacionales, especialmente

aquellos impulsados por Modelos de Lenguaje Grande (LLM), son altamente efectivos en la elicitación de emociones sociales complejas (Llanes-Jurado et al., 2024). Al generar respuestas lingüísticas y no verbales contextualmente precisas, el avatar trasciende el rol de estímulo estático para desencadenar una resonancia afectiva y tensión real en el docente. Esto permite emular la alta exigencia psicológica de un incidente crítico auténtico y entrenar la empatía aplicada, preservando la seguridad y evitando los riesgos éticos de exponer a un alumno real del sistema escolar.

Finalmente, la necesidad del SEL-REA Espejo Metacognitivo responde directamente a la brecha existente entre el conocimiento declarativo y la capacidad de respuesta bajo tensión (abordada en el apartado 1.1). Durante la simulación del incidente crítico, la elevada activación fisiológica del docente dificulta los procesos de metacognición profunda en tiempo real. Por ello, la disociación temporal que ofrece la perspectiva en tercera persona diferida resulta ser un mecanismo clave. Estudios recientes en el entrenamiento simulado de habilidades terapéuticas subrayan que la observación en diferido permite al profesional tomar conciencia de sus propias señales no verbales (proxémica, postura) y de sus decisiones de intervención. Esto apoya directamente la práctica deliberada, facilitando la reflexión profunda sobre las opciones tomadas y permitiendo la experimentación mental con respuestas alternativas en un entorno de bajo riesgo (Riachi et al., 2026).

Esta tipología no es estática: los tres arquetipos operan de forma sinérgica y articulada dentro de un mismo ciclo de sesión, de modo que un mismo docente en formación puede encarnar el arquetipo *Docente Encarnado* durante la simulación y, posteriormente, observarse a través del arquetipo *Espejo Metacognitivo* durante el *debriefing*. Cabe señalar que la calibración del arquetipo *Estudiante Provocador/Simulado*, en particular al apoyarse en inteligencia artificial generativa, exige un diseño ético riguroso para evitar la reproducción de estereotipos conductuales o sesgos algorítmicos. En línea con las advertencias formuladas por Barajas Motta et al. (2025) sobre los riesgos de sesgo en sistemas de IA para la formación docente inclusiva, y con las reflexiones de Chiappe et al. (2025) sobre las tensiones de la IA generativa frente al criterio profesional, es precisamente aquí donde el modelo híbrido (*human-in-the-loop*) cobra su mayor relevancia. La supervisión activa del facilitador humano actúa como una salvaguarda indispensable que asegura que la provocación simulada se mantenga dentro de los márgenes de la seguridad psicológica y la equidad (Zhu, 2026), garantizando que la

herramienta tecnológica se subordine en todo momento a los objetivos socioemocionales de la formación.

Criterios Tecno-Pedagógicos de Diseño e Inmersión

La materialización de los arquetipos expuestos en el capítulo anterior exige que la plataforma no opere como un obstáculo cognitivo. Por ello, para consolidar la resonancia afectiva sin incurrir en distracciones tecnológicas, el diseño de los avatares SEL-REA requiere atender a directrices técnicas específicas, agrupadas en tres subapartados fundamentales: sincronía e inmersión, calidad de la plataforma, y el rol del operador.

1. **Sincronía Multimodal, Valle Inquietante y Seguridad Psicológica**

- Sincronía Multimodal y Bajas Latencias: la respuesta del avatar a los movimientos del profesor y al tono de voz debe registrar latencias inferiores a 100 milisegundos. Retardos mayores destruyen el sentido de agencia (Kilteni et al., 2012) e interrumpen la sintonía emocional.

- Superación del Valle Inquietante (Uncanny Valley) y Coherencia Artificial: se recomienda el uso de estilos gráficos estilizados o semifigurativos con alta fidelidad cinemática, en lugar de renderizados fotorrealistas defectuosos que generan rechazo perceptivo (Mori, 2012). Apoyados en la literatura reciente (Zhu, 2026), este principio de diseño se fundamenta en la búsqueda de una "coherencia artificial". Un fotorrealismo imperfecto, donde la textura visual es hiperrealista pero la cinemática de los labios o la expresión facial no sincroniza con la voz, dispara la carga cognitiva extrínseca, ya que el cerebro intenta resolver constantemente esa disonancia. Por el contrario, un diseño semifigurativo que priorice la alta fidelidad cinemática (movimientos y lenguaje no verbal altamente fluidos y precisos) por encima del detalle fotográfico, resulta mucho más efectivo para engañar positivamente al cerebro. Al evitar estas disonancias visuales, se mantiene bajo el filtro afectivo y se preserva intacta la ilusión de plausibilidad, garantizando que la resonancia afectiva entre el docente y el avatar no se interrumpa.

- Seguridad Psicológica y el Efecto Escudo: la representación mediante un avatar disminuye la percepción de amenaza a la autoimagen del docente. El margen de error se percibe como una simulación corregible, desinhibiendo la deseabilidad social y favoreciendo el ensayo de estrategias novedosas. Este principio es coherente con el

constructo de seguridad psicológica de Edmondson (1999), y con la noción de "contenedor seguro de aprendizaje" propuesta por Rudolph et al. (2014) para entornos de simulación profesional.

2. Calidad y Estándares de las Plataformas Inmersivas

La elección de la plataforma tecnológica que alojará las experiencias SEL-REA no debe librarse a criterios exclusivamente estéticos o comerciales. Como demuestran Sáez-Delgado et al. (2026f) en su análisis comparativo de plataformas de mundos virtuales basado en los estándares de calidad de software ISO 25010 y en modelos de madurez tecnológica, resulta imperativo evaluar dimensiones estructurales como la usabilidad, fiabilidad, seguridad, portabilidad y eficiencia de desempeño. En consecuencia, recomendamos que la infraestructura técnica de los programas SEL-REA garantice explícitamente estas dimensiones, priorizando dos de ellas: la fiabilidad operativa, indispensable para evitar caídas del sistema o latencias severas que fracturen la inmersión y vulneren la seguridad psicológica construida para el *debriefing*; y la seguridad de la información, un requisito ineludible debido al procesamiento continuo de datos biométrico-afectivos altamente sensibles, dimensión ética y técnica que se abordará en profundidad en el apartado 6.

3. El Rol de la Inteligencia Artificial como Operador Human-in-the-Loop

La sofisticación de los modelos de lenguaje e IA generativa amplía las posibilidades del arquetipo *SEL-REA Estudiante Provocador/Simulado*, permitiendo generar respuestas conversacionales y no verbales adaptativas sin depender exclusivamente de un actor humano en tiempo real. Sin embargo, desde una perspectiva estrictamente técnica, delegar el control total a un sistema autónomo presenta limitaciones críticas para simular la desregulación en el aula.

Revisiones sistemáticas recientes sobre sistemas de diálogo por voz advierten sobre las severas limitaciones técnicas en la gestión de turnos (*turn-taking*) durante la interacción humano-agente (Chen y Lee, 2025). Los modelos de lenguaje conversacionales operan bajo lógicas semidúplex dependientes de la detección de actividad vocal (VAD, por sus siglas en inglés); esto significa que dependen de umbrales rígidos de silencio para detectar el cambio de turno y carecen de mecanismos fluidos para procesar solapamientos de voz o interrupciones cruzadas (*barge-ins*). Esta limitación genera diálogos pausados y

rígidamente secuenciales, produciendo un patrón artificial conocido como "efecto entrevista". Un incidente crítico real en el aula, por el contrario, se caracteriza por interrupciones abruptas, voces superpuestas y un ritmo de alta tensión que la tecnología autónoma actual no logra emular sin fracturar el ritmo conversacional.

Esta limitación técnica debe sopesarse frente a la evidencia sobre las concepciones docentes acerca de la IA para el aprendizaje inclusivo (Gómez et al., 2026), el potencial de la IA para personalizar la formación docente superando neuromitos (Escobar-Casallas et al., 2026) y las tensiones éticas identificadas frente al criterio profesional docente (Chiappe et al., 2025). En coherencia con estos hallazgos, se recomienda firmemente un modelo híbrido en el cual la IA generativa module el comportamiento de base del avatar-estudiante, pero un facilitador humano (*human-in-the-loop*) supervise e intervenga activamente. Esta figura humana no solo resulta vital para mitigar el "efecto entrevista", aportando la fluidez, los solapamientos y la imprevisibilidad propios de un estudiante alterado, sino que actúa como la salvaguarda indispensable capaz de calibrar la intensidad del incidente crítico, pudiendo detener la simulación si se compromete la seguridad psicológica del docente en formación.

Guía Metodológica del Ciclo de Formación y Debriefing Metacognitivo

El aprendizaje derivado de una simulación no depende meramente de la exposición al incidente crítico. Esto se consolida mediante una secuencia pedagógica que articula preparación, experiencia, reflexión guiada y transferencia al aula real. Esta lógica se apoya en el ciclo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984), en la distinción de Schön (1983) entre reflexión en la acción y reflexión sobre la acción, y en la literatura sobre debriefing en simulación (Fanning & Gaba, 2007; Rudolph et al., 2007). En el modelo SEL-REA, la simulación constituye una experiencia deliberadamente diseñada y no una prueba de desempeño. De esta manera, su propósito es hacer observables las respuestas somáticas, emocionales, kinésicas y decisionales del docente para analizarlas en un entorno de seguridad psicológica. Por ello, cada sesión debe de mantener una secuencia estable de preparación, simulación y debriefing, junto con criterios explícitos de seguridad, registro y transferencia.

Tabla 2.
Ciclo de formación SEL-REA. Elaboración propia, adaptado de los modelos de debriefing de Fanning y Gaba (2007) y Rudolph et al. (2007).

Fase del Ciclo	Duración	Objetivo y Actividades Clave	Rol del Facilitador
Fase 1: Pre-briefing y Encarnación	15-20 min	Aclimatación tecnológica, calibración de seguimiento de voz y cuerpo. Establecimiento del contrato de seguridad psicológica. Definición de metas socioemocionales de la sesión.	Orientador / Calibrador técnico.
Fase 2: Simulación Inmersiva SEL-REA	10–15 min	Enfrentamiento en vivo del incidente crítico en el mundo virtual. Interactividad con SEL-REA Estudiante. Activación de regulación emocional y respuestas kinésico-verbales.	Operador human-in-the-loop u observador silencioso.
Fase 3: Debriefing Metacognitivo Trifásico	30–45 min	Procesamiento reflexivo estructurado en tres momentos: descompresión somático-afectiva, análisis crítico y generalización/transferencia.	Guía socrático / Facilitador reflexivo.

1. Estructura Operativa del Debriefing Metacognitivo (Protocolo Paso a Paso)

La etapa de debriefing se organiza en tres momentos secuenciales obligatorios, cuyo diseño operacionaliza el modelo de "debriefing con buen juicio" (debriefing with good judgment) de Rudolph et al. (2007), que combina retroalimentación rigurosa con indagación genuina. El análisis no debe de comenzar mientras el participante mantenga un nivel de activación que dificulte su reflexión. Asimismo, la grabación no debe de utilizarse para exponer, ridiculizar o calificar de manera punitiva a su desempeño. Por ello, el facilitador debe de priorizar la descripción de evidencias observables, indagar en el razonamiento que originó la acción y, posteriormente, promover respuestas alternativas

Paso 1: Descompresión Somático-Afectiva y Salida del Rol (De-escalation & De-roling)

- Propósito: Facilitar la salida consciente del rol, reducir la activación fisiológica y recuperar un estado que permita describir la experiencia sin sentirse nuevamente inmerso en el conflicto simulado.

- Preguntas guía: "¿Cómo se encuentra tu cuerpo en este momento?", "¿Qué señales físicas o emocionales aparecieron durante el punto de mayor tensión?", "¿En qué instante sentiste que perdiste o recuperaste el control emocional?"

- Duración orientativa: 5-10 minutos.

- Acciones para el facilitador: Recoger una impresión inicial sin realizar interpretaciones, ofrecer una pausa o alguna estrategia de regulación cuando sea necesario y solicitar una confirmación explícita de avanzar hacia el análisis

- Criterio de avance: El participante logra identificar sus sensaciones corporales y emocionales y manifiesta encontrarse en condiciones de continuar con la fase de análisis reflexivo.

Paso 2: Análisis Crítico y Revisión Espejo (Analysis & Reflection)

- Propósito: Examinar la actuación desde una perspectiva en tercera persona, contrastando la intención del docente, la conducta observable y su posible impacto verbal y no verbal sobre el avatar del estudiante.

- Preguntas guía: "Al observar la grabación de tu avatar desde fuera, ¿qué mensaje transmitía tu postura corporal?", "¿Qué señales del avatar del estudiante pasaron desapercibidas durante la simulación, pero puedes reconocer ahora?", "¿Qué respuesta alternativa habría sido más coherente con la meta socioemocional de la sesión?"

- Duración orientativa: 15-20 minutos.

- Acciones para el facilitador: Seleccionar fragmentos breves y pertinentes de la experiencia; diferenciar los hechos observables de las interpretaciones personales; formular preguntar antes de entregar recomendaciones; y reconocer tanto los recursos utilizados de manera efectiva como las oportunidades de mejora.

- Criterio de avance: El participante logra reconocer al menos una respuesta efectiva y una oportunidad de mejora, relacionándolas con la meta socioemocional establecida para la sesión.

Paso 3: Generalización y Transferencia al Aula Real (Application & Synthesis)

- Propósito: Transformar el aprendizaje corporal y reflexivo obtenido durante la simulación en una decisión pedagógica concreta, contextualizada y aplicable a la práctica profesional.

- Preguntas guía: "¿Cómo se relaciona lo experimentado con los incidentes reales que enfrentas en tu contexto educativo?", "¿Qué micro-gesto, frase o técnica de autorregulación aplicarías en tu siguiente clase?" y "¿Qué evidencia observarías para determinar si la respuesta fue efectiva?"

- Duración orientativa: 10-15 minutos.

- Acciones para el facilitador: Ayudar al participante a adaptar la estrategia a su contexto, anticipar posibles dificultades y acordar una oportunidad concreta para ponerla en práctica en el aula real.

- Producto esperado: Definición de una acción breve y aplicable que indique qué realizará el participante, en qué situación y qué evidencia utilizará para valorar su efectividad.

- Criterio de cierre: El participante formula una estrategia concreta y contextualizada para transferir lo aprendido a una situación real de su práctica docente.

2. Fundamentos del Debriefing y Articulación con Programas de Entrenamiento Existentes

La estructura trifásica propuesta no busca remplazar los programas de formación socioemocional existentes, sino complementarlos mediante una experiencia inmersiva reflexiva. En este sentido, puede articularse con programas de entrenamiento en autorregulación emocional y habilidad sociales docentes, como ESED-10 (Lozano Peña et al., 2024), cuyo protocolo estructurado puede implementarse antes o después de una sesión SEL-REA para preparar o reforzar las competencias trabajadas.

Asimismo, manuales técnico-prácticos como Aulas que Florecen (Sáez-Delgado et al., 2026ª) pueden aportar estrategias de regulación, comunicación y resolución de conflictos que posteriormente sean practicadas dentro de la simulación que se haya realizado. Por su parte, el análisis del rol del docente como mediador en la resolución de conflictos realizado por Jara-Coatt et al (2026b) proporciona situaciones prototípicas, como los conflictos entre pares, desregulaciones conductuales o la resiliencia de la autoridad pedagógica. De esta manera, SEL-REA puede funcionar como un especio de aplicación práctica en el que los conocimientos y estrategias adquiridos en otros programas sean ensayados, observados y analizados antes de su transferencia al aula real.

Consideraciones Éticas, Privacidad y Desafíos Futuros

El despliegue de tecnologías inmersivas con fines formativos y en particular de avatares SEL-REA, impone una responsabilidad ética, en línea con la evidencia reciente sobre los dilemas éticos que emergen al integrar tecnologías inmersivas avanzadas en contextos educativos (Peña-Acuña & Rubio-Alcalá, 2024) y con el análisis de las tensiones éticas propias de la computación afectiva, entre su potencial formativo y los riesgos de vigilancia, sesgo y uso indebido de los datos emocionales (Devillers & Cowie, 2023). Este desafío se despliega en al menos tres ámbitos críticos, que se desarrollan a continuación.

1. Privacidad y Gobernanza de Datos Biométrico-Afectivos

Las plataformas inmersivas de alta fidelidad registran métricas altamente sensibles, frecuencia cardiaca, micropausas en la voz, patrones de mirada y tensión física, lo que las inscribe en lo que McStay (2018, 2020) denomina el campo de la "IA emocional", caracterizado por el uso de biometría blanda para inferir estados afectivos con fines de personalización, evaluación o, potencialmente, vigilancia, un riesgo confirmado empíricamente por evidencia reciente sobre la capacidad de los algoritmos de identificar a los usuarios a partir de sus propios datos conductuales en entornos de realidad virtual (Kumarapeli et al., 2024). Debe garantizarse, bajo estrictos protocolos de gobernanza, que estos datos sean utilizados de manera confidencial y con fines exclusivamente formativos, prohibiendo explícitamente su uso para evaluaciones punitivas de desempeño laboral, en concordancia con las recomendaciones éticas sobre limitación de propósito y protección de la privacidad en los sistemas de reconocimiento automático de emociones (Mohammad, 2022). Esta salvaguarda es especialmente relevante en contextos de desgaste profesional y bienestar docente, donde el mal uso de datos emocionales podría profundizar, en lugar de aliviar, el estrés y la ansiedad evaluativa del profesorado (Mantello & Ho, 2024; Baeza-Sepúlveda et al., 2026b).

2. Prevención de Sesgos de Representación

La modelación de avatares estudiantes debe evitar la replicación de estereotipos culturales, raciales o de género en la escenificación de conductas disruptivas. El diseño inclusivo y diverso de la tipología de avatares es una condición indispensable para promover una equidad genuina, en línea con las advertencias sobre sesgo algorítmico en

sistemas de IA aplicados a la formación docente inclusiva (Barajas Motta et al., 2025) y con la evidencia sobre cómo la dimensión de género atraviesa la formación socioemocional y el desgaste profesional docente (Baeza-Sepúlveda et al., 2026b). Paradójicamente, la misma propiedad que genera este riesgo, la maleabilidad identitaria del avatar bajo el Efecto Proteo, puede convertirse en una herramienta de mitigación de sesgos si se diseña deliberadamente con ese propósito, tal como sugiere la evidencia sobre reducción de sesgo implícito mediante embodiment de avatares de apariencia distinta a la propia (Banakou et al., 2016; Peck et al., 2013), lo que ha sido confirmado recientemente tanto en el contexto específico del sesgo algorítmico mediante toma de perspectiva incorporada en avatares (Schlagowski et al., 2024) como en estudios con docentes que, al encarnar avatares que experimentan sesgo, incrementan su empatía hacia la diversidad estudiantil (Meyer & Smith, 2025).

3. Transferencia, Sobreingeniería Emocional y Dependencia Tecnológica

Un tercer desafío ético, menos explorado en la literatura, es el riesgo de que la vivencia altamente controlada y "segura" del entorno SEL-REA genere expectativas poco realistas sobre la previsibilidad de los incidentes críticos en el aula física, un riesgo que la evidencia reciente en formación docente mediante realidad virtual respalda al advertir que los patrones de respuesta desarrollados en entornos simulados pueden resultar rígidos y no transferirse adecuadamente a la práctica real de aula (Han et al., 2025), o una forma de dependencia tecnológica que sustituya, en lugar de complementar, el desarrollo de la autorregulación en contextos no mediados, en línea con la evidencia sobre cómo la delegación sostenida de procesos cognitivos y regulatorios en herramientas tecnológicas puede erosionar, en vez de fortalecer, las capacidades internas que se pretende desarrollar (Grinschgl & Neubauer, 2022). Este riesgo refuerza la necesidad de que la Fase 3 del ciclo metodológico (apartado 5.1, Paso 3) incluya siempre una instancia explícita de transferencia y contraste con la práctica profesional real, y de que los programas SEL-REA se inserten dentro de trayectorias formativas más amplias, como ESED-10 (Lozano Peña et al., 2024) o Aulas que Florecen (Sáez-Delgado et al., 2026a), y no se ofrezcan como intervenciones aisladas o autosuficientes.

Discusión y Conclusiones

Síntesis e Implicancias Teóricas

El constructo SEL-REA propuesto en este capítulo articula, por primera vez de forma explícita, cinco tradiciones que rara vez dialogan dentro de un mismo modelo aplicado a la formación docente: la cognición encarnada (Wilson, 2002), la neurociencia afectiva (Immordino-Yang & Damasio, 2007; Gallese, 2005), la teoría de la presencia y plausibilidad en realidad virtual (Slater, 2009), el Efecto Proteo (Yee & Bailenson, 2007; Ratan et al., 2020) y el marco del Aprendizaje Socioemocional (CASEL, 2020; Lozano-Peña et al., 2021). Esta integración no es meramente aditiva: sostenemos que la contribución teórica específica de SEL-REA reside en proponer que el avatar no es un vehículo neutro de contenidos SEL, sino un mediador activo cuyas propiedades cinéticas y de diseño determinan, en sí mismas, la calidad y profundidad del aprendizaje socioemocional que puede movilizarse. Esta tesis es consistente con, y extiende, la evidencia empírica preliminar de Sáez-Delgado et al. (2026b) sobre el impacto de mundos virtuales en competencias didácticas y socioemocionales docentes, así como la evidencia experimental reciente sobre cómo las propiedades de diseño del avatar modulan directamente los resultados de aprendizaje en entornos inmersivos (Xu et al., 2026) y la evidencia sistemática sobre cómo los elementos de diseño determinan la profundidad del compromiso empático y emocional en realidad virtual (Liu et al., 2026).

Implicancias Prácticas para la Formación Docente

Para programas de formación inicial docente, el modelo SEL-REA sugiere la conveniencia de incorporar módulos de práctica inmersiva antes o durante las prácticas profesionales en aulas reales, de modo que los incidentes críticos se ensayen por primera vez en un entorno de seguridad psicológica y no directamente frente a estudiantes reales (Mena et al., 2024; Lee et al., 2025). Para programas de formación continua, el modelo es compatible con esquemas de desarrollo profesional situado, en la línea de lo sugerido por Sáez-Delgado et al. (2025c) en su revisión sistemática sobre tecnologías digitales para la formación socioemocional docente, y puede articularse con instrumentos ya validados para evaluar el punto de partida y el progreso de las competencias socioemocionales del profesorado, como el SEMS-IT (Sáez-Delgado et al., 2024a), lo que permitiría documentar empíricamente el valor agregado de la experiencia SEL-REA frente a

formatos de formación convencionales. A nivel de política educativa, la evidencia sobre el rol de la calidad de las plataformas inmersivas (Sáez-Delgado et al., 2026f) y sobre la extensión de la Educación 4.0 en tiempos de inteligencia artificial (Arias et al., 2025) sugiere que la adopción de SEL-REA en sistemas educativos con recursos limitados requerirá decisiones deliberadas de inversión en infraestructura y en formación de facilitadores, y no solo en licencias de software (Cabero-Almenara et al., 2026). Esta dimensión de política institucional es coherente con evidencia sobre el impacto de estrategias de aprendizaje más servicio en el desarrollo socioemocional en educación superior (Sáez-Delgado et al., 2026c; Chiva-Bartoll et al., 2026), que sugiere que los programas SEL-REA podrían articularse con experiencias formativas situadas en contextos comunitarios reales, así como con revisiones sistemáticas sobre programas de aprendizaje socioemocional dirigidos a estudiantes (Sáez-Delgado et al., 2026d; Ha et al., 2025), que ofrecen un punto de comparación útil entre las lógicas de formación SEL del profesorado y las del estudiantado.

Limitaciones

Este capítulo presenta limitaciones que deben explicitarse con honestidad académica. En primer lugar, se trata de una propuesta conceptual: aunque cada uno de sus componentes se apoya en evidencia empírica independiente y verificable, el constructo integrado SEL-REA como tal aún no ha sido sometido a validación empírica propia mediante estudios controlados que midan sus efectos sobre la autorregulación docente en incidentes críticos reales. En segundo lugar, gran parte de la evidencia sobre presencia, Efecto Proteo y reducción de sesgo mediante embodiment proviene de estudios de laboratorio con poblaciones no necesariamente representativas del profesorado en ejercicio, lo que limita la generalización directa de sus magnitudes de efecto al contexto de formación docente. En tercer lugar, la implementación de entornos inmersivos de alta fidelidad, seguimiento corporal, baja latencia, plataformas certificadas bajo estándares ISO 25010 (Sáez-Delgado et al., 2026f), exige una inversión tecnológica considerable, lo que plantea interrogantes legítimas sobre la equidad de acceso a este tipo de formación en sistemas educativos de países de ingresos medios y bajos, particularmente en contextos rurales (Sáez-Delgado et al., 2024b; Chimbo et al., 2026). Finalmente, el modelo asume una separación relativamente clara entre entorno virtual seguro y aula real, cuando en la práctica la transferencia de aprendizajes socioemocionales entre ambos contextos es un proceso complejo, no lineal y todavía insuficientemente comprendido.

Líneas Futuras de Investigación

- Validación empírica del modelo: diseños experimentales o cuasiexperimentales que comparen la efectividad de programas SEL-REA frente a metodologías convencionales de formación socioemocional docente, utilizando instrumentos psicométricamente validados como el SEMS-IT (Sáez-Delgado et al., 2024a) como medida pre-post.

- Estudios longitudinales de transferencia: investigaciones que sigan a docentes formados con SEL-REA durante su ejercicio profesional posterior, para determinar si las competencias ensayadas en el entorno virtual se sostienen y transfieren a incidentes críticos reales en el mediano y largo plazo.

- Validación intercultural en contextos latinoamericanos: dado que la mayor parte de la evidencia sobre embodiment, presencia y Efecto Proteo proviene de contextos anglosajones (Higgins et al., 2024), se requiere investigación que examine si estos mecanismos operan de forma equivalente en docentes de contextos culturales latinoamericanos, con especial atención a variables de ruralidad, interculturalidad y vulnerabilidad social (Cabero-Almenara et al., 2026).

- Integración con inteligencia artificial generativa: profundizar en el diseño de arquetipos SEL-REA Estudiante Provocador/Simulado apoyados en IA conversacional, evaluando su fidelidad emocional frente a la operación humana, en diálogo con la literatura sobre concepciones docentes de la IA (Gómez et al., 2026) y sobre las tensiones entre IA generativa y profesorado (Chiappe et al., 2025).

- Estudio del Efecto Proteo aplicado a formación en equidad: investigar de forma específica si la encarnación deliberada de avatares con atributos identitarios distintos a los propios puede integrarse como estrategia formativa para reducir sesgos implícitos del profesorado (Banakou et al., 2016; Peck et al., 2013), en articulación con los hallazgos sobre género y formación docente (Baeza-Sepúlveda et al., 2026a, 2026b).

- Costo-efectividad y escalabilidad: estudios que evalúen la relación costo-beneficio de la implementación de SEL-REA en sistemas educativos públicos, considerando alternativas de menor costo tecnológico (por ejemplo, realidad virtual en escritorio

frente a dispositivos de inmersión total) sin comprometer la ilusión de presencia y plausibilidad necesarias (Slater, 2009).

El constructo SEL-Resonant Embodied Avatars (SEL-REA) constituye un avance conceptual significativo para la formación y el desarrollo profesional docente. Al integrar la cognición encarnada, la neurociencia afectiva, la teoría de la presencia en realidad virtual, el Efecto Proteo y el rigor del marco del Aprendizaje Socioemocional, el modelo SEL-REA transforma los entornos virtuales inmersivos en espacios seguros y de alta fidelidad para el ensayo de la autorregulación profesional. La articulación de criterios tecno-pedagógicos sólidos, sincronía multimodal, superación del valle inquietante, plataformas certificadas bajo estándares de calidad, junto con una metodología de debriefing metacognitivo rigurosa, fundamentada en la tradición del aprendizaje experiencial, ofrece un camino prometedor para cultivar aulas caracterizadas por la empatía, el bienestar integral y el ejercicio docente próspero (Correa-Gutiérrez et al., 2026).

No obstante, este potencial solo se realizará si el diseño, la implementación y la evaluación de los entornos SEL-REA se conducen con el mismo rigor ético que se exige de su rigor técnico y pedagógico: gobernanza transparente de datos biométrico-afectivos, prevención activa de sesgos de representación y anclaje permanente en la transferencia a la práctica profesional real. Un instrumento tecnológico que induce resonancia afectiva es, por definición, poderoso; y todo poder pedagógico de esa magnitud exige una responsabilidad proporcional. Queda para la comunidad investigadora iberoamericana, y para las líneas futuras aquí propuestas, la tarea de someter este constructo a la prueba de la evidencia empírica.

Agradecimientos

Agradecer al proyecto FONDECYT Regular Nro. 1261276 titulado: "Programa de intervención multinivel para el fortalecimiento del interés situacional y el aprendizaje autorregulado en aulas de educación superior". Al Research and Innovation Group in Socioemotional Learning, Well-being, and Mental Health to Foster Thriving (THRIVE4ALL) de la Facultad de Educación de la Universidad Católica de la Santísima Concepción.

Referencias Bibliográficas

Álvarez, J. E., Chiappe, A., Boude, O., & Sáez-Delgado, F. (2025). Cultivando mentes para la era digital: una revisión sistemática del pensamiento computacional y crítico. *Profesorado, Revista de Currículum y Formación del Profesorado* 29(2), 1–28. https://doi.org/10.30827/profesorado.v29i2.30889

Arias, J., Salas, J., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2025). The extended Education 4.0: Lifelong learning in times of artificial intelligence. *Applied Sciences* 15(17), 9352. https://doi.org/10.3390/app15179352

Baeza-Sepúlveda, C., Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Zañartu-Canihuante, N., & Brieba-Fuenzalida, J. (2026b). Formación docente, competencias socioemocionales y género: implicancias para el bienestar y desgaste profesional. *En Psicologia, comportamento humano e saúde mental 2* (pp. 1–16). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.547122611051

Baeza-Sepúlveda, C., Sáez-Delgado, F., Jara, P., Morales, L., & Lozano-Peña, G. (2026a). Bienestar docente y violencia escolar en Chile: desafíos socioemocionales desde una perspectiva de género. *En Psicologia, comportamento humano e saúde mental* (pp. 249–273). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.1721126130115

Banakou, D., Hanumanthu, P. D., & Slater, M. (2016). Virtual embodiment of white people in a Black virtual body leads to a sustained reduction in their implicit racial bias. *Frontiers in Human Neuroscience* 10, 601. https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00601

Barajas Motta, N., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2025). Bridging the gap: AI and teacher training for inclusive Education 4.0. *Journal of Research in Special Educational Needs* Advance online publication. https://doi.org/10.1111/1471-3802.70033

Bardach, L., Huang, Y., Richter, E., Klassen, R. M., Kleickmann, T., & Richter, D. (2023). Revisiting effects of teacher characteristics on physiological and psychological stress: A virtual reality study. *Scientific Reports* 13(1), 22224. https://doi.org/10.1038/s41598-023-49508-0

Bisquerra Alzina, R. (2005). La educación emocional en la formación del profesorado. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado* 19(3), 95–114.

Cabero-Almenara, J., Palacios-Rodríguez, A., Barroso-Osuna, J., & Siles-Rojas, C. (2026). Tecnologías inmersivas en la universidad: perfiles del profesorado y obstáculos para su integración. *RIED-Revista Iberoamericana de Educación a Distancia* 29(1), 161–184. https://doi.org/10.5944/ried.45535

CASEL (2020). CASEL's SEL framework: What are the core competence areas and where are they promoted? *Collaborative for Academic, Social, and Emotional Learning.*

Chen, X., & Lee, Y. (2025). Turn-taking modelling in conversational systems: A review of recent advances. *Technologies, 13*(12), 591. https://doi.org/10.3390/technologies13120591

Chiappe, A., San Miguel, C., & Sáez-Delgado, F. (2025). IA generativa versus profesores: reflexiones desde una revisión de la literatura. *Pixel-Bit. Revista de Medios y Educación* 72, 119–137. https://doi.org/10.12795/pixelbit.107046

Chimbo, B., Maguraushe, K., & Mutunhu Ndlovu, B. (2026). Immersive equity: Virtual reality and agentic artificial intelligence as catalysts for equity in education. *Frontiers in Education* 11, 1761456. https://doi.org/10.3389/feduc.2026.1761456

Chiva-Bartoll, O., Salvador-Garcia, C., Maravé-Vivas, M., & Gil-Gómez, J. (2026). Enhancing pre-service teachers' psychological well-being through service-learning in physical education. *Frontiers in Education, 11*, Artículo 1835443. https://doi.org/10.3389/feduc.2026.1835443

Collie, R., Sáez-Delgado, F., & Granziera, H. (2025). Teachers' perceived social-emotional competence as a vital mechanism of adult SEL. *Social and Emotional Learning: Research, Practice, and Policy* Advance online publication. https://doi.org/10.1016/j.sel.2025.100117

Contreras-Mejías, E., Cornejo-Urrea, A., Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., & Correa-Gutiérrez, P. (2026). Desafíos socioemocionales en el sistema escolar: un análisis de la inteligencia y la regulación emocional en la labor docente. *En Educação, formação*

humana e políticas educacionais 5 (pp. 1–23). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.925152623041

Correa-Gutiérrez, P., Sáez-Delgado, F., & Jara-Coatt, P. (2026). Hacia un ejercicio profesional próspero: el rol del aprendizaje socioemocional y el bienestar docente. *Editora Artemis.* https://doi.org/10.37572/EdArt_230326864

Devillers, L., & Cowie, R. (2023). Ethical considerations on affective computing: An overview. *Proceedings of the IEEE* 111(10), 1445–1458. https://doi.org/10.1109/JPROC.2023.3315217

Dieker, L. A., Hynes, M. C., Hughes, C. E., Hardin, S., & Becht, K. (2015). TLE TeachLivE™: Using technology to provide quality professional development in rural schools. *Rural Special Education Quarterly* 34(3), 11–16. https://doi.org/10.1177/875687051503400303

Edmondson, A. (1999). Psychological safety and learning behavior in work teams. *Administrative Science Quarterly* 44(2), 350–383. https://doi.org/10.2307/2666999

Escobar-Casallas, L., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2026). From learning-style neuromyths to AI-enabled personalisation for teacher preparation. *Improving Schools* Advance online publication. https://doi.org/10.1177/13654802261432037

Fanning, R. M., & Gaba, D. M. (2007). The role of debriefing in simulation-based learning. *Simulation in Healthcare* 2(2), 115–125. https://doi.org/10.1097/SIH.0b013e3180315539

Fernández-Berrocal, P., & Extremera, N. (2005). La inteligencia emocional y la educación de las emociones desde el modelo de Mayer y Salovey. *Revista Interuniversitaria de Formación del Profesorado* 19(3), 63–93.

Fiedler, M. L., Wolf, E., Dollinger, N., Mal, D., Botsch, M., Latoschik, M. E., & Wienrich, C. (2024). From Avatars to Agents: Self-Related Cues Through Embodiment and Personalization Affect Body Perception in Virtual Reality. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, *30*(11), 7386–7396. https://doi.org/10.1109/TVCG.2024.3456211

Gallese, V. (2005). Embodied simulation: From neurons to phenomenal experience. *Phenomenology and the Cognitive Sciences* 4(1), 23–48.

Gómez, J. R., Árias Delgado, L., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2026). Teachers' conceptions of AI for inclusive mathematics learning: A conceptual analysis. *Frontiers in Education* 11, 1778339. https://doi.org/10.3389/feduc.2026.1778339

Grinschgl, S., & Neubauer, A. C. (2022). Supporting cognition with modern technology: Distributed cognition today and in an AI-enhanced future. *Frontiers in Artificial Intelligence*, *5*, Artículo 908261. https://doi.org/10.3389/frai.2022.908261

Ha, C., McCarthy, M. F., Strambler, M. J., & Cipriano, C. (2025). Disentangling the effects of social and emotional learning programs on student academic achievement across grades 1–12: A systematic review and meta-analysis. *Review of Educational Research*. https://doi.org/10.3102/00346543251367769

Han, X., Luo, H., Wang, Z., & Zhang, D. (2025). Using virtual reality for teacher education: A systematic review and meta-analysis of literature from 2014 to 2024. *Frontiers in Virtual Reality*, *6*, Artículo 1620905. https://doi.org/10.3389/frvir.2025.1620905

Higgins, S., Alcock, S., De Aveiro, B., Daniels, W., Farmer, H., & Besharati, S. (2024). Perspective matters: A systematic review of immersive virtual reality to reduce racial prejudice. *Virtual Reality* 28, Artículo 124. https://doi.org/10.1007/s10055-024-01024-w

Immordino-Yang, M. H., & Damasio, A. (2007). We feel, therefore we learn: The relevance of affective and social neuroscience to education. *Mind, Brain, and Education* 1(1), 3–10. https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2007.00004.x

Jara-Coatt, P., Constenla-Nuñez, J., & Sáez-Delgado, F. (2025a). Modelos de competencia socioemocional docente para la innovación educativa. *Revista Espacios* 46(3), Artículo 21. https://doi.org/10.48082/espacios-a25v46n03p21

Jara-Coatt, P., Sáez-Delgado, F., Constenla-Núñez, J., & Mella-Norambuena, J. (2026a). Competencias socioemocionales y resiliencia del profesorado de educación primaria.

Revista Española de Pedagogía 84(293), 151–170. https://doi.org/10.9781/rep.2026.848

Jara-Coatt, P., Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., Zañartu, N., & Hinojosa, V. (2025b). Well-being of public school teachers in Chile: The role of resilience and positive relationships. *Revista de Investigación en Educación* 23(2), 373–391. https://revistas.uvigo.es/index.php/reined/article/view/6343

Jara-Coatt, P., Villa, D., Sáez-Delgado, F., Correa-Gutiérrez, P., & Rodríguez, R. (2026b). Rol docente como mediador en la resolución de conflictos en el aula de educación primaria. *En Sociedade, Diversidade e Políticas de Inclusão Social* (pp. 116–140). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.642112610028

Jennings, P. A., & Greenberg, M. T. (2009). The prosocial classroom: Teacher social and emotional competence in relation to student and classroom outcomes. *Review of Educational Research* 79(1), 491–525. https://doi.org/10.3102/0034654308325693

Kabilan, M. K., Karim, A., Sultana, S., & Rahman, M. M. (2025). Preservice teachers' reflecting on reflections of critical incidents: Effects on professional development and identity construction. *Journal of Teacher Education*, *76*(4), 379–393. https://doi.org/10.1177/00224871241286088

Kilteni, K., Groten, R., & Slater, M. (2012). The sense of embodiment in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 21(4), 373–387.

Kolb, D. A. (1984). Experiential learning: Experience as the source of learning and development. *Prentice-Hall*.

Kumarapeli, D., Jung, S., & Lindeman, R. W. (2024). Privacy threats of behaviour identity detection in VR. *Frontiers in Virtual Reality*, *5*, Artículo 1197547. https://doi.org/10.3389/frvir.2024.1197547

Lee, Q., Devi, A., & Cutri, J. (2025). Harnessing the power of virtual reality experiences as social situation of development to enrich the professional experiences of early childhood pre-service teachers. *Education Sciences* 15(5), 635. https://doi.org/10.3390/educsci15050635

Liu, W., Kamsin, A., & Hussin, H. (2026). Visual design for empathy in virtual reality: A systematic review of emotional engagement (2018–2023). *Applied Intelligence*, *56*(3), Artículo 87. https://doi.org/10.1007/s10489-025-06970-9

López-Angulo, Y., Mella-Norambuena, J., Sáez-Delgado, F., Portillo, S., & Reynoso, O. (2022). Association between teachers' resilience and emotional intelligence during the COVID-19 outbreak. *Revista Latinoamericana de Psicología* 54, 51–59. https://doi.org/10.14349/rlp.2022.v54.6

Lozano Peña, G., Sáez-Delgado, F., Bernardo, A., & López-Angulo, Y. (2024). Programa de entrenamiento en autorregulación emocional y habilidades sociales para docentes ESED-10. *RIL editores.*

Lozano-Peña, G. M., Sáez-Delgado, F., & López-Angulo, Y. (2022). Competencias socioemocionales en docentes de primaria y secundaria: una revisión sistemática. *Páginas de Educación* 15(1), 1–22. https://doi.org/10.22235/pe.v15i1.2598

Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., & Mella-Norambuena, J. (2021). Teachers' social–emotional competence: History, concept, models, instruments, and recommendations for educational quality. *Sustainability* 13(21), 12142. https://doi.org/10.3390/su132112142

Lozano-Peña, G., Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., Mella-Norambuena, J., Contreras-Saavedra, C., & Ramos-Huenteo, V. (2023). Programas de intervención docente en competencias socioemocionales: una revisión sistemática de la literatura. *Aula de Encuentro* 25(2), 215–241. https://doi.org/10.17561/ae.v25n2.7391

Llanes-Jurado, J., Gómez-Zaragozá, L., Minissi, M. E., Alcañiz, M., & Marín-Morales, J. (2024). Developing conversational virtual humans for social emotion elicitation based on large language models. *Expert Systems with Applications*, *246*, 123261. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123261

Mantello, P., & Ho, M.-T. (2024). Emotional AI and the future of wellbeing in the post-pandemic workplace. *AI & Society*, *39*, 1883–1889. https://doi.org/10.1007/s00146-023-01639-8

Martínez-Pérez, S., Cabero-Almenara, J., Barroso-Osuna, J., & Palacios-Rodríguez, A. (2019). Competencia digital de futuros docentes para efectuar un proceso de enseñanza y aprendizaje mediante realidad virtual. *Edutec. Revista Electrónica de Tecnología Educativa* (67), 1–15. https://doi.org/10.21556/edutec.2019.67.1327

McStay, A. (2018). Emotional AI: The rise of empathic media. *Sage.*

McStay, A. (2020). Emotional AI, soft biometrics and the surveillance of emotional life: An unusual consensus on privacy. *Big Data & Society* 7(1). https://doi.org/10.1177/2053951720904386

Mena, J., Flores, M. A., Fernandes, E., & Estrada-Molina, O. (2024). Critical incidents as a strategy to enhance student teachers' reflection about practice through immersive learning. *Reflective Practice* 25(3), 406–425. https://doi.org/10.1080/14623943.2024.2321500

Meyer, F., & Smith, J. (2025). The potential of virtual reality to combat teacher bias and increase empathy. *Improving Schools*. Advance online publication. https://doi.org/10.1177/14782103251370401

Mohammad, S. M. (2022). Ethics sheet for automatic emotion recognition and sentiment analysis. *Computational Linguistics*, *48*(2), 239–278. https://doi.org/10.1162/coli_a_00433

Morales-Maure, L., Chacón-Rivadeneira, K., Garcia-Marimón, O., Sáez-Delgado, F., & Campos-Nava, M. (2025). Enhancing mathematics teacher training in higher education: The role of lesson study and didactic suitability criteria in pedagogical innovation. *Trends in Higher Education* 4(3), Artículo 39, 1–18. https://doi.org/10.3390/higheredu4030039

Mori, M. (2012). The uncanny valley [From the field] (K. F. MacDorman & N. Kageki, Trans.). *IEEE Robotics & Automation Magazine* 19(2), 98–100. https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811

Ojeda-Rodríguez, B., Vergara-Manquilepe, E., Zapata-Bueno, Q., Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Páez-Bustamante, Y., & Cid-Aguayo, M. (2026). La carga emocional de la docencia: revisión teórica de la relación entre profesorado y apoderados. *En*

Ciências Humanas e os processos de mudança social (pp. 124–154). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.301112612017

Peck, T. C., Seinfeld, S., Aglioti, S. M., & Slater, M. (2013). Putting yourself in the skin of a black avatar reduces implicit racial bias. *Consciousness and Cognition* 22(3), 779–787. https://doi.org/10.1016/j.concog.2013.04.016

Peña-Acuña, B., & Rubio-Alcalá, F. D. (2024). Ethical approach to the use of immersive technologies. Advance about digitalisation of multilingual programs in the EHEA. *Frontiers in Virtual Reality* 5, 1357595. https://doi.org/10.3389/frvir.2024.1357595

Picard, R. W. (1997). Affective computing. *MIT Press.*

Quevedo Piratova, D. A., Sánchez Duarte, M., Chiappe, A., & Sáez-Delgado, F. (2025). Intelligent classrooms: How AI and IoT can reshape learning spaces. *European Journal of Education* 60(1), e70000. https://doi.org/10.1111/ejed.70000

Ratan, R., Beyea, D., Li, B. J., & Graciano, L. (2020). Avatar characteristics induce users' behavioral conformity with small-to-medium effect sizes: A meta-analysis of the Proteus effect. *Media Psychology* 23(5), 651–675. https://doi.org/10.1080/15213269.2019.1623698

Riachi, P., Kamber, S., Brogna, S., Gloster, A., & Wampfler, R. (2026). Toward accessible psychotherapy training using AI-driven interactive patient avatars. *arXiv preprint*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2606.17786

Rudolph, J. W., Raemer, D. B., & Simon, R. (2014). Establishing a safe container for learning in simulation: The role of the presimulation briefing. *Simulation in Healthcare* 9(6), 339–349. https://doi.org/10.1097/SIH.0000000000000047

Rudolph, J. W., Simon, R., Rivard, P., Dufresne, R. L., & Raemer, D. B. (2007). Debriefing with good judgment: Combining rigorous feedback with genuine inquiry. *Anesthesiology Clinics* 25(2), 361–376. https://doi.org/10.1016/j.anclin.2007.03.007

Sáez-Delgado, F., Araya, R., Cuevas, T., Fuentes, R., Pinela, B., Solar, N., Mella-Norambuena, J., & Contreras, C. (2025b). Conciencia emocional y bienestar

profesional en el profesorado chileno. *Revista Espacios* 46(5), 161–173. https://doi.org/10.48082/espacios-a25v46n05p15

Sáez-Delgado, F., Coronado-Sánchez, P., Mella-Norambuena, J., López-Angulo, Y., Brieba-Fuenzalida, J., Contreras-Saavedra, C., & Lozano-Peña, G. (2025c). Use of digital technologies to support socioemotional teacher training: A systematic review. *Education Sciences* 15(10), 1377. https://doi.org/10.3390/educsci15101377

Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Contreras-Manríquez, F., Brieba-Fuenzalida, J., & Rodríguez-Gómez, R. (2026d). Programas de aprendizaje socioemocional para estudiantes: una revisión sistemática. *En Educação, formação humana e políticas educacionais 6* (pp. 75–96). Editora Atena. https://doi.org/10.22533/at.ed.356162619055

Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Correa-Gutiérrez, P., & Morales-Maure, L. (2026c). Impacto del aprendizaje + servicio en el desarrollo socioemocional en educación superior. *En Aprendizaje y servicio en la formación universitaria: Experiencias, investigación e innovación pedagógica en Chile* (pp. 94–107). Editora Artemis. https://doi.org/10.37572/EdArt_1704269568

Sáez-Delgado, F., Jara-Coatt, P., Correa-Gutiérrez, P., Lozano-Peña, G., & Morales-Maure, L. (2026a). Aulas que florecen: Manual técnico-práctico de competencias socioemocionales para el profesorado en la escuela. *Editorial Hambatu Sapiens.* https://doi.org/10.63862/ehs-978-9907-805-27-7

Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., & Mella-Norambuena, J. (2024a). Psychometric properties of the SocioEmotional Skills Instrument for Teachers (SEMS-IT) using network approach: English and Spanish version. *Frontiers in Psychology* 15, 1421164. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1421164

Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., Mella-Norambuena, J., Coronado, P., Chiappe, A., & Jara-Coatt, P. (2026e). Revisiones de la literatura con y sin apoyo de inteligencia artificial: lineamientos, fases y recursos. *Editora Artemis.* https://doi.org/10.37572/EdArt_170426963

Sáez-Delgado, F., López-Angulo, Y., Mella-Norambuena, J., Hartley, K., & Sepúlveda, F. (2023). Mental health in school teachers: An explanatory model with emotional

intelligence and coping strategies. *Electronic Journal of Research in Education Psychology* 21(61), 559–586. https://doi.org/10.25115/ejrep.v21i61.8322

Sáez-Delgado, F., Medina, N., Mella-Norambuena, J., & Contreras, C. (2024b). Regulación emocional y autorregulación académica en docentes de escuelas rurales durante la transición pospandemia. *Revista Andina de Educación* 8(1), 1–9. https://doi.org/10.32719/26312816.2024.8.1.8

Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., Coronado, P., López-Angulo, Y., Ramírez, G., Badilla-Quintana, M., & Chiappe, A. (2026f). Virtual world platforms: A comparative analysis of quality according to ISO 25010 standards and maturity models. *Virtual Worlds* 5(1), 1–30. https://doi.org/10.3390/virtualworlds5010002

Sáez-Delgado, F., Morales-Maure, L., García-Marimón, O., & Gutiérrez-González, J. (2026b). Impacto de un programa formativo basado en reflexión autocrítica y mundos virtuales sobre competencias didácticas y socioemocionales en docentes de matemática. *Formación Universitaria* 19(2). https://doi.org/10.4067/s0718-50062026000200127

Sáez-Delgado, F., Venegas, M., Mella-Norambuena, J., Valenzuela, A., & Portillo, S. (2025a). Competencias socioemocionales del profesorado de educación diferencial, lenguaje y matemáticas. *Revista Espacios* 46(4), 247–268. https://doi.org/10.48082/espacios-a25v46n04p24

Sandoval-Henríquez, F., Sáez-Delgado, F., & Badilla-Quintana, M. G. (2025). Metaanálisis sobre el efecto de la integración de tecnologías inmersivas en el aprendizaje en educación primaria. *Cuadernos de Investigación Educativa* 16(2). https://doi.org/10.18861/cied.2025.16.2.4052

Savina, E., Fulton, C., & Beaton, C. (2025). Teacher emotional competence: A conceptual model. *Educational Psychology Review*, *37*(2), Artículo 40. https://doi.org/10.1007/s10648-025-10018-2

Schlagowski, R., Volanti, M., Weitz, K., Mertes, S., Kuch, J., & André, E. (2024). The feeling of being classified: raising empathy and awareness for AI bias through perspective-taking in VR. *Frontiers in Virtual Reality*, *5*, Artículo 1340250. https://doi.org/10.3389/frvir.2024.1340250

Schön, D. A. (1983). The reflective practitioner: How professionals think in action. *Basic Books.*

Slater, M. (2009). Place illusion and plausibility can lead to realistic behaviour in immersive virtual environments. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 364(1535), 3549–3557. https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0138

Slater, M., & Sanchez-Vives, M. V. (2016). Enhancing our lives with immersive virtual reality. *Frontiers in Robotics and AI* 3, 74. https://doi.org/10.3389/frobt.2016.00074

Stern, D. N. (2010). Forms of vitality: Exploring dynamic experience in psychology, the arts, psychotherapy, and development. *Oxford University Press.*

Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review* 9(4), 625–636. https://doi.org/10.3758/BF03196322

Yee, N., & Bailenson, J. (2007). The Proteus effect: The effect of transformed social interaction on behavior. *Human Communication Research* 33(3), 271–290.

Xu, C., Niu, G., & Sun, X. (2026). Using LLM-empowered virtual avatars in immersive virtual reality technology to enhance psychological perception and learning outcomes: The role of interaction methods, anthropomorphism types, and VR perspectives. *International Journal of Educational Technology in Higher Education*, *23*(1), Artículo 17. https://doi.org/10.1186/s41239-026-00594-w

Zhu, Q.X. (2026) A Systematic Review of Multimodal AI Agents and Embodied Avatars in University EFL Speaking Support. *Open Journal of Social Sciences*, 14, 268-284. https://doi.org/10.4236/jss.2026.143016

Capítulo IV

¿Una tecnología fuera de su tiempo? El mecanismo de Anticitera y los límites del conocimiento sobre la ciencia helenística

A Technology Ahead of Its Time? The Antikythera Mechanism and the Limits of Our Knowledge of Hellenistic Science

Humberto Álvarez Sepúlveda
Universidad Católica de la Santísima Concepción
halvarez@ucsc.cl
https://orcid.org/0000-0001-5729-3404
Chile

Resumen

Este capítulo examina críticamente la controversia acerca de si el mecanismo de Anticitera constituyó una anomalía tecnológica excepcional o la manifestación superviviente de una tradición científica y mecánica más desarrollada de lo que permite reconstruir el registro arqueológico. El análisis se organiza en tres ejes: la excepcional complejidad astronómica y mecánica del dispositivo; los antecedentes científicos y tecnológicos que permiten situarlo dentro de la tradición helenística; y las razones arqueológicas e históricas que podrían explicar la ausencia de artefactos comparables. Metodológicamente, se sustenta en una revisión de alcance de literatura especializada, desarrollada desde un enfoque cualitativo-interpretativo y mediante un diseño narrativo de tópico. Se sostiene que, aunque Anticitera constituye un objeto excepcional dentro del registro material conservado, su diseño difícilmente puede explicarse como una invención aislada, pues presupone conocimientos astronómicos, matemáticos, metalúrgicos y mecánicos acumulados durante generaciones. Se concluye que el mecanismo obliga a reconsiderar los límites atribuidos tradicionalmente al desarrollo científico y tecnológico del mundo antiguo.

Palabras clave: Mecanismo de Anticitera; Tecnología helenística; Astronomía antigua; Ingeniería antigua; Historia de la ciencia.

Abstract

This chapter critically examines the controversy over whether the Antikythera mechanism was an exceptional technological anomaly or the surviving manifestation of a scientific and mechanical tradition more advanced than the archaeological record allows us to reconstruct. The analysis is organized around three key themes: the device's exceptional astronomical and mechanical complexity; the scientific and technological antecedents that place it within the Hellenistic tradition; and the archaeological and historical reasons that might explain the absence of comparable artifacts. Methodologically, the study is grounded in a scoping review of specialized literature, employing a qualitative-interpretative approach and a narrative-topical design. It is argued that, although the Antikythera mechanism is an exceptional object within the extant material record, its design can hardly be explained as an isolated invention, as it presupposes astronomical, mathematical, metallurgical, and mechanical knowledge accumulated over generations. The chapter concludes that the mechanism compels a reconsideration of the limits traditionally ascribed to scientific and technological development in the ancient world.

Keywords: Antikythera mechanism; Hellenistic technology; Ancient astronomy; Ancient engineering; History of science.

Introducción

La imagen tradicional de la tecnología antigua ha estado históricamente condicionada por una concepción relativamente lineal del progreso científico. Desde esta perspectiva, la precisión mecánica, los sistemas complejos de engranajes y los dispositivos capaces de representar matemáticamente fenómenos astronómicos suelen asociarse con etapas históricas considerablemente posteriores a la Antigüedad clásica. Sin embargo, el descubrimiento del mecanismo de Anticitera a comienzos del siglo XX alteró profundamente esta interpretación. Recuperado de un naufragio frente a la isla griega de Anticitera y construido probablemente durante los últimos siglos del período helenístico, el artefacto contenía un extraordinario sistema de engranajes de bronce destinado a representar y calcular diversos ciclos astronómicos (Price, 1974; Freeth et al., 2006; Palazón, 2014; Ramírez et al., 2026). Los estudios mediante técnicas avanzadas de obtención de imágenes han confirmado que se trataba de una máquina cuya complejidad tecnológica no encuentra equivalentes conservados durante los quince siglos posteriores.

Esta singularidad ha convertido al mecanismo en uno de los objetos más desconcertantes para la historia de la tecnología. La investigación reciente ha identificado aproximadamente treinta engranajes supervivientes, además de escalas, indicadores e inscripciones relacionadas con fenómenos astronómicos y calendáricos. El dispositivo permitía representar ciclos solares y lunares, predecir eclipses y articular diferentes periodicidades astronómicas mediante relaciones matemáticas incorporadas físicamente en sus engranajes (Freeth et al., 2006; Freeth et al., 2008). Reconstrucciones más recientes han planteado incluso que su cara frontal habría representado los movimientos de los cuerpos celestes conocidos por la astronomía griega, convirtiendo al instrumento en una materialización mecánica extraordinariamente sofisticada del cosmos helenístico (Freeth et al., 2021).

El problema histórico surge precisamente de la distancia existente entre la sofisticación del objeto y el registro tecnológico conservado. Si se considera exclusivamente la evidencia arqueológica actualmente disponible, Anticitera parece casi una anomalía: no se han recuperado otros mecanismos de engranajes contemporáneos con un nivel semejante de complejidad. Esta ausencia ha favorecido la difundida imagen del artefacto como una tecnología extraordinariamente adelantada a su tiempo. A pesar de ello, esta interpretación contiene un problema metodológico. La inexistencia de objetos

supervivientes no demuestra necesariamente la ausencia de una tradición tecnológica. Los metales empleados en máquinas antiguas podían ser fundidos y reutilizados, mientras que guerras, naufragios, transformaciones económicas y el deterioro material redujeron radicalmente las probabilidades de conservación de instrumentos científicos complejos (Jones, 2017). Por ello, el carácter excepcional del hallazgo puede reflejar tanto la singularidad original del dispositivo como las limitaciones del registro arqueológico.

Además, el mecanismo no apareció en un vacío intelectual. La ciencia helenística había desarrollado durante tres siglos una serie de conocimientos matemáticos, astronómicos y mecánicos extraordinariamente sofisticados. Las tradiciones asociadas con Arquímedes, Hiparco, Apolonio y otros científicos muestran la existencia de ambientes intelectuales capaces de combinar geometría, astronomía observacional y construcción de instrumentos. Las fuentes literarias antiguas proporcionan también referencias a esferas y dispositivos mecánicos destinados a representar movimientos celestes. Resultan de especial interés los testimonios de Cicerón sobre mecanismos atribuidos a Arquímedes y Posidonio que reproducían mecánicamente los movimientos del Sol, la Luna y los planetas (Jones, 2017). Si bien tales referencias no demuestran que dichos instrumentos utilizaran exactamente la arquitectura de engranajes presente en Anticitera, cuestionan la interpretación del artefacto como una invención absolutamente aislada.

En este contexto, el presente ensayo busca responder a la siguiente interrogante: ¿Fue el mecanismo de Anticitera una anomalía tecnológica excepcional dentro del mundo antiguo o constituye la evidencia superviviente de una tradición científica y mecánica mucho más avanzada de lo que permite suponer el registro arqueológico? Para abordar esta pregunta, la discusión se organiza en tres ejes complementarios. En primer lugar, se analiza la complejidad mecánica y astronómica del dispositivo y las razones que justifican su aparente carácter anómalo. En segundo término, se examinan los antecedentes intelectuales y tecnológicos de la ciencia helenística que permiten comprender su construcción dentro de una tradición acumulativa. Finalmente, se analiza el problema de la supervivencia desigual de la evidencia material y se plantea que la excepcionalidad arqueológica de Anticitera no necesariamente equivale a excepcionalidad histórica.

Metodología

Este estudio se sustenta en una revisión de alcance de literatura especializada, siguiendo los lineamientos generales propuestos por Arksey y O'Malley (2005), orientada a identificar y analizar las principales interpretaciones arqueológicas, históricas y tecnológicas formuladas respecto del mecanismo de Anticitera. Esta modalidad resulta especialmente pertinente debido al carácter interdisciplinario del problema, pues su comprensión requiere articular investigaciones provenientes de la historia de la ciencia, arqueología, astronomía antigua, ingeniería mecánica, epigrafía e historia de la tecnología. Por tanto, en lugar de limitarse a reconstruir técnicamente el funcionamiento del artefacto, la revisión busca problematizar las implicancias historiográficas derivadas de su extraordinaria complejidad.

La búsqueda bibliográfica consideró investigaciones especializadas y obras de referencia relacionadas con el mecanismo y con el desarrollo científico del período helenístico. Se priorizaron trabajos académicos disponibles en bases de datos y publicaciones internacionales, incluyendo los estudios fundamentales de Derek de Solla Price y las investigaciones desarrolladas durante las últimas décadas mediante tomografía computarizada y técnicas de procesamiento de imágenes. Entre los descriptores considerados se encuentran Antikythera mechanism, ancient Greek technology, Hellenistic science, ancient astronomy, Greek mechanical engineering, geared mechanisms, Archimedes, Hipparchus y astronomical instruments. En esta línea, recibieron particular atención los estudios de Freeth et al. (2006), Freeth et al. (2008), Wright (2006), Jones (2017) y Freeth et al. (2021).

La investigación adopta un enfoque cualitativo de carácter interpretativo y un diseño narrativo de tópico. Por consiguiente, no pretende realizar una reconstrucción experimental definitiva de cada componente del mecanismo ni resolver las controversias todavía existentes acerca de determinadas partes desaparecidas. Al respecto, cabe destacar que solo aproximadamente un tercio del artefacto original se conserva y numerosas características de su cara frontal continúan dependiendo parcialmente de reconstrucciones fundamentadas en engranajes, inscripciones y relaciones astronómicas (Freeth et al., 2021). Por esta razón, las hipótesis reconstructivas son consideradas como propuestas científicamente fundamentadas, pero no se presentan como certezas arqueológicas absolutas.

Por último, la revisión adopta como criterio interpretativo la necesidad de evitar dos posiciones extremas. La primera consiste en considerar el mecanismo como una especie de tecnología inexplicable, desconectada de los conocimientos científicos de su época. La segunda supone proyectar a partir de un único artefacto la existencia de una revolución mecánica generalizada para la cual tampoco existe evidencia suficiente. Entre ambas posiciones, el ensayo plantea una interpretación intermedia: Anticitera fue probablemente un producto extraordinario y posiblemente costoso dentro de una tradición especializada, pero su sofisticación presupone procesos acumulativos de experimentación, transmisión artesanal y desarrollo científico. Este principio permite reconsiderar tanto las capacidades de la tecnología helenística como los límites de las evidencias utilizadas para reconstruirla.

Una máquina extraordinaria: La aparente anomalía tecnológica de Anticitera

El principal argumento para interpretar el mecanismo de Anticitera como una anomalía radica en su extraordinaria complejidad respecto de los artefactos contemporáneos conservados. Las investigaciones recientes de Freeth et al. (2006), Freeth et al. (2008) y Freeth et al. (2021) han identificado treinta engranajes supervivientes, aunque el sistema original debió contener más componentes. El dispositivo articulaba ruedas dentadas de distintos tamaños y relaciones numéricas capaces de transformar el movimiento producido manualmente en indicaciones astronómicas coordinadas. Esta arquitectura resulta especialmente notable porque no se limitaba a transmitir movimiento: incorporaba relaciones matemáticas correspondientes a ciclos celestes. En este sentido, la máquina puede interpretarse como una forma temprana de computación analógica, en la cual determinadas relaciones numéricas eran materializadas mediante proporciones entre engranajes.

Una de sus características más sorprendentes corresponde a la representación de los movimientos lunares. El desplazamiento aparente de la Luna no es uniforme y los astrónomos antiguos conocían esta irregularidad. El mecanismo incorporaba una solución mecánica que permitía aproximar dicha variación mediante engranajes epicíclicos y un sistema de pasador y ranura (Freeth et al., 2006). La importancia histórica de esta característica resulta difícil de exagerar: el constructor no se limitó a fabricar un calendario, sino que convirtió una teoría astronómica sobre un movimiento celeste irregular en comportamiento mecánico. La máquina constituía así una interfaz entre

conocimiento abstracto y tecnología material, transformando relaciones geométricas y astronómicas en movimientos visibles de indicadores.

El sistema posterior era igualmente sofisticado. Una de sus escalas representaba el ciclo metónico de aproximadamente diecinueve años, fundamental para relacionar los calendarios solar y lunar, mientras otra incorporaba el ciclo de Saros, utilizado para anticipar recurrencias de eclipses (Freeth et al., 2006; Freeth et al., 2008). Este principio implicaba que el usuario podía manipular físicamente el dispositivo y obtener información sobre configuraciones astronómicas correspondientes a fechas diferentes. La máquina no observaba el cielo directamente; modelaba matemáticamente ciclos celestes conocidos. Esta capacidad distingue a Anticitera de instrumentos como relojes solares o astrolabios simples, ya que convertía regularidades astronómicas previamente calculadas en un sistema mecánico integrado.

Las reconstrucciones actuales han ampliado todavía más esta interpretación. Freeth et al. (2021), basándose en las inscripciones supervivientes, los números asociados a determinados ciclos y la arquitectura física de los fragmentos, propusieron una reconstrucción del frente que habría mostrado el orden cosmológico del mundo antiguo mediante indicadores correspondientes al Sol, la Luna y los planetas conocidos. Los autores interpretan el instrumento como un calculador de astronomía matemática que combinaba tradiciones astronómicas babilónicas con modelos geométricos griegos. Aunque algunos detalles continúan siendo discutidos, esta propuesta revela la enorme densidad de conocimientos necesarios para concebir el dispositivo: observaciones acumuladas, ciclos numéricos, modelos geométricos, técnicas metalúrgicas y capacidad de fabricar y ensamblar engranajes.

Desde esta mirada, resulta comprensible que Anticitera haya sido caracterizado como una tecnología extraordinariamente adelantada respecto de los objetos conservados de la Antigüedad. Price (1974) ya había destacado la enorme distancia existente entre el mecanismo y la tradición mecánica posteriormente documentada. Sin embargo, precisamente esta complejidad genera una paradoja: cuanto más sofisticado se demuestra el artefacto, menos plausible resulta considerarlo una invención surgida espontáneamente. Fabricar decenas de engranajes coordinados, calcular sus relaciones, distribuirlos dentro de un espacio limitado e integrar el sistema con indicadores e inscripciones exige conocimientos previos. Por tanto, aquello que inicialmente parece

demostrar el carácter excepcional de Anticitera puede convertirse, paradójicamente, en uno de los principales argumentos para sospechar la existencia de una tradición tecnológica precedente.

De Arquímedes a Hiparco: Las huellas de una tradición científica y mecánica

El mecanismo resulta considerablemente menos inexplicable cuando se sitúa dentro del contexto intelectual de la ciencia helenística. Entre los siglos III y I a. C., el Mediterráneo oriental albergó importantes centros científicos donde astronomía, geometría, matemática y mecánica experimentaron un notable desarrollo. Alejandría constituye el ejemplo más conocido, aunque Rodas, Siracusa y otras ciudades participaron igualmente de estas redes intelectuales. Autores como Arquímedes desarrollaron conocimientos sobre equilibrio, hidrostática y máquinas; Apolonio estudió las secciones cónicas y elaboró herramientas geométricas posteriormente fundamentales para la astronomía; e Hiparco produjo modelos matemáticos extraordinariamente sofisticados para explicar los movimientos celestes. Anticitera debe comprenderse dentro de este ambiente y no como un objeto intelectualmente separado de él (Moussas, 2011; Jones, 2017).

Particularmente relevante resulta la tradición atribuida a Arquímedes. Las fuentes antiguas mencionan la construcción de instrumentos capaces de representar mecánicamente movimientos celestes. Cicerón, escribiendo durante el siglo I a. C., describió una esfera atribuida a Arquímedes que reproducía los movimientos del Sol, la Luna y los planetas. También hizo referencia a un dispositivo construido por Posidonio que representaba movimientos astronómicos (Cicero, De re publica, 1.14; De natura deorum, 2.88, como se analiza en Jones, 2017). Tales testimonios deben manejarse con prudencia porque no proporcionan planos mecánicos ni permiten demostrar que esos instrumentos emplearan sistemas idénticos a Anticitera. No obstante, poseen enorme importancia historiográfica: muestran que la idea de construir modelos mecánicos del cosmos era conocida en la cultura científica antigua.

La astronomía de Hiparco de Nicea, activo durante el siglo II a. C., ofrece otro antecedente significativo. Sus investigaciones sobre los movimientos solares y lunares, su utilización de modelos geométricos y su conocimiento de irregularidades orbitales pertenecen precisamente al tipo de astronomía matematizada que subyace al funcionamiento del mecanismo (Jones, 2017). No existe evidencia que permita identificar

de manera concluyente a Hiparco como diseñador de Anticitera, pero la correspondencia cronológica e intelectual demuestra que los conocimientos necesarios para concebir determinados componentes astronómicos estaban disponibles. La cuestión fundamental, por consiguiente, no consiste en atribuir la máquina a un científico famoso, sino en reconocer que su diseño refleja un ecosistema intelectual acumulativo.

Otro indicio importante procede de la integración de tradiciones científicas diferentes. La astronomía helenística no se desarrolló exclusivamente a partir de conocimientos griegos. Los registros babilónicos habían acumulado durante siglos observaciones y ciclos astronómicos extremadamente precisos. La ciencia griega incorporó parte de esta tradición numérica y la articuló progresivamente con modelos geométricos destinados a explicar los movimientos celestes. El mecanismo constituye una materialización especialmente notable de este proceso de transferencia cultural: algunas de sus periodicidades astronómicas poseen raíces mesopotámicas, mientras que la representación mecánica parece responder a la tradición geométrica griega (Freeth et al., 2021). En consecuencia, Anticitera representa no solo innovación tecnológica, sino también circulación y acumulación histórica de conocimientos.

Estos antecedentes debilitan considerablemente la tesis de una anomalía entendida como creación completamente aislada. Un dispositivo de semejante complejidad probablemente requirió prototipos, errores, modificaciones y conocimientos artesanales transmitidos entre especialistas. El ejemplar recuperado del naufragio podría haber sido una pieza excepcional dentro de esa tradición —del mismo modo que determinados instrumentos científicos modernos son productos únicos y costosos— sin constituir por ello una invención sin antecedentes. En este sentido, resulta más adecuado diferenciar entre rareza social y aislamiento tecnológico. Anticitera pudo ser un instrumento escaso, reservado a élites científicas o patrocinadores adinerados, pero construido mediante conocimientos pertenecientes a una tradición más extensa. La ausencia de sus predecesores constituye un problema arqueológico, no una demostración de que nunca existieron.

El silencio arqueológico: ¿Puede un único superviviente representar una tecnología perdida?

La principal dificultad para defender la existencia de una tradición tecnológica reside en un hecho indiscutible: hasta ahora no se conserva otro mecanismo antiguo comparable a Anticitera. Esta circunstancia obliga a mantener cautela. A partir de un solo ejemplar no resulta posible determinar cuántos instrumentos similares existieron, dónde fueron fabricados, cuánto costaban, quiénes los utilizaban ni hasta qué punto su construcción estaba difundida. Por tanto, afirmar que el mundo helenístico poseía una industria generalizada de computadores mecánicos sería tan problemático como considerar Anticitera una creación inexplicable. El registro arqueológico permite demostrar la existencia de esta tecnología al menos una vez, pero no medir directamente su grado de difusión.

Sin embargo, la ausencia arqueológica debe interpretarse considerando las condiciones materiales de conservación. Según Moussas (2011), el mecanismo estaba construido fundamentalmente en bronce, material valioso y fácilmente reciclable. Los objetos metálicos antiguos fueron repetidamente fundidos para fabricar armas, herramientas, monedas y otros productos. Por este motivo, numerosas obras metálicas conocidas mediante fuentes literarias han desaparecido completamente. El propio mecanismo sobrevivió en condiciones excepcionales porque terminó depositado bajo el mar tras un naufragio. Paradójicamente, el accidente que destruyó parcialmente el dispositivo fue también aquello que permitió su supervivencia durante aproximadamente dos milenios. El hallazgo obliga, por tanto, a considerar un sesgo de conservación: conocemos aquello que determinadas circunstancias fortuitas permitieron preservar.

La comparación con otros conocimientos helenísticos refuerza este argumento. Una parte considerable de la producción científica antigua se conoce mediante copias posteriores, referencias indirectas o testimonios de otros autores. Obras completas desaparecieron y determinadas técnicas únicamente pueden reconstruirse parcialmente. La pérdida material no implica necesariamente inexistencia histórica. Si el naufragio de Anticitera no hubiese ocurrido o si los restos hubiesen sido recuperados y fundidos en la Antigüedad, actualmente no existiría evidencia material directo de que los griegos podían construir una máquina de estas características. Nuestra interpretación del nivel tecnológico helenístico sería, en consecuencia, sustancialmente diferente. Este ejercicio contrafactual

evidencia hasta qué punto la historia de la tecnología depende de contingencias arqueológicas.

La desaparición posterior de mecanismos comparables tampoco demuestra necesariamente que el conocimiento se mantuviera intacto o evolucionara linealmente. Las tecnologías complejas dependen de comunidades de especialistas, instituciones, demanda económica y cadenas de transmisión artesanal. Cuando estos sistemas desaparecen, determinadas capacidades técnicas pueden reducirse o perderse. La fragmentación política del Mediterráneo helenístico, la incorporación de sus centros científicos al dominio romano y posteriores transformaciones económicas y culturales modificaron profundamente las condiciones institucionales en las que había prosperado la ciencia helenística. Ello no significa que toda tradición mecánica desapareciera inmediatamente: mecanismos de engranajes continuaron utilizándose en otros contextos y posteriormente alcanzaron nuevas formas en tradiciones bizantinas, islámicas y europeas. Pese a lo anterior, la trayectoria tecnológica no fue necesariamente acumulativa ni lineal.

Por ello, el mecanismo plantea una cuestión historiográfica más amplia sobre la manera de interpretar la tecnología antigua. Su particularidad arqueológica no debería convertirse automáticamente en singularidad histórica. La explicación más razonable a partir de la evidencia disponible parece situarse entre ambos extremos: Anticitera fue una pieza excepcionalmente sofisticada, pero surgida dentro de una tradición científica capaz de producirla. No demuestra que instrumentos semejantes fueran cotidianos ni que la sociedad helenística estuviera próxima a una revolución industrial. Sí demuestra, en cambio, que al menos algunos especialistas poseían capacidades para integrar astronomía matemática, fabricación de engranajes y diseño mecánico en niveles que durante mucho tiempo la historiografía moderna no había atribuido a las sociedades antiguas. En esta línea, el verdadero carácter revolucionario del hallazgo no consiste en mostrar una tecnología “fuera de su tiempo”, sino en obligarnos a reconsiderar aquello que suponíamos posible en su tiempo.

Conclusión

El mecanismo de Anticitera constituye uno de los testimonios materiales más extraordinarios de la ciencia y la tecnología antiguas. Su compleja combinación de engranajes, escalas e inscripciones demuestra que los artesanos y científicos helenísticos fueron capaces de convertir conocimientos astronómicos abstractos en un sistema mecánico capaz de representar ciclos celestes. Las investigaciones realizadas desde Price hasta los estudios recientes mediante tomografía han revelado progresivamente una sofisticación mucho mayor de la inicialmente imaginada. La evidencia disponible permite afirmar que no se trataba simplemente de un calendario elaborado, sino de un instrumento de astronomía matemática que mecanizaba relaciones numéricas y geométricas.

Desde una perspectiva estrictamente arqueológica, el dispositivo continúa siendo excepcional. No se conserva otra máquina helenística equivalente y numerosos elementos de su diseño original siguen siendo objeto de reconstrucción y discusión. Este hecho impide afirmar que mecanismos semejantes fueran comunes o que existiera una producción masiva de dispositivos astronómicos. La cautela resulta particularmente necesaria porque una parte importante del instrumento se ha perdido: actualmente sobreviven 82 fragmentos, correspondientes aproximadamente a un tercio del artefacto original. La extraordinaria relevancia del objeto no debe conducir, por tanto, a reconstruir una civilización tecnológica para la cual las evidencias disponibles resultan insuficientes.

No obstante, considerar Anticitera una anomalía absoluta resulta igualmente problemático. Su funcionamiento presupone conocimientos acumulados que pueden relacionarse con tradiciones astronómicas babilónicas y griegas, mientras las fuentes antiguas documentan la existencia de otros instrumentos destinados a representar mecánicamente los movimientos celestes. Los antecedentes asociados con Arquímedes, Hiparco y Posidonio permiten situar el artefacto dentro de una cultura científica caracterizada por la interacción entre astronomía, geometría y mecánica. El mecanismo parece así menos una inexplicable irrupción tecnológica que el punto excepcionalmente conservado de una trayectoria histórica cuyos demás componentes han desaparecido casi por completo.

El caso demuestra además las limitaciones inherentes a la reconstrucción arqueológica de las capacidades tecnológicas. Los materiales reutilizables presentan probabilidades de

supervivencia muy diferentes de aquellas correspondientes a cerámicas, construcciones monumentales o inscripciones pétreas. En consecuencia, aquello que actualmente parece excepcional pudo haber sido menos extraordinario en su contexto original. Esto no autoriza a imaginar decenas o centenares de mecanismos sin evidencia, pero sí obliga a distinguir cuidadosamente entre "único ejemplar conservado" y "único ejemplar construido". La primera afirmación está respaldada por el registro disponible; la segunda excede aquello que actualmente puede demostrarse.

Las evidencias analizadas sugieren asimismo que la historia tecnológica no debe interpretarse como una sucesión inevitable de avances acumulativos. El conocimiento científico puede desarrollarse intensamente bajo determinadas condiciones institucionales y posteriormente fragmentarse cuando desaparecen los talleres, especialistas, redes de patrocinio o contextos intelectuales que posibilitan su transmisión. Anticitera recuerda que la capacidad tecnológica no depende únicamente de conocer principios científicos, sino también de preservar comunidades capaces de materializarlos. Desde esta mirada, los prolongados intervalos sin dispositivos comparables no necesariamente invalidan la sofisticación alcanzada durante el período helenístico, sino que permiten problematizar la idea moderna de un progreso técnico continuo.

En respuesta a la pregunta orientadora, el mecanismo de Anticitera puede considerarse una anomalía arqueológica, pero difícilmente una anomalía científica completamente aislada. Su singular conservación no permite demostrar la existencia de una extensa industria de mecanismos astronómicos, pero su complejidad, los antecedentes intelectuales de la ciencia helenística y las referencias antiguas a dispositivos semejantes hacen plausible situarlo dentro de una tradición tecnológica especializada actualmente perdida en gran medida. Su importancia histórica radica precisamente en esta paradoja: Anticitera es único entre los objetos que sobrevivieron, pero contiene demasiados conocimientos acumulados para ser interpretado convincentemente como una invención surgida de la nada. Más que una tecnología inexplicablemente adelantada a su tiempo, constituye una evidencia excepcional de que nuestro conocimiento sobre las capacidades científicas y mecánicas de su tiempo continúa siendo incompleto.

Referencias bibliográficas

Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, *8*(1), 19-32. https://doi.org/10.1080/1364557032000119616

Freeth, T., Bitsakis, Y., Moussas, X., Seiradakis, J., Tselikas, A., Mangou, H., Zafeiropoulou, M., Hadland, R., Bate, D., Ramsey, A., Allen, M., Crawley, A., Hockley, P., Malzbender, T., Gelb, D., Ambrisco, W., & Edmunds, M. (2006). Decoding the ancient Greek astronomical calculator known as the Antikythera Mechanism. *Nature*, 444, 587-591. https://doi.org/10.1038/nature05357

Freeth, T., Jones, A., Steele, J., & Bitsakis, Y. (2008). Calendars with Olympiad display and eclipse prediction on the Antikythera Mechanism. *Nature*, 454, 614-617. https://doi.org/10.1038/nature07130

Freeth, T., Higgon, D., Dacanalis, A., MacDonald, L., Georgakopoulou, M., & Wojcik, A. (2021). A model of the cosmos in the ancient Greek Antikythera Mechanism. *Scientific Reports*, 11, 5821. https://doi.org/10.1038/s41598-021-84310-w

Jones, A. (2017). *A portable cosmos: Revealing the Antikythera Mechanism, scientific wonder of the ancient world.* Oxford University Press.

Moussas, X. (2011). The Antikythera mechanism. In P. Kokkotas, K. Malamitsa, & A. Rizaki (Eds.), *Adapting historical knowledge production to the classroom* (pp. 113–128). Sense Publishers. https://doi.org/10.1007/978-94-6091-349-5_8

Palazón, J. (2014). ¿Un ordenador en la Antigua Grecia?: El misterioso mecanismo de Anticitera. *Estratos*, (107), 53-54.

Price, D. de S. (1974). Gears from the Greeks: The Antikythera Mechanism—A calendar computer from ca. 80 B.C. *Transactions of the American Philosophical Society*, *64*(7), 1-70.

Ramírez, I., Simosi, A., Baumer, L., Emery, P., Pönitz, T., Manousos, O., & Sotiriou, A. (2026). Site formation processes of the Antikythera shipwreck site: A

geoarchaeological approach. *International Journal of Nautical Archaeology*, 1-26. https://doi.org/10.1080/10572414.2026.2679631

Wright, M. (2006). The Antikythera Mechanism and the early history of the Moon-phase display. *Antiquarian Horology*, *29*(3), 319-329.

Capítulo V

¿Puede hablarse de una forma primitiva de robótica en Grecia y Roma? Autómatas, programación mecánica y vida artificial en el mundo clásico

Can We Speak of a Primitive Form of Robotics in Ancient Greece and Rome? Automata, Mechanical Programming, and Artificial Life in the Classical World

Humberto Álvarez Sepúlveda
Universidad Católica de la Santísima Concepción
halvarez@ucsc.cl
https://orcid.org/0000-0001-5729-3404
Chile

Resumen

Este capítulo analiza críticamente si los autómatas y dispositivos mecánicos desarrollados en Grecia y Roma pueden interpretarse como una forma primitiva de robótica. El análisis se organiza en tres dimensiones: los antecedentes míticos de la vida artificial en la cultura griega; el desarrollo técnico de autómatas desde el período helenístico hasta el mundo romano; y los límites epistemológicos de aplicar el concepto moderno de robot a tecnologías antiguas. Metodológicamente, se sustenta en una revisión de alcance de literatura especializada, desarrollada desde un enfoque cualitativo-interpretativo y un diseño narrativo de tópico. Se argumenta que mecanismos asociados a Filón de Bizancio y, especialmente, Herón de Alejandría incorporaron principios de automatización, secuenciación y control mecánico comparables funcionalmente con componentes elementales de la robótica. Se concluye que resulta legítimo hablar de una robótica primitiva, siempre que esta categoría sea utilizada de manera analógica y no anacrónica.

Palabras clave: Autómatas; Robótica; Grecia antigua; Roma antigua; Historia de la tecnología.

Abstract

This chapter critically examines whether the automata and mechanical devices developed in Greece and Rome can be interpreted as a primitive form of robotics. The analysis is structured around three dimensions: the mythical antecedents of artificial life in Greek culture; the technical development of automata from the Hellenistic period through the Roman era; and the epistemological limits of applying the modern concept of the robot to ancient technologies. Methodologically, the study is grounded in a scoping review of specialized literature, employing a qualitative-interpretative approach and a topical narrative design. It is argued that mechanisms associated with Philo of Byzantium and, notably, Hero of Alexandria incorporated principles of automation, sequencing, and mechanical control that are functionally comparable to the fundamental components of robotics. The study concludes that it is legitimate to speak of primitive robotics, provided the category is used analogically rather than anachronistically.

Keywords: Automata; Robotics; Ancient Greece; Ancient Rome; History of technology.

Introducción

La robótica suele considerarse una manifestación característica de la revolución tecnológica contemporánea. Robots industriales, vehículos autónomos y máquinas programables parecen depender de condiciones históricas muy recientes: electrónica, informática, sensores, algoritmos y sistemas de control. Sin embargo, si el concepto se examina desde una perspectiva histórica más amplia, algunas de sus características fundamentales —movimiento autónomo, ejecución automática de acciones, secuenciación de operaciones e imitación mecánica de seres vivos— poseen antecedentes sorprendentemente antiguos. La ingeniería grecorromana conoció mecanismos capaces de desplazarse, abrir puertas, producir sonidos o ejecutar representaciones teatrales mediante combinaciones de pesos, cuerdas, poleas, aire comprimido, agua y engranajes. La literatura especializada reconoce, además, que los ingenieros griegos dominaban desde la época helenística los principios mecánicos aplicados a instrumentos científicos y autómatas (Wikander, 2012; Roby, 2023b; Asper, 2025).

El problema resulta particularmente interesante porque la imaginación de seres artificiales precedió a su materialización técnica. En la mitología griega aparecen criaturas construidas en lugar de nacidas: Talos, gigante de bronce encargado de proteger Creta; las sirvientas de oro de Hefesto; los trípodes capaces de desplazarse por sí mismos; las estatuas animadas atribuidas a Dédalo y la propia Pandora, fabricada artificialmente por los dioses. Mayor (2018) interpreta estos relatos como expresiones tempranas de una preocupación cultural por la posibilidad de crear seres artificiales dotados de determinadas capacidades autónomas. No constituyen robots históricos en sentido material, pero muestran que la cultura griega había elaborado intelectualmente el problema de la biotecnología, es decir, de una vida producida mediante el artificio.

Esta imaginación tecnológica encontró un correlato material especialmente significativo durante el período helenístico. Desde el siglo III a. C., figuras como Ctesibio de Alejandría y Filón de Bizancio desarrollaron una tradición mecánica vinculada con la hidráulica, la neumática y la fabricación de dispositivos automáticos. Filón escribió una extensa Mechanikē Syntaxis, que incluía un tratado específicamente dedicado a la construcción de autómatas, actualmente perdido pero mencionado posteriormente por Herón (Roby, 2023a; 2023b). La existencia de ese tratado resulta particularmente reveladora porque demuestra que la automatización no constituyó la ocurrencia aislada

de un inventor excepcional, sino un ámbito reconocible dentro del conocimiento mecánico helenístico.

El punto culminante de esta tradición aparece en Herón de Alejandría, activo probablemente durante el siglo I d. C., cuyos tratados describen dispositivos accionados automáticamente mediante mecanismos relativamente sofisticados. Sus autómatas teatrales podían ejecutar movimientos sucesivos previamente determinados; algunos se desplazaban siguiendo trayectorias establecidas y otros representaban escenas mediante figuras móviles, cambios de decorado y efectos mecánicos (Hero de Alexandria, 1971). Roby (2024) ha subrayado que determinadas secuencias descritas por Herón pueden ser interpretadas como formas de "programación" mecánica, aunque evidentemente carecieran de electrónica o procesamiento digital.

En este escenario, el presente ensayo busca responder a la siguiente pregunta: ¿Hasta qué punto los autómatas desarrollados en Grecia y Roma pueden considerarse una forma primitiva de robótica y no simplemente curiosidades mecánicas destinadas al entretenimiento? Para responderla, se examinan tres dimensiones complementarias. En primer lugar, se analiza la imaginación de seres artificiales en la mitología griega como antecedente conceptual de la automatización. En segundo término, se estudia la tradición tecnológica que condujo desde los ingenieros helenísticos hasta los autómatas de Herón y su recepción romana. Por último, se problematiza la utilización del concepto de "robot" para interpretar estas máquinas, defendiendo que puede hablarse de una forma primitiva de robótica únicamente desde una perspectiva funcional y genealógica, evitando equiparar tecnologías antiguas con sistemas robóticos actuales.

Metodología

Esta investigación se fundamenta en una revisión de alcance de literatura especializada, siguiendo el enfoque metodológico propuesto por Arksey y O'Malley (2005), destinada a identificar y analizar críticamente las principales interpretaciones historiográficas acerca de los autómatas y mecanismos automáticos desarrollados en el mundo grecorromano. El corpus considerado integra investigaciones sobre historia de la tecnología, historia de la ciencia, estudios clásicos, mecánica helenística, autómatas antiguos e historia cultural de la vida artificial.

La búsqueda bibliográfica consideró literatura académica localizada en bases y repositorios especializados, además de monografías y capítulos publicados por editoriales universitarias. Los principales descriptores utilizados fueron ancient automata, Greek automata, Roman automata, Hero of Alexandria, Philo of Byzantium, ancient robotics, mechanical programming, ancient technology y artificial life in Greek mythology. Se privilegiaron trabajos centrados en el funcionamiento material de las máquinas, la tradición mecánica alejandrina y la interpretación histórica de los autómatas. Asimismo, se incorporaron estudios recientes que reconsideran los dispositivos de Herón desde categorías relacionadas con programación y automatización, sin perder de vista las fuentes antiguas y la diferencia epistemológica entre tecnología clásica y robótica moderna.

La revisión adopta un enfoque cualitativo e interpretativo y un diseño narrativo de tópico. Este procedimiento privilegia el análisis crítico de las convergencias, divergencias y vacíos presentes en la literatura, en lugar de una aproximación bibliométrica. De este modo, se contrastan argumentos, evidencias e interpretaciones procedentes de la historia de la tecnología, la historia de la ciencia y los estudios clásicos, con el propósito de construir una síntesis crítica sobre los autómatas grecorromanos y su posible relación con la robótica.

Se estableció, además, una distinción metodológica fundamental entre autómatas míticos y autómatas históricos. Talos o las sirvientas de Hefesto poseen importancia para reconstruir la imaginación tecnológica griega, pero no constituyen evidencia arqueológica de la existencia de robots. Diferente es el caso de Filón y Herón, cuyas obras pertenecen a una tradición técnica documentada. Esta diferenciación evita convertir narraciones mitológicas en descripciones literales de tecnologías desaparecidas. Mayor (2018) precisamente destaca el valor de los mitos como expresiones de antiguos sueños tecnológicos, mientras que los tratados mecánicos permiten analizar dispositivos técnicamente concebibles y, en algunos casos, susceptibles de reconstrucción experimental.

Finalmente, la categoría “robótica primitiva” se utiliza como herramienta interpretativa y no como clasificación tecnológica estricta. Un robot contemporáneo suele incorporar sistemas de percepción, control, procesamiento y actuación que exceden ampliamente las posibilidades de cualquier máquina antigua. Sin embargo, algunos autómatas

grecorromanos compartían funciones elementales con dispositivos robóticos: poseían una fuente de energía, mecanismos de transmisión, componentes ejecutores y secuencias predeterminadas de comportamiento. El propósito de la revisión consiste, por tanto, en determinar hasta dónde puede sostenerse esta analogía sin incurrir en presentismo. Como principio metodológico, se entiende que identificar antecedentes funcionales de la robótica no significa atribuir a los ingenieros antiguos conocimientos electrónicos, computacionales o cibernéticos inexistentes en su contexto histórico.

De Talos a las sirvientas de Hefesto: La imaginación antigua de seres artificiales

La posibilidad de fabricar seres capaces de actuar autónomamente aparece tempranamente en la imaginación griega. En la Ilíada, Homero atribuye a Hefesto una serie de extraordinarias creaciones mecánicas, entre ellas trípodes capaces de desplazarse automáticamente y sirvientas artificiales fabricadas en oro. Estas últimas poseen apariencia humana y realizan tareas para su creador. La importancia histórica del relato no consiste en demostrar la existencia material de androides en la Grecia arcaica, sino en evidenciar que aproximadamente tres milenios antes de la robótica contemporánea ya se imaginaban artefactos antropomorfos diseñados para sustituir determinadas acciones humanas. Mayor (2018) considera estos relatos antecedentes culturales fundamentales de las posteriores concepciones sobre vida artificial, precisamente porque describen seres "fabricados, no nacidos".

Talos constituye posiblemente el ejemplo más significativo. La tradición mitológica lo presenta como un gigante de bronce encargado de recorrer las costas de Creta y defender la isla frente a intrusos. Su comportamiento resulta especialmente sugestivo desde una perspectiva contemporánea: posee una misión predeterminada, identifica amenazas, patrulla un territorio y responde mediante acciones defensivas. Sin embargo, describirlo simplemente como "el primer robot" puede inducir a error. Talos pertenece al ámbito mitológico y su funcionamiento responde a una concepción sobrenatural del artificio divino. Lo relevante es que el mito formula conceptualmente un objeto semejante a un agente artificial creado para ejecutar autónomamente una función específica. Mayor (2018) utiliza precisamente el caso de Talos para mostrar que cuestiones actualmente vinculadas con robots autónomos fueron anticipadas imaginativamente por la cultura antigua.

Las figuras asociadas a Dédalo amplían este horizonte. Al legendario inventor se le atribuían estatuas tan extraordinariamente realistas que parecían capaces de desplazarse por sí mismas. La tradición refleja una frontera culturalmente problemática entre representación y animación: la obra perfecta del artesano sería aquella que deja de parecer materia inerte para comportarse como un organismo. El principio posee una sorprendente continuidad histórica. Desde los autómatas helenísticos hasta los androides mecánicos del siglo XVIII y los robots humanoides contemporáneos, una parte importante de la historia de la automatización ha estado marcada por la aspiración de reproducir artificialmente comportamientos asociados a los seres vivos. En este sentido, la mitología no constituye una descripción de la ingeniería disponible, pero sí un laboratorio imaginativo donde se formularon posibilidades tecnológicas todavía irrealizables.

La relación entre mito y tecnología debe interpretarse, no obstante, con prudencia. Resultaría metodológicamente insostenible afirmar que los relatos sobre Talos demuestran la existencia de una civilización tecnológicamente capaz de fabricar robots humanoides. La evidencia disponible apunta en otra dirección: los griegos imaginaron seres artificiales antes de poseer los medios técnicos necesarios para construir equivalentes materiales. Precisamente esta distancia entre imaginación y realización resulta históricamente fecunda. Los mitos expresaron preguntas acerca de los límites de la tecnología, mientras la posterior ingeniería helenística comenzó a desarrollar mecanismos que convertían parcialmente esas fantasías en experiencias observables. En términos actuales, podría afirmarse que el mito desempeñó una función comparable a la ciencia ficción: explorar conceptualmente tecnologías todavía inexistentes.

Por consiguiente, los autómatas mitológicos constituyen antecedentes conceptuales, pero no tecnológicos, de la robótica. Su relevancia reside en mostrar que la autonomía artificial, la imitación de la vida y la sustitución mecánica de acciones humanas eran problemas imaginables dentro de la cultura griega. Esta tradición proporciona un contexto intelectual significativo para comprender por qué los autómatas construidos posteriormente podían provocar fascinación. Bajo este contexto, cuando una figura mecánica se movía aparentemente por sí misma, el espectador antiguo no observaba únicamente una máquina: contemplaba la materialización parcial de una posibilidad largamente asociada con dioses, artesanos míticos y criaturas artificiales. La transición desde Hefesto hacia los ingenieros alejandrinos representa, por ello, un desplazamiento

fundamental desde la imaginación de la autonomía artificial hacia su realización mecánica limitada.

De Filón a Herón: Automatización y programación mecánica

La transformación decisiva tuvo lugar en el mundo helenístico, particularmente en Alejandría, donde convergieron conocimientos matemáticos, físicos y mecánicos. Desde aproximadamente el siglo III a. C., los ingenieros estudiaron sistemáticamente máquinas simples, neumática, hidráulica, artillería e instrumentos científicos. Wikander (2012) señala que las cinco máquinas simples —la palanca, la polea, la rueda y el eje, la cuña y el tornillo— eran conocidas y discutidas por ingenieros griegos al menos desde finales del siglo III a. C. y que los autómatas, aunque frecuentemente destinados a provocar asombro, servían también para demostrar principios físicos y mecánicos. Esta dimensión resulta fundamental: la automatización antigua no fue exclusivamente entretenimiento, sino también una forma material de conocimiento.

Filón de Bizancio ofrece una evidencia especialmente importante sobre la existencia de una auténtica tradición técnica. Hacia el 200 a. C. compuso una Mechanikē Syntaxis probablemente integrada por nueve libros, dedicada a materias como palancas, construcción de puertos, artillería, neumática, fortificaciones y autómatas. Si bien su tratado sobre fabricación de autómatas se perdió, Herón conoció esa tradición y se refirió a ella posteriormente. La relevancia historiográfica de este antecedente es considerable: si existía un tratado especializado en automatopoiētikē, la fabricación de máquinas automáticas había adquirido suficiente desarrollo como para constituir un campo técnico susceptible de sistematización y transmisión.

Herón de Alejandría representa la culminación documental de esta tradición. Sus obras describen numerosos dispositivos impulsados mediante agua, aire, vapor, pesos y sistemas mecánicos. Su Pneumatica reúne mecanismos capaces de producir movimientos y efectos aparentemente autónomos, mientras que Automata se concentra específicamente en máquinas teatrales. La historiografía moderna ha prestado especial atención a dos tipos: un autómata móvil y otro estacionario. El primero podía desplazarse siguiendo una trayectoria predeterminada; el segundo ejecutaba una secuencia narrativa mediante figuras, movimientos y transformaciones escénicas. El tratado de Herón constituye, por tanto, mucho más que un catálogo de curiosidades, ya que contiene

instrucciones destinadas a reproducir comportamientos mecánicos organizados (Hero de Alexandria, 1971; Grillo, 2019).

El elemento más sorprendente aparece en la secuenciación mecánica de instrucciones. Roby (2024) sostiene que los autómatas teatrales de Herón podían ser configurados para realizar actividades sucesivas: desplazarse por trayectorias previamente establecidas, activar figuras danzantes o desarrollar representaciones compuestas por varias escenas, con actores mecánicos y cambios de decorado. El sistema utilizaba, entre otros componentes, pesos descendentes, cuerdas enrolladas y mecanismos de transmisión. La disposición física de las cuerdas determinaba cómo debía ejecutarse el movimiento. Modificando dicha disposición podía cambiarse el comportamiento posterior de la máquina. En términos funcionales, existía así una separación elemental entre el mecanismo y la secuencia de acciones que este debía ejecutar.

Este aspecto permite establecer la analogía más sólida con la robótica. El autómata de Herón no "pensaba", carecía de sensores sofisticados y no modificaba autónomamente su comportamiento en función del entorno. No obstante, podía ejecutar una secuencia previamente establecida sin intervención humana continua. Su funcionamiento reunía cuatro elementos básicos reconocibles en sistemas automáticos posteriores: energía, transmisión, actuación y programación mecánica. Además, la tradición no desapareció completamente con la expansión romana. Wikander (2012) señala que la evidencia demuestra la transmisión del conocimiento sobre autómatas y otros dispositivos dentro del Imperio romano, aunque la tecnología romana se caracterizara principalmente por aplicaciones de mayor escala basadas en innovaciones helenísticas. Por ello, más que hablar exclusivamente de "robots romanos", resulta apropiado referirse a una tradición tecnológica grecorromana cuyo núcleo innovador fue predominantemente helenístico.

¿Robots antiguos? Alcances y límites de una categoría moderna

El principal problema historiográfico consiste en determinar qué entendemos por robot. Si se exige que una máquina posea electrónica, sensores digitales, microprocesadores, algoritmos informáticos y capacidad adaptativa, ningún dispositivo antiguo puede clasificarse como tal. La palabra misma es moderna y deriva del término checo robota, popularizado por Karel Čapek en el siglo XX. Aplicarla directamente a Herón implicaría introducir una categoría inexistente durante la Antigüedad. Los griegos utilizaban el

concepto automatos para aquello que actuaba “por sí mismo”, una categoría conceptualmente próxima a la automatización, pero no equivalente a la definición tecnológica contemporánea de robótica.

Sin embargo, una definición estrictamente contemporánea puede ocultar continuidades tecnológicas relevantes. Un robot no se caracteriza únicamente por poseer electrónica, sino también por ejecutar físicamente acciones mediante un sistema organizado de control. Desde esta perspectiva funcional, algunos mecanismos antiguos presentan características embrionarias de sistemas robóticos. Los autómatas de Herón poseían una fuente energética, mecanismos capaces de transformar esa energía en movimiento, componentes ejecutores y un sistema físico que determinaba el orden de las operaciones. Particularmente significativo resulta que el autómata móvil descrito en Automata pudiera ejecutar recorridos previamente determinados. Para Roby (2024), este tratado considera explícitamente la relación entre “experimento” y “programa”, mostrando que las acciones podían ser mecánicamente configuradas.

Un ejemplo permite comprender mejor esta continuidad. Un robot industrial de la era actual puede ser programado para desplazarse hasta un punto, detenerse, activar un componente, modificar su orientación y continuar hacia otra posición. Evidentemente, el sistema electrónico que controla dichas acciones resulta incomparablemente más sofisticado que una máquina antigua. No obstante, el principio abstracto de establecer anticipadamente una secuencia ordenada de movimientos ejecutados automáticamente aparece ya en Herón. La diferencia fundamental reside en el soporte donde se almacena la instrucción: códigos digitales y memoria electrónica en un robot moderno; disposición material de cuerdas, ejes y mecanismos en el autómata antiguo. Hablar de programación mecánica resulta, por ello, defendible siempre que no se confunda con programación informática.

También debe evitarse atribuir inteligencia a estas máquinas. Los autómatas grecorromanos no poseían cognición ni capacidad general para tomar decisiones. Tampoco existen evidencias de que fueran empleados sistemáticamente para sustituir trabajadores en actividades productivas comparables con la automatización industrial moderna. Sus funciones estuvieron asociadas principalmente a demostraciones técnicas, espectáculos, mecanismos religiosos, instrumentos científicos y dispositivos destinados a provocar admiración. Por esta razón, Wikander (2012) advierte que muchos autómatas

buscaban generar asombro al mismo tiempo que demostraban principios físicos. Por tanto, calificarlos como "inteligencia artificial antigua" resultaría mucho más problemático que considerarlos antecedentes de la robótica: poseían automatización, pero no inteligencia en el sentido tecnológico actual.

La categoría más adecuada sería, entonces, robótica primitiva, entendida como una genealogía funcional y no como una equivalencia histórica. Bajo esta perspectiva, la historia de la robótica no comenzaría repentinamente con la electrónica del siglo XX, sino que formaría parte de una trayectoria mucho más extensa de intentos humanos por externalizar acciones mediante artefactos autónomos. Los autómatas helenísticos representan un momento excepcional dentro de esa trayectoria porque combinan imaginación de vida artificial, conocimiento físico, construcción mecánica y secuenciación automática. No fueron robots modernos incompletos, pues esa interpretación convertiría el pasado en una simple antesala del presente. Fueron tecnologías plenamente inscritas en sus propios contextos culturales que desarrollaron principios posteriormente fundamentales para la automatización y que, desde una perspectiva retrospectiva, pueden reconocerse como antecedentes de esta.

Conclusión

La historia de la robótica resulta considerablemente más antigua que la aparición del propio término "robot". Si bien los sistemas robóticos contemporáneos son producto de la convergencia entre mecánica, electrónica, informática y teoría del control desarrollada fundamentalmente durante los siglos XIX y XX, algunos de sus principios funcionales poseen antecedentes en el mundo clásico. La civilización grecorromana, particularmente la tradición científica helenística, desarrolló dispositivos capaces de realizar movimientos autónomos, ejecutar secuencias previamente establecidas e imitar determinados comportamientos humanos o animales. Por ello, reducir los autómatas antiguos a simples juguetes mecánicos impide reconocer su relevancia dentro de una historia de larga duración de la automatización.

El primer antecedente se encuentra en el ámbito de la imaginación tecnológica. Talos, las sirvientas de Hefesto, los trípodes automáticos y las estatuas atribuidas a Dédalo no constituyen pruebas de la existencia de robots antiguos, pero revelan una cuestión cultural extraordinariamente persistente: la posibilidad de fabricar entidades capaces de actuar de

manera aparentemente autónoma. Estas criaturas “fabricadas, no nacidas” permiten reconstruir antiguas reflexiones acerca de la vida artificial y los límites de la técnica. La mitología anticipó así conceptualmente problemas que posteriormente encontraron manifestaciones materiales mucho más modestas, pero históricamente verificables.

La segunda evidencia procede de la tradición mecánica helenística. Ctesibio, Filón y Herón no representan inventores completamente aislados, sino etapas de una cultura tecnológica donde neumática, hidráulica y mecánica alcanzaron importantes niveles de sistematización. La existencia de una obra sobre fabricación de autómatas atribuida a Filón y, sobre todo, los tratados conservados de Herón demuestran que las máquinas automáticas constituían un objeto explícito de conocimiento técnico. Los autómatas teatrales descritos por este último podían ejecutar complejas secuencias predeterminadas y, según investigaciones actuales, admiten legítimamente ser estudiados desde el problema de la programación mecánica.

No obstante, esta interpretación exige reconocer límites claros. Ningún autómata antiguo poseía inteligencia artificial, procesamiento electrónico o autonomía adaptativa comparable con un robot moderno. Tampoco existe evidencia suficiente para sostener que Grecia o Roma experimentaran una automatización generalizada de la producción. Las máquinas descritas por Herón pertenecieron a contextos científicos, demostrativos y espectaculares muy diferentes de aquellos que explican el desarrollo de la robótica industrial. La continuidad histórica debe establecerse, por tanto, sobre principios mecánicos específicos —automatización, secuenciación y control— y no sobre una supuesta identidad tecnológica entre el mundo antiguo y la contemporaneidad.

Por último, responder a la pregunta que orientó este ensayo permite sostener que sí puede hablarse de una forma primitiva de robótica en Grecia y Roma, siempre que la expresión se utilice como categoría analógica y no como equivalencia tecnológica. Los autómatas grecorromanos no fueron robots modernos adelantados dos mil años a su tiempo, pero tampoco simples curiosidades irrelevantes. Constituyeron una sofisticada exploración de cómo una máquina podía recibir energía, organizarla mediante mecanismos de control y ejecutar autónomamente una secuencia predeterminada de acciones. En esta línea, la distancia que separa a Talos del autómata de Herón y a este de un robot actual no constituye una línea directa de progreso, sino una larga historia cultural y tecnológica

articulada por una misma aspiración: construir objetos capaces de moverse y actuar sin intervención humana continua.

Referencias bibliográficas

Arksey, H., & O'Malley, L. (2005). Scoping studies: Towards a methodological framework. *International Journal of Social Research Methodology*, *8*(1), 19-32. https://doi.org/10.1080/1364557032000119616

Asper, M. (2025). *Working miracles in ancient Alexandria: Hero and his writings: Courtney Ann Roby: The mechanical tradition of Hero of Alexandria. Strategies of reading from antiquity to the early modern period.* Cambridge University Press.

Grillo, F. (2019). *Hero of Alexandria's Automata: A critical edition and translation, including a commentary on Book One [Doctoral dissertation, University of Glasgow]*. https://gla.on.worldcat.org/oclc/1142890605

Hero of Alexandria (1971). *The pneumatics of Hero of Alexandria.* Macdonald & Co./American Elsevier.

Mayor, A. (2018). *Gods and robots: Myths, machines, and ancient dreams of technology. Princeton University Press.* https://doi.org/10.2307/j.ctvc779xn

Roby, C. (2023a). *The mechanical tradition of Hero of Alexandria: Strategies of reading from antiquity to the early modern period.* Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781009029261

Roby, C. (2023b). Theorizing technology: Theōria, diagram, and artifact in Hero of Alexandria. In *Scientific visual representations in history* (pp. 141-172). Springer International Publishing.

Roby, C. (2024). Strange loops: Experiment and programme in Hero of Alexandria's Automata. In T. Bur, M. Gerolemou & I. Ruffell (Eds.), *Technological animation in classical antiquity* (pp. 101-120). Oxford University Press. https://doi.org/10.1093/oso/9780192857552.003.0006

Wikander, Ö. (2012). Gadgets and scientific instruments. In J. Oleson (Ed.), *The Oxford handbook of engineering and technology in the classical world* (pp. 785-799). Oxford Handbooks. https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199734856.013.0032

Capítulo VI

Confianza digital en la intención de compra dentro del e-commerce B2C: Un estudio en los nodos comerciales

Impact of digital trust on purchase intent within B2C e-commerce: A study in commercial nodes

Jeferson Ccorisapra Quintana
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
jccorisapra@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-2968-8297
Apurímac, Perú

Edison Vega Otazu
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
evega@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0009-0004-1233-8065
Apurímac, Perú

Luis Porras Durand
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
lporras@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0003-2802-4429
Apurímac, Perú

Silvia Soledad Lopez Ibañez
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
slopez@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-5815-8906
Apurímac, Perú

Medalit Villegas Casaverde
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
mvillegasc@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0001-7408-1980
Apurímac, Perú

Resumen

El presente artículo pretende examinar el efecto confianza digital en la intención de compra dentro del e-commerce B2C: Un estudio en los nodos comerciales. Se empleó un enfoque cuantitativo, de nivel explicativo y diseño no experimental de corte transversal. El estudio involucró la participación de 181 consumidores activos en el comercio digital; además la información obtenida se ha recopilado por medio de encuesta física hecha en zonas de alta recurrencia ubicadas en las ciudades de Andahuaylas y Abancay. Los resultados fueron procesados estadísticamente bajo un modelo de regresión lineal múltiple. Donde se comprobó que la calidad y usabilidad del sistema web ($\beta = 0.295$) y el riesgo percibido logístico y financiero ($\beta = 0.277$) son los factores de mayor impacto predictivo que guían el estudio, seguidos por la seguridad tecnológica ($\beta = 0.206$), la integridad del vendedor ($\beta = 0.194$) y la benevolencia corporativa ($\beta = 0.092$), donde al someterlos a una prueba de coeficiente de determinación R^2 (ajustado) demostró que el 84.4% de la varianza en la intención de compra es explicada conjuntamente por las cinco dimensiones evaluadas.

Palabras clave: Comercio electrónico B2C, Confianza digital, Intención de compra, Riesgo percibido, Calidad del sistema web, Mercados emergentes.

Abstract

This article aims to examine the effect of digital trust on purchase intention in B2C e-commerce: A study of commercial hubs. A quantitative, explanatory approach with a non-experimental, cross-sectional design was employed. The study involved 181 active consumers in digital commerce; furthermore, the data were collected through a face-to-face survey conducted in high-traffic areas located in the cities of Andahuaylas and Abancay. The results were statistically analyzed using a multiple linear regression model. The analysis confirmed that the quality and usability of the web system ($\beta = 0.295$) and perceived logistical and financial risk ($\beta = 0.277$) are the factors with the greatest predictive impact guiding the study, followed by technological security ($\beta = 0.206$), seller integrity ($\beta = 0.194$), and corporate benevolence ($\beta = 0.092$). When subjected to a test of the coefficient of determination R^2 (adjusted), the results showed that 84.4% of the variance in purchase intention is jointly explained by the five dimensions evaluated.

Keywords: B2C e-commerce, Digital trust, Purchase intent, Perceived risk, Web system quality, Emerging markets.

Introducción

El comercio electrónico en el modelo Business-to-Consumer (B2C), fue un antes y un después en las dinámicas comerciales a escala global. Los consumidores tienen una oferta diversa y muy masiva de productos de todo tipo y preferencias, sin limitaciones por la geografía típicas de las tiendas físicas. Esta transformación ha modificado por completo los paradigmas de interacción entre empresas y clientes (Oviedo & Bocanegra, 2023).

Pero el tránsito de los escaparates presenciales a los entornos digitales no es inofensivo. Pavlou (2003) explica algo que muchos usuarios en nuestro continente saben incluso sin nombrarlo: la separación espacial y temporal entre comprador y vendedor en internet genera una asimetría de información profunda", lo cual eso incrementa la incertidumbre y por ende la desconfianza, tanto la ambiental como la conductual del usuario en el momento exacto de transaccionar. Al no poder inspeccionar físicamente los productos ni interactuar cara a cara con el comerciante los consumidores experimentan un riesgo que perciben como elevado. Sobre todo, el temor a pérdidas económicas, fraudes en línea o fallos en el cumplimiento logístico de las entregas (Mahmood et al., 2025).

Ahora surge una pregunta, ¿qué hace falta para que alguien decida comprar aun con ese mal presentimiento? La literatura académica tiene una respuesta clara y muy fuerte: Confianza. No como un sentimiento que se siente vago. Sino como una fuerte columna psicológica que hace posible el intercambio digital. Mayer et al. (1995), en su modelo integrador, definen la confianza como la disposición deliberada de un individuo a volverse vulnerable ante las acciones de otra parte. Dichas expectativas esperadas se pueden ordenar en tres atributos evaluados de la contraparte: su habilidad operativa, su benevolencia hacia el cliente y su integridad ética. Kim et al. (2008), esto si se trata de llevar al comercio electrónico, determinan que la confianza actúa como el principal igualador cognitivo que suaviza el riesgo que el comprador no puede evitar siendo un antecedente directo, e indispensable para cualquiera que quiera entrar al campo del e-commerce para liberar la intención de compra del consumidor y garantizar la viabilidad de las plataformas virtuales.

Ahora, la consolidación de este modelo de negocio presenta barreras muy marcadas cuando se traslada a economías que recién emergen en América Latina. Vela et al. (2024) nos advierten repetidas veces que, si bien la región estudiada experimentó una

aceleradísima adopción de canales digitales (principal base para que el e-commerce pueda surgir), el mercado sigue frenado por un escepticismo casi instintivo. Es justo ese mismo escepticismo que es el que está atado a dos factores estructurales: la falta de seguridad en las pasarelas de pago y la baja penetración de la cultura de bancarización. Y si los marcos regulatorios robustos de protección de datos no están presentes o son escasos, simplemente los compradores se basarán casi en su totalidad por heurísticas externas. Un ejemplo concreto: el país de origen de la tienda virtual. De ahí infieren vagamente pero muy decisivamente si existen garantías estructurales y si es seguro compartir su información personal (Bhattacharya et al., 2023). En el Perú, este fenómeno es demasiado evidente, casi en una manera crítica.

Estado del arte

Las investigaciones de Aguilar-Herrera et al. (2023) demuestran que la consolidación de la confianza del consumidor a nivel local depende directamente de la percepción de seguridad transaccional". El miedo a la vulneración de datos financieros y fraude sigue siendo, el mayor freno del comercio electrónico en el país. Pero hay algo más, el consumidor peruano mantiene una postura altamente defensiva. Barreto y Portilla (2024) evidencian que incluso los millennials en provincias el segmento generacional que en teoría es el más familiarizado con la tecnología en general, evalúan seriamente las condiciones facilitadoras y los riesgos antes de ir por el canal físico por el digital. No es una transición automática, sino una decisión calculada.

Y luego está la logística. Limas y Miranda (2022) concluyen que el riesgo que las personas asocian a la última milla representa una barrera que deteriora la intención de compra. Básicamente, la incertidumbre de si el paquete llegará en buena condición, sumada a las dificultades para devoluciones, puede frustrar la transacción final. Y en regiones como Apurímac con su topografía agreste y su lejanía de los centros principales de distribución esta problemática se vuelve más grave. Abancay y Andahuaylas, sus principales nodos comerciales digitalizados, trabajan en condiciones que obligan al consumidor a asumir un riesgo logístico totalmente diferente de las capitales y financiero mucho mayor.

Por consiguiente, la presente investigación tiene como objetivo principal determinar el efecto explicativo que ejercen los determinantes de la confianza digital, calidad del

sistema web, integridad corporativa, benevolencia y seguridad tecnológica, junto con la mitigación del riesgo, sobre la intención de compra B2C de los consumidores apurimeños en el año 2026. Se busca aportar evidencia científica que permita a la academia y al sector empresarial regional estructurar interfaces capaces de vencer el escepticismo local.

Confianza digital

Mayer et al. (1995) nos explica la confianza en el entorno digital se presenta como la disposición de un consumidor a volverse vulnerable ante una tienda en línea que muy probablemente jamás escucho de él o vio de su existencia, basándose en el fuerte pensamiento de que dicha empresa actuará de manera honesta y cumplirá con sus obligaciones como vendedor. En el contexto específico del comercio en línea, esta variable adquiere una naturaleza muy extensa, siendo multidimensional, puesto que sus usuarios evalúan rigurosamente y muy seriamente las características de la empresa y la fiabilidad de la plataforma tecnológica en la que navegan (Kim et al., 2008).

De este modo, la confianza es un mecanismo psicológico vital que reduce la incertidumbre inherente a las interacciones lejanas y desconocidas, permitiendo a los individuos mitigar el riesgo percibido que todos tienen al divulgar datos financieros y personales en la red (Pavlou, 2003). En mercados emergentes, si se trata consolidar esta confianza requiere que las organizaciones demuestren no solo habilidad técnica, sino que digan sin palabras, sino con hechos altos estándares de seguridad y benevolencia, variables que terminan siendo decisivos para eliminar incluso el conflicto emocional del sentir negativo y establecer relaciones comerciales sostenibles en el tiempo (Vela et al., 2024).

Intención de compra

La intención de compra es definida como la probabilidad o el grado de disposición volátil que siente el consumidor para adquirir un producto o servicio a través de un canal determinado en un futuro cercano (Kim et al., 2008). En el comercio electrónico, este comportamiento es el resultado del proceso de evaluación en el que el cliente pone en una balanza los beneficios esperados como la calidad y el ahorro de tiempo por mencionar algunos, frente a los riesgos asociados a la transacción virtual (Mahmood et al., 2025).

La literatura académica nos dice que, aunque un cliente tenga una alta intención de compra no garantiza la ejecución de la transacción final. Y si hablamos de un contexto nacional como el peruano, intervienen incluso fricciones estructurales, tales como la muy conocida dificultad en la logística de distribución física no muy desarrollada en provincias de los productos, que pueden truncar la intención generada en un inicio (Limas & Miranda, 2022). Sin embargo, cuando las plataformas digitales logran integrar con éxito el presentimiento en el comprador de: utilidad, la seguridad transaccional y la confianza institucional, la intención de compra se fortalece, y se convierte en el predictor por estadística estadístico más certero del comportamiento real de adquisición del consumidor (Pavlou, 2003).

Metodología

El estudio corresponde a un enfoque cuantitativo y de medición numérica donde se para recolectar información se utilizó un instrumento con escala de Likert, de igual forma para procesar los resultados se requirió de la utilización de un software estadístico. Presenta un diseño no experimental en el cual no existió manipulación sobre las temáticas alguna, su naturaleza transversal donde el recojo de información fue en un solo tiempo, y con un alcance explicativo, ya que se quiso identificar el impacto causal que tienen los determinantes de la confianza digital sobre la intención de compra (Hernández-Sampieri & Mendoza, 2018).

En el contexto de la región Apurímac, precisamente en los nodos comerciales de Apurímac (Abancay y Andahuaylas) para el año 2026, el mundo del comercio electrónico se enfrenta por primera vez a un consumidor por el fenómeno de la transición digital. Con ello presente, la población del estudio comprendió la participación de consumidores económicamente activos utilizaron más de una vez canales digitales que termino en una experiencia de compra. Se utilizó un muestreo no probabilístico por conveniencia, recolectando 181 respuestas válidas. Superando el umbral mínimo requerido por la regla empírica de Green (1991) para garantizar la potencia estadística del modelo de regresión.

Los datos se recopilaron mediante un instrumento estructurado. Los participantes fueron interceptados en los principales centros de afluencia de las ciudades estudiadas; se les explicó el propósito del estudio y se solicitó su cooperación voluntaria. Donde se logró encuestar al número determinado de consumidores, descartando aquellos cuestionarios que no fueron completados en su totalidad o de aquellos que no sirvieran para la

investigación, como de aquellas personas las cuales nunca realizaron una compra en línea o en su defecto, no habitaban ninguna de estas ciudades mencionadas.

Para este estudio se han aplicado constructos que han sido utilizados ampliamente en el campo científico de los sistemas de información y el comportamiento del consumidor. Adicionalmente, los ítems de los constructos lograron estimaciones estadísticas óptimas para su validación.

Confianza digital: La escala fue adaptada de los constructos desarrollados originalmente por Pavlou (2003) y validados por Kim et al. (2008) en el sector del comercio electrónico. Por lo tanto, para medir la confianza en este sector, se adaptaron los ítems que corresponden a las dimensiones de calidad del sistema web, seguridad tecnológica, benevolencia e integridad corporativa, además de la percepción del riesgo. Para este cuestionario se empleó una escala Likert de 5 puntuaciones para valorar cada ítem (1 = completamente en desacuerdo y 5 = completamente de acuerdo).

Intención de compra: Para medir la disposición transaccional del consumidor se consideró el constructo adaptado de las investigaciones de Pavlou (2003) y Kim et al. (2008) aplicado a usuarios de comercio electrónico. El cuestionario fue adaptado al contexto geográfico y socioeconómico peruano. Cada uno de los ítems fue contestado por los participantes considerando la misma escala de Likert de 5 puntuaciones (1 = muy en desacuerdo y 5 = muy de acuerdo).

La confiabilidad global de los instrumentos para el estudio estimó un coeficiente alfa de Cronbach superior a 0.900 en ambas variables, lo que significa que los datos poseen una fiabilidad excelente para el procesamiento estadístico (George & Mallery, 2020).

Resultados

La información obtenida de los cuestionarios se procesó con el estadígrafo SPSS versión 27. Se usó el análisis de confiabilidad para la determinación del alfa de Cronbach de cada uno de los ítems y para cada variable en su conjunto. Seguidamente, se requirió la aplicación de la estadística descriptiva para calcular las frecuencias y porcentajes de los encuestados, y finalmente, se utilizó la estadística inferencial mediante correlaciones bivariadas y regresión lineal múltiple para corroborar las siguientes hipótesis:

H1: La calidad del sistema web impacta positiva y significativamente en la intención de compra B2C de los consumidores.

H2: La integridad del vendedor corporativo impacta positiva y significativamente en la intención de compra B2C de los consumidores.

H3: La benevolencia y soporte al cliente impactan positiva y significativamente en la intención de compra B2C de los consumidores.

H4: La seguridad tecnológica impacta positiva y significativamente en la intención de compra B2C de los consumidores.

H5: El riesgo percibido (logístico y financiero) impacta negativa y significativamente en la intención de compra B2C de los consumidores.

Tabla 1

Características de los encuestados

Características de participantes	**Frecuencia**	**Porcentaje**
Género (n=181)		
Masculino	88	48,6%
Femenino	93	51,4%
Edad (n=181)		
18 a 25 años	87	48,1%
26 a 35 años	73	40,3%
36 a 45 años	21	11,6%
Ciudad de residencia actual (n=181)		
Abancay	131	72,4%
Andahuaylas	50	27,6%
Cuenta con acceso a internet y a medios de pago digitales (n=181)		
Si	181	100,0%
Realizaron alguna compra de un producto físico a través de internet a un vendedor en otra ciudad o país (e-commerce)		
Sí, compro bastante a menudo.	67	37,0%
Sí, con regularidad.	106	58,6%
Si, pero solo unas pocas veces.	8	4,4%
¿En qué tipo de plataformas de comercio electrónico a distancia suele comprar o buscar productos con mayor interés?		
Plataformas Nacionales / Retailers (Ej. Falabella, Ripley, Plaza Vea, MercadoLibre Perú, Marketplace facebook).	76	42,0%
Plataformas Internacionales (Ej. Amazon, AliExpress, Alibaba, Shein, Temu).	33	18,2%
Utilizo o busco en ambas por igual.	69	38,1%
Ninguna de las anteriores.	3	1,7%

Para garantizar la idoneidad y validez interna de los datos, la recolección aplicó tres filtros de inclusión excluyentes. En primer lugar, se delimitó la participación a residentes de Abancay y Andahuaylas, en segundo lugar, se requirió acceso comprobado a conectividad y medios de pago digitales (tarjetas, Yape, Plin) que normalmente son las billeteras electrónicas predilectas en Perú. Finalmente se desecharon los cuestionarios de usuarios que dijeron utilizar la red únicamente de forma exploratoria (sin hacer compras). Esta decisión metodológica se fundamentó en que, para medir el riesgo financiero y logístico percibido, el participante debía haber cruzado el umbral transaccional al menos una vez. Tras este proceso de depuración, la muestra final válida (n=181) quedó constituida con un 100% de usuarios aptos para el modelo.

Ahora hablando de las características, mayoritariamente la conformaron mujeres (51,4%) y el resto fueron varones (48,6%), 48,1% tenían de 18 hasta los 25 años, de 26 a 35 años representaron el 40,3%, y por ultimo de 36 a 45 años la conformaron el 11,6%. En cuanto al lugar donde habitan, la mayoría pertenece a Abancay (72,4%), mientras que el 27,6% a Andahuaylas como se ve todo en la tabla 1.

En cuanto a la compra en diferentes plataformas, los resultados dicen que la mayoría realiza transacciones con regularidad 58,6%, el 37,0% compra bastante a menudo y apenas un 4,4% lo ha hecho unas pocas veces. En relación a la preferencia del canal digital donde compran, el 42,0% de los consumidores lo hace por las plataformas nacionales (Falabella, MercadoLibre Perú, Facebook Marketplace etc.), el 38,1% utiliza por igual tanto nacional como internacionalmente, el 18,2% busca productos solo en plataformas internacionales (Amazon, AliExpress, Temu, etc.) y un reducido 1,7% indicó no encajar en ninguna de las anteriores.

Los resultados de la correlación mostraron que los determinantes de confianza en el e-commerce B2C y la intención de compra con un r = 0,919 muestran una relación positiva y significativa como se suponía en un nivel muy fuerte (Hernández et al., 2017). Asimismo, existe una relación positiva y fuerte de las dimensiones estudiadas de la confianza, los cuales son: calidad del sistema web r = 0,848, riesgo percibido r = 0,834, seguridad tecnológica r = 0,812, integridad del vendedor r = 0,790 y benevolencia r = 0,715 con la intención de compra (ver tabla 2).

Tabla 2

Correlaciones

Correlaciones	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
1 Intención de compra	--	--	--	--	--	--	--
2 Confianza digital	0,919	--	--	--	--	--	--
3 D1: Calidad del sistema web	0,848	0,906	--	--	--	--	--
4 D2: Integridad del vendedor	0,790	0,869	0,721	--	--	--	--
5 D3: Benevolencia	0,715	0,809	0,706	0,639	--	--	--
6 D4: Seguridad tecnológica	0,812	0,881	0,751	0,694	0,618	--	--
7 D5: Riesgo percibido	0,834	0,896	0,764	0,718	0,643	0,761	--

Sig. <0,001; Sig. <0,05.

Con base a los resultados de correlación, se ha continuado con el análisis de regresión lineal múltiple a fin de encontrar la causa-efecto entre las variables de análisis. Por lo tanto, para cumplir los parámetros de la regresión se ha valorado las estimaciones de Durbin-Watson, Anova y nivel de significancia. El valor de Durbin-Watson para detectar la autocorrelación en nuestro estudio fue de (DW=1,538), la estimación se ubicó dentro de los valores de aceptación (1,5 y 2,5) (Ho, 2013; Vilà-Baños et al., 2019).

Tabla 3

Resultados de Regresión

Resumen del modelo[b]					
Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Durbin-Watson
1	,921[a]	0,848	0,844	0,38544	1,538

a. Predictores: (Constante), riesgo percibido, benevolencia, integridad del vendedor, seguridad tecnológica, calidad del sistema web

b. Variable dependiente: Intención de Compra

El valor de R^2 ajustado de 0,844 nos dijo que el 84,4% de la intención de compra se explica por la variación de las cinco variables predictoras (riesgo percibido, benevolencia, integridad del vendedor, seguridad tecnológica y calidad del sistema web).

El porcentaje restante, equivalente al 15,2%, estuvo influenciado por otras variables, además de las variables en estudio. Por último, el valor de la prueba ANOVA del modelo estimó un resultado por debajo de (sig. < 0,05) que conllevó a indicar que el modelo es significativo y válido (ver tabla 3), por lo tanto, la H1 fue soportada. Adicionalmente, los resultados (ver tabla Y) de tolerancia de los coeficientes de determinación fueron mayores a 0,1 y las estimaciones de inflación de la varianza (VIF) mostraron valores inferiores a

5 (Alin, 2010; Hair et al., 2019), de manera que, se descartó la existencia de multicolinealidad.

Tabla 4
ANOVA

ANOVA[a]						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	145,253	5	29,051	195,540	<,001[b]
	Residuo	25,999	175	0,149		
	Total	171,252	180			

a. Variable dependiente: Intención de compra
b. Predictores: (Constante), riesgo percibido, benevolencia (Soporte), integridad del vendedor, seguridad tecnológica, calidad del sistema web.

Tabla 5
Coeficientes

Coeficientes[a]						
Modelo		Coeficientes estandarizados	t	Sig.	Estadísticas de colinealidad	
		Beta			Tolerancia	VIF
1	(Constante)		-4,72	< 0,01		
	D1: Calidad del sistema web	0,295	5,367	< 0,01	0,286	3,491
	D2: Integridad del vendedor	0,194	4,074	< 0,01	0,383	2,613
	D3: Benevolencia (Soporte)	0,092	2,107	0,037	0,455	2,200
	D4: Seguridad tecnológica	0,206	4,058	< 0,01	0,336	2,981
	D5: Riesgo percibido	0,253	4,758	< 0,01	0,307	3,256

a. Variable dependiente: Variable Dependiente: Intención de compra

El resultado obtenido del estadígrafo SPSS, estimó el efecto de la calidad del sistema web en la intención de compra con un coeficiente beta $\beta = 0,295$ y un valor de (sig. <0,05); por lo que podemos decir que se aceptó la HE1.

Además, se estimó el efecto de la integridad del vendedor en la intención de compra con un valor $\beta = 0,194$; sig. <0,05, de manera que, la HE2 fue soportada.

Asimismo, se estimó el efecto de la benevolencia en la intención de compra con un valor $\beta = 0,092$; sig. <0,05, por tanto, débilmente, pero se apoyó la HE3.

Adicionalmente, el efecto de la seguridad tecnológica en la intención de compra con un valor $\beta = 0,206$; sig. <0,05, admitiéndose la HE4.

Por último, se estimó el efecto del riesgo percibido en la intención de compra con un valor $\beta = 0,253$; sig. <0,05; en consecuencia, también se aceptó la HE5.

Discusión

Los resultados de este estudio ofrecen información relevante sobre el rol que juega la confianza digital en la intención de compra B2C en los consumidores de mercados emergentes. Como se describió, el análisis estadístico revela que la confianza digital en su conjunto influye positiva y significativamente en la intención de compra. Los hallazgos del estudio respaldaron la indagación realizada por Kim et al. (2008), donde expresan que la confianza es un elemento que predice directamente la intención de adquisición de los clientes en internet, además, indican que complementar la práctica de altos estándares éticos ayuda a ganarse la lealtad transaccional de los usuarios. Otro artículo también respalda nuestros hallazgos, Pavlou (2003) sostiene que las plataformas implementadas con mecanismos de confianza cognitiva crean buenas relaciones con sus clientes e incrementan la voluntad de compra. También como se dijo anteriormente, Vela et al. (2024) sostuvieron que las estrategias de seguridad corporativa ayudan a las organizaciones a edificar las relaciones con los consumidores, además de reducir la inseguridad cognitiva. Para terminar, el estudio de Meléndez et al. (2018) respaldó nuestros hallazgos al hallar una incidencia positiva de la confianza percibida sobre la actitud y uso del comercio electrónico. En ese sentido, los resultados nos dicen que la confianza digital es un factor que predice fuertemente la intención de compra. Asimismo, son temáticas relevantes que deben ser analizadas en los sectores que contribuyen al desarrollo comercial y digital de las regiones.

Por otra parte, el componente calidad del sistema web (H1) también encontró una incidencia positiva y significativa sobre la intención de compra. Estos resultados respaldaron la investigación previa de Acosta et al. (2023), donde encontraron que la calidad del servicio electrónico tiene un efecto directo en la satisfacción y la confianza, enfatizando que un diseño web estable y funcional es fundamental para que los consumidores virtuales vuelvan a elegir la plataforma. También respalda la investigación de Meléndez et al. (2018), quienes manifestaron que el diseño del sitio influye directamente en la utilidad percibida de los clientes, por lo tanto, el factor de calidad tecnológica en las plataformas de ventas es muy percibido y debe atenderse para incrementar las transacciones.

En esa misma línea, la seguridad tecnológica (H4) también estimó un efecto significativo sobre la intención de compra. El resultado fue semejante al hallazgo de Salas-Rubio y Ábrego Almazán (2024), en el cual, sostienen que la seguridad tiene un efecto positivo en la confianza y aceptación del e-commerce. Así también, el estudio de Sánchez-Alzate y Montoya-Restrepo (2017) respalda nuestro hallazgo al destacar que la privacidad de datos es indispensable, en ese sentido, la seguridad tecnológica también es un elemento importante que estimula el consumo digital.

Asimismo, la integridad corporativa (H2) y la benevolencia (H3) mostraron una incidencia positiva y significativa sobre la intención de compra. Este resultado fue respaldado por Mayer et al. (1995) y Kim et al. (2008), en el cual mencionan que el comportamiento ético de la contraparte influye directa y positivamente en la vulnerabilidad aceptada por los clientes.

Como resultado, la integridad que las empresas generan y mantienen con los usuarios es esencial para que concreten la adquisición. Para concluir, el componente del riesgo percibido logístico y financiero (H5) también descubrió un efecto fuertemente predictivo (medido de forma restrictiva) sobre la intención de compra. Este resultado fue respaldado por Sánchez-Alzate y Montoya-Restrepo (2017), donde expresan que el riesgo funcional y financiero incide negativamente en los compradores; es decir, la capacidad de las empresas para manejar las entregas de forma confiable, mitigar estafas y proponer soluciones, estimula a que el consumidor tenga una experiencia segura, por ende, ejecuta el intercambio porque considera que se esfuerzan para cubrir sus necesidades. Para terminar, Mahmood et al. (2025) señalaron que la mitigación del riesgo multifacético es un factor muy importante para relacionarnos y consolidar la transacción con los usuarios.

En ese sentido, nuestro estudio cubre un importante vacío de investigación al ofrecer evidencia empírica de que la edificación de la confianza digital y la mitigación del riesgo juegan un papel importante al momento de generar vínculos transaccionales e intención de compra con los consumidores de comercio electrónico en entornos subnacionales de estancias emergentes.

Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman, con un respaldo estadístico, que los determinantes de la confianza digital y la mitigación del riesgo percibido son parte del mecanismo

explicativo central de la intención de compra en el comercio electrónico B2C de los nodos comerciales de Abancay y Andahuaylas. El modelo de regresión lineal múltiple validó la totalidad de las hipótesis planteadas ($F = 195.540$; $p < .001$) y alcanzó un coeficiente de determinación ajustado de 0.844: las cinco dimensiones evaluadas explican conjuntamente el 84.4% de la varianza en la disposición transaccional del consumidor apurimeño como ay se había demostrado anteriormente. Se trata de una magnitud explicativa alta, y confirma que, en ecosistemas como Apurímac, la confianza digital no es un atributo que puede pasar sin presencia, ni un valor agregado de marketing, sino el eje estructural que determina si la transacción ocurre o se abandona.

El análisis de coeficientes reveló, además, una jerarquía clara entre los determinantes. La calidad y usabilidad del sistema web $\beta = 0.295$ se erige como el predictor más fuerte del modelo, seguida de cerca por el riesgo percibido logístico y financiero $\beta = 0.253$, juntas, ambas dimensiones concentran el mayor peso explicativo de la intención de compra. La seguridad tecnológica ($\beta = 0.206$), la integridad del vendedor $\beta = 0.194$ y la benevolencia corporativa $\beta = 0.092$ completan el modelo con aportes significativos, aunque decrecientes. Este patrón retrata a un consumidor digital profundamente pragmático: antes que un vínculo afectivo con la marca busca evidencia funcional una plataforma potente que no falle y garantías concretas frente al fraude o a una entrega fallida en la última milla, un temor que se agudiza por la geografía y la distancia logística de la sierra sur.

En términos prácticos, esta jerarquía traza una ruta de inversión clara para los negocios digitales de la región: priorizar la estabilidad y usabilidad de la plataforma y los mecanismos visibles de mitigación del riesgo pasarelas de pago seguras, políticas de devolución claras, trazabilidad del envío rendirá más conversiones que las estrategias centradas únicamente en la cercanía o calidez del trato al cliente, sin que esta última, deja de ser relevante para la fidelización a largo plazo.

Se recomienda que futuras investigaciones repliquen este modelo en otras regiones subnacionales del país, incorporen diseños longitudinales que capturen la evolución de la confianza conforme el ecosistema digital madura, y exploren variables moderadoras como la alfabetización digital o la edad del consumidor. En mercados emergentes como Apurímac, la confianza digital deja de ser un discurso de marca para convertirse en

infraestructura: tan indispensable para el comercio electrónico como la conectividad o la logística misma.

Referencias bibliográficas

Acosta, K., Chávez, A., & Mauricio, M. (2023). Más allá de la venta online: De la calidad del servicio a la lealtad y boca a boca electrónicos. Contaduría y Administración, 68(4), e422. https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2023.4712

Aguilar-Herrera, L., Meneses-Claudio, B., & Carmen-Choquehuanca, E. (2023). La confianza del consumidor y el comercio electrónico en la Urbanización San Hilarión en el año 2022. *Salud, Ciencia y Tecnología - Serie de Conferencias 2023, 2*(462). https://doi.org/10.56294/sctconf2023462

Barreto, K. A., & Portilla, L. M. (2024). *Factores que influyen en la intención de compras online frente a compras físicas en Millenials, Chiclayo 2023* [Tesis de maestría, Universidad Católica Santo Toribio de Mogrovejo]. Repositorio Institucional. https://bibliotecadigital.oducal.com/Record/ir-20.500.12423-7804

Bhattacharya, S., Sharma, R. P., & Gupta, A. (2023). Does e-retailer's country of origin influence consumer privacy, trust and purchase intention? *Journal of Consumer Marketing, 40*(2), 248–259. https://doi.org/10.1108/JCM-04-2021-4611

George, D., & Mallery, P. (2020). *IBM SPSS 26 Statistics Step by Step: A Simple Guide and Reference* (16th ed.). Routledge Taylor & Francis Group.

Green, S. B. (1991). How many subjects does it take to do a regression analysis? *Multivariate Behavioral Research, 26*(3), 499–510. https://doi.org/10.1207/s15327906mbr2603_7

Hernández-Sampieri, R., & Mendoza, C. (2023). *Metodología de la investigación. Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta* (2ª ed.). McGraw Hill Interamericana.

Hernández-Sampieri, R., Méndez, S., & Mendoza, C., y Cuevas, A. (2017). *Fundamentos de investigación.* McGraw Hill Education.

Kim, D. J., Ferrin, D. L., & Rao, H. R. (2008). A trust-based consumer decision-making model in electronic commerce: The role of trust, perceived risk, and their

antecedents. *Decision Support Systems*, *44*(2), 544–564. https://doi.org/10.1016/j.dss.2007.07.001

Limas, M. A. P., & Miranda, D. E. (2022). *Factores que influyen en la decisión de compra de los consumidores en los e-commerce mediante la modalidad de la última milla en Lima Metropolitana* [Tesis de licenciatura, Universidad de Lima]. Repositorio Institucional de la Universidad de Lima. https://hdl.handle.net/20.500.12724/20165

Mahmood, H., Dinu, L., & Islam, U. (2025). Purchase Intention in e-commerce: The role of trust, customer satisfaction and extended valance framework. *International Journal on Engineering, Science, and Technology (IJonEST), 7*(2), 118–148. https://doi.org/10.46328/ijonest.5947

Mayer, R. C., Davis, J. H., & Schoorman, F. D. (1995). An integrative model of organizational trust. *The Academy of Management Review, 20*(3), 709–734. https://doi.org/10.2307/258792

Meléndez, E. I., Ábrego, D., & Medina, J. M. (2018). La confianza y el control percibido como antecedentes de la aceptación del e-commerce: Una investigación empírica en consumidores finales. *Nova Scientia*, *10*(21), 655-677. https://doi.org/10.21640/ns.v10i21.1611

Oviedo, M., & Bocanegra, C. O. (2023). Alianza del Pacífico: comercio electrónico minorista y consumidores finales. *RAN - Revista Academia & Negocios*, *9*(1), 1–12. https://doi.org/10.29393/RAN9-1APMC20001

Pavlou, P. A. (2003). Consumer acceptance of electronic commerce: Integrating trust and risk with the technology acceptance model. *International Journal of Electronic Commerce, 7*(3), 101–134. https://doi.org/10.1080/10864415.2003.11044275

Sánchez-Alzate, J. A., & Montoya-Restrepo, L. A. (2017). La confianza como elemento fundamental en las compras a través de canales de comercio electrónico. Caso de los consumidores en Antioquia, Colombia. *Innovar, 27*(64), 11-22. https://doi.org/10.15446/innovar.v27n64.62365

Vela, J. B., Olmedo, C. N., & Ibarra-Cisneros, M. A. (2024). E-commerce: experiencia, seguridad, confianza y satisfacción. *Investigación Administrativa*, *53*(133), 1-18. https://doi.org/10.35426/iav53n133.05

Capítulo VII

Experiencia del cliente como impulsora de la lealtad en el e-commerce: revisión analítica de la literature

Customer experience as a driver of loyalty in e-commerce: an analytical review of the literature

Luis Porras Durand
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
lporras@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0003-2802-4429
Apurímac, Perú

Jeferson Ccorisapra Quintana
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
jccorisapra@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-2968-8297
Apurímac, Perú

Edison Vega Otazu
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
evega@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0009-0004-1233-8065
Apurímac, Perú

Silvia Soledad Lopez Ibañez
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
slopez@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-5815-8906
Apurímac, Perú

Medalit Villegas Casaverde
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
mvillegasc@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0001-7408-1980
Apurímac, Perú

Resumen

La investigación se presenta con el propósito de comprender la relación entre la experiencia del cliente CX y fidelización en el sector del comercio electrónico, además de determinar las estrategias digitales modernas empleadas por los empresarios para consolidar la lealtad de sus clientes. Por ello se desarrolló una investigación cualitativa, descriptiva y no experimental-transversal; la búsqueda bibliográfica se desarrolló a través de la base de datos de Scopus durante mayo de 2026, pero se consideraron publicaciones del período 2022 al 2026. Se inició con 267 artículos identificados, de los cuales, por criterios de exclusión, se seleccionaron 25 estudios para el análisis. Los resultados evidencian una correlación estable entre la experiencia del cliente CX y la fidelización en el comercio electrónico. Además, se descubrió que el valor percibido y la satisfacción funcionan como componentes relevantes de esta relación. Se destacan entre las principales estrategias la atención al cliente, los chatbots, la IA, las promociones, los descuentos, y los programas de lealtad. En conclusión, entre mayor sea la experiencia positiva del cliente, se genera mayor fidelización en sus clientes; por lo que se proponen estrategias modernas y con acciones concretas para aumentar la cartera de clientes en el comercio online.

Palabras clave: Experiencia del cliente, fidelización, comercio electrónico.

Abstract

This research aims to understand the relationship between customer experience (CX) and loyalty in the e-commerce sector, as well as to identify the modern digital strategies employed by business owners to strengthen customer loyalty. To this end, a qualitative, descriptive, and non-experimental cross-sectional study was conducted; the literature search was carried out using the Scopus database in May 2026, covering publications from the 2022–2026 period. Starting with 267 identified articles, 25 studies were selected for analysis based on exclusion criteria. The results demonstrate a consistent correlation between customer experience (CX) and loyalty in e-commerce. Furthermore, perceived value and satisfaction were found to be significant components of this relationship. Key strategies identified include customer service, chatbots, AI, promotions, discounts, and loyalty programs. In conclusion, a more positive customer experience fosters greater customer loyalty; therefore, modern strategies involving concrete actions are proposed to expand the customer base in online commerce.

Keywords: Customer experience, loyalty, e-commerce.

Introducción

A nivel internacional, las empresas han reconocido la importancia de incorporar el comercio electrónico, ya que estimula la mejora en la difusión de productos y servicios, reduciendo costos y automatizando la gestión comercial (Gomez-Pino et al., 2023). El e-commerce se ha consolidado la última década como uno de los canales de venta más activos y dinámicos a nivel global, modificando la forma de las empresas para relacionarse con sus clientes. Para Zhang et al. (2025) indican que el crecimiento fue impulsado inicialmente por la pandemia de la COVID-19, sostenido posteriormente por la digitalización de los hábitos de consumo, situación que se generó como un factor clave y determinante en la competitividad empresarial (Mouamine, 2026). La industria del comercio electrónico se caracteriza por una dura competencia; retener a los clientes existentes es de suma importancia (Antonius et al., 2023). La experiencia del comprador en un entorno digital abarca cada punto de contacto entre el consumidor y la empresa, lo que la convierte en un aspecto central para lograr la satisfacción y la lealtad del usuario (López-Macías, 2025).

Asimismo, el principal impulso a la transformación digital es el mayor acceso a internet y el cambio de los patrones de consumo, principalmente entre los jóvenes, por lo que, dentro de este contexto, se han generado variables como la satisfacción, la confianza y el boca a boca (WOM), factores clave que explican la lealtad del consumidor en entornos digitales (Amadeo-Mateus et al., 2025). Por ello, las empresas de comercio electrónico suelen adoptar tácticas de marketing digital para consolidar la lealtad del cliente, como las promociones, los descuentos, la calidad del producto y el soporte al cliente, que fueron reconocidos como importantes para dar forma a la experiencia positiva del cliente. (Antonius & Rembulan, 2023)

El análisis de los factores de fidelización de clientes en el comercio electrónico resulta fundamental para la planificación estratégica, ya que la retención de clientes requiere una investigación exhaustiva, particularmente en lo que corresponde al comportamiento de compra en línea (Juanli et al., 2025). La lealtad de los clientes se refiere a la fidelidad y el apego que los clientes tienen hacia una marca, producto o servicio y refleja el resultado de las experiencias positivas, satisfacción, confianza y relación que se crea entre clientes y empresa (Antonius & Rembulan, 2023).

Estado del arte

Durante la revisión exhaustiva de estas temáticas, se obtuvieron como evidencias en distintos países: En el denominado "Cómo es la Experiencia de comercio electrónico de Pinduoduo influye en la satisfacción y la fidelización del cliente: Aprovechamiento de las redes sociales" esta investigación buscó subsanar las deficiencias evaluando los efectos directos del nivel de calidad de la interfaz de cliente, la calidad de la información, la privacidad y los riesgos de seguridad en la confianza y la satisfacción del cliente, así como sus efectos indirectos en la fidelización y obtuvo que los resultados contribuyen a una comprensión más profunda de la actitud del usuario en el mercado de los e-comerce chinos, proporcionando valiosas perspectivas teóricas para las empresas que buscan mejorar su competitividad y fidelizar a sus clientes(Zhang & Chai, 2025). Por otra parte, en el siguiente estudio "El efecto condicional de la estética de las cajas de envío en la mejora del disfrute (2020)" el estudio contribuye a demostrar los beneficios potenciales de proporcionar a los clientes valor experiencial en la etapa posterior a la compra en línea, a través de cajas de envío estéticamente atractivas y se comprobó el efecto del posicionamiento de marca, el tipo de producto y la precisión del pedido (Schnurr & Wetzels, 2020). También en "Análisis de los factores clave para mejorar la experiencia, el comportamiento y la lealtad del cliente en la industria del comercio electrónico en indonesia", este estudio presenta el objetivo de maximizar los conocimientos en cerrar brechas existentes de la experiencia CX y el compromiso para reforzar la lealtad del comprador, con ello se espera que el comercio electrónico pueda diseñar nuevas estrategias más efectivas y enfocadas a optimizar el compromiso y fortalecer la lealtad del cliente. Asimismo, busca desarrollar factores tecnológicos y cambios en el comportamiento del consumidor digital, la contribución de este estudio proporciona una guía para las empresas que puedan implementar valor con el potencial de influir positivamente en la experiencia y lealtad del cliente (Antonius et al., 2023).

La finalidad de este documento es investigar nuevas tácticas digitales más importantes que las compañías pueden emplear para optimizar la experiencia del cliente y, al mismo tiempo, promover la lealtad en los sistemas de comercio electrónico. en la ciudad de Abancay, considerando la influencia de la atención al cliente, la inteligencia artificial y el marketing digital.

Experiencia del cliente

La experiencia del cliente es un conjunto multidimensional de respuestas cognitivas, emocionales, físicas, sensoriales y sociales evocadas a través de interfaces que pueden ser humanas o no humanas (Keiningham et al., 2020). Además, el valor de la compra se basa en facetas tanto hedónicas como utilitarias, que en conjunto dan forma a las evaluaciones del recorrido (Merle et al., 2022). Sintetizando la literatura, Rajala et al. (2025) subrayan que la experiencia cliente es personal y holística porque los puntos de contacto y las etapas del recorrido interactúan para generar significado. Steffen & Doppler (2020) agregan que esta naturaleza interaccional hace que cada experiencia sea única.

Fidelización

La lealtad del cliente, definida como la compra repetida y sostenida acompañada de un compromiso actitudinal, sigue siendo fundamental en los mercados digitales donde los costos de cambio son mínimos (Pires et al., 2025a). Según indican (Williams, et al., 2020), un conjunto de estudios identifica circunstancias en las que la experiencia ejerce una influencia directa sobre la lealtad y sostiene que los episodios memorables fomentan vínculos emocionales que trascienden la mera satisfacción. En entornos altamente competitivos, elementos experienciales distintivos, como la rápida resolución de problemas, pueden diferenciar una plataforma de otra a pesar de niveles de satisfacción comparables

Comercio electrónico

Según Kotler & Armstrong (2017), el comercio electrónico se refiere a canales en línea accesibles a través de computadores utilizados por las empresas para realizar actividades comerciales y por los consumidores para buscar información sobre sus servicios. Asimismo, se puede interpretar que el comercio electrónico es una combinación dinámica de tecnología, aplicaciones y procesos de negocios que conectan a empresas, consumidores y comunidades específicas para intercambiar bienes.

Metodología

Este artículo se realizó bajo el enfoque de ruta cualitativa porque buscó examinar e interpretar la evidencia científica existente sobre la experiencia del cliente y la fidelización en el comercio electrónico, asimismo, permite la discusión de las investigaciones, identificar similitudes y diferencias entre los resultados, reconocer

tendencias en la investigación y señalar áreas donde falta conocimiento. Con un nivel descriptivo, ya que su propósito es sistematizar y describir la evidencia científica existente sobre las variables mediante un estudio de investigaciones publicadas con anterioridad, sin alterar las variables, por lo que posibilita entender la situación y detectar vacíos de investigación que guiarán a estudios posteriores. De diseño no experimental – transversal, ya que la revisión de la literatura extraída se realizó durante un único periodo del mes de mayo de 2026 de las fuentes de Scopus, con un total de 267 artículos inicialmente, pero se aplicaron filtros y criterios de exclusión que llegaron a 25 artículos analizados.

Tabla 1

Criterios de búsqueda

Criterios de búsqueda	
Ecuación de búsqueda	TITLE-ABS-KEY ("Customer experience" AND "loyalty" AND "e-commerce") AND (LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Customer Experience") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "E-commerce") OR LIMIT-TO (EXACTKEYWORD, "Customer Loyalty") AND (LIMIT-TO (SUBJAREA , "BUSI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE , "ar") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "cp") OR LIMIT-TO (DOCTYPE , "ch")) AND PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025
Área de conocimiento	Customer experience, customer loyalty and e-commerce.
Tipos de documentos	Artículos, conference paper, review, conference review, capítulos de libro.
Etapa de publicación	Finales publicaciones y artículos en proceso de impresión.
Años	2022 - 2026

Nota. Elaboración propia.

El instrumento de la revisión literaria corresponde a un registro documentario que se muestra a continuación en la tabla 1. Revisión Literaria sobre Experiencia del Cliente y Fidelización en el sector del Comercio Electrónico.

Resultados

Tabla 2

Sistematización de la dimensión y resultados de búsqueda de las categorías experiencia del cliente y fidelización

	AUTOR/AÑO	OBJETIVO	METODOLOGÍA	PRINCIPALES HALLAZGOS	RESULTADOS
1	(Nguyen , Nguyen, & Voak, 2026)	Identificar los factores que explican la formación de la lealtad electrónica en el comercio electrónico chino y determinar cómo dicha lealtad influye en: la intención de recompra, la recomendación boca a boca.	Cuestionario estructurado en escala Likert de 7 puntos y distribuida por WeChat; Análisis mediante SPSS y AMOS utilizando PLS-SEM (Modelado de Ecuaciones Estructurales).	La seguridad percibida tuvo el mayor efecto sobre la confianza electrónica de los consumidores. El disfrute percibido influyó positivamente en la satisfacción, el valor percibido, la lealtad e intención de recompra. <	La lealtad electrónica influye significativamente en la intención de recompra y en el boca a boca. La satisfacción del cliente y el valor percibido fortalecen la fidelización y la confianza electrónica es clave para mantener relaciones duraderas con consumidores online.
2	(Pires, Perestrelo, & Duarte Santos, 2025)	Examinar y cuantificar las relaciones entre Customer Effort Score (CES), Customer Experience (CX), Customer Satisfaction (CSAT), Customer Loyalty Index (CLI) y Net Promoter Score (NPS) en el e-comercio.	Encuesta en línea y análisis PLS-SEM.	Todas las relaciones hipotetizadas fueron positivas y significativas; la reducción del esfuerzo mejora la experiencia, satisfacción, lealtad y recomendación.	CES influye positivamente en CX; CX incrementa CSAT; CSAT mejora CLI y NPS. La satisfacción media la relación entre experiencia y lealtad/promoción.
3	(Pires, Perestrelo, & Santos, 2025)	Analizar cómo los atributos de las interfaces de comercio electrónico influyen en la experiencia del cliente, satisfacción, lealtad y eWOM.	Encuesta online mediante Google Forms y análisis PLS-SEM con SmartPLS 4.	La interactividad y tecnología, la confianza, seguridad y privacidad, y la calidad del servicio fueron los principales antecedentes de la experiencia del cliente. La experiencia del cliente se relacionó fuertemente con la satisfacción y esta con la lealtad.	El modelo explicó el 62,6% de la experiencia del cliente, 70,1% de la satisfacción y 66,7% de la lealtad. No se encontraron relaciones significativas entre satisfacción/eWOM y experiencia/eWOM.

4	(Tran, 2025)	Analizar los avances recientes en técnicas de optimización de la entrega de última milla y las tecnologías futuras aplicadas a la logística urbana	Revisión de métodos de programación lineal, metaheurísticas, inteligencia artificial, optimización basada en experiencia y técnicas de ahorro energético.	Las técnicas basadas en IA, algoritmos genéticos, drones autónomos y sistemas inteligentes de recepción mejoran la eficiencia, sostenibilidad y satisfacción del cliente en la entrega de última milla.	Se identificó que la optimización logística permite reducir costos, mejorar tiempos de entrega y minimizar el impacto ambiental, contribuyendo a una mejor experiencia del cliente y crecimiento sostenible.
5	(Zhang & Chai, 2025b)	Identificar los factores que afectan la satisfacción, confianza y fidelización de los consumidores en la plataforma Pinduoduo.	Encuesta online con escala Likert de 7 puntos y análisis mediante SmartPLS 4.	La calidad de la interfaz, calidad de la información, seguridad y privacidad influyen positivamente en la satisfacción y confianza del cliente; además, la satisfacción y confianza fortalecen la fidelización.	El estudio confirmó relaciones positivas entre experiencia de comercio electrónico, satisfacción, confianza y lealtad del cliente, destacando la importancia de mejorar la experiencia digital en plataformas de e-commerce.
6	(Masnun et al., 2026)	Analizar el impacto de la inteligencia artificial, la hiperpersonalización, la experiencia del cliente y la confianza electrónica sobre la lealtad electrónica en el comercio electrónico indonesio.	Encuesta en línea mediante muestreo intencional. Análisis de datos mediante PLS-SEM con SmartPLS. Se evaluaron validez, confiabilidad, coeficientes de determinación (R^2), tamaño del efecto (F^2) y prueba de hipótesis por bootstrapping.	La IA influye significativamente en la CX y en la hiperpersonalización. La CX favorece a la hiperpersonalización y lealtad electrónica. La hiperpersonalización incrementa la fidelización cuando genera experiencias relevantes y personalizadas	De las 12 hipótesis planteadas, 10 fueron aceptadas y 2 rechazadas. La confianza electrónica no moderó la relación entre hiperpersonalización y lealtad electrónica. Asimismo, la IA no tuvo un efecto indirecto significativo sobre la lealtad a través de la hiperpersonalización.
7	(Kalayci et al.,	Analizar en qué	Se aplicó un	Los consumidores prefieren más	En la fase inicial del recorrido

	2024)	circunstancias los consumidores prefieren las tiendas online directas al consumidor (D2C) frente a minoristas digitales multimarca durante las diferentes etapas del recorrido del cliente.	experimento online donde los participantes eligieron entre tiendas D2C y minoristas multimarca. Se utilizaron modelos logit para analizar la probabilidad de elección de canal.	las tiendas D2C cuando los productos tienen alta personalización, exclusividad, amplitud de surtido o necesidad de información detallada. Además, la preferencia por D2C aumenta en las fases de búsqueda y compra.	del cliente, los minoristas multimarca dominan (80%). Sin embargo, en las fases de búsqueda y compra, las tiendas D2C alcanzan e incluso superan la preferencia de los consumidores (58% frente a 42%).
8	(Mouamine, 2026)	Mapear y sintetizar la estructura intelectual, la evolución temática y la representación de las modalidades sensoriales en la investigación sobre inteligencia artificial aplicada a la experiencia del cliente y al marketing digital durante el período 2004-2025.	Se utilizó una metodología basada en el protocolo PRISMA. Los datos fueron obtenidos de Scopus y procesados mediante Python, analizados mediante técnicas bibliométricas, Se examinaron variables como sectores de aplicación, modalidades de IA, etapas del recorrido del cliente, resultados de marketing y dimensiones sensoriales.	La producción científica sobre IA y experiencia del cliente ha crecido significativamente en las últimas dos décadas. Predominan las investigaciones en comercio electrónico, banca, finanzas y turismo. Las tecnologías más estudiadas son los chatbots, sistemas de recomendación, procesamiento del lenguaje natural y análisis de sentimientos. Existe una marcada concentración en estímulos visuales y auditivos.	Los hallazgos muestran que la IA mejora la personalización, la satisfacción, el compromiso, la confianza y la fidelización del cliente. Sin embargo, persisten importantes vacíos teóricos y metodológicos relacionados con la integración del marketing sensorial en entornos digitales. El estudio propone una agenda futura de investigación orientada al desarrollo de experiencias multisensoriales impulsadas por IA y a una comprensión más integral del comportamiento del consumidor.
9	(Amadeo-Mateus,	Analizar la influencia e interacción de la	Se aplicó un cuestionario	Los resultados demostraron que la satisfacción del cliente es el	Se confirmaron 7 de las 8 hipótesis planteadas. La

	Guzmán-Rinc, & Ortega-Almonacid, 2025)	experiencia del cliente, la satisfacción, la confianza y el boca a boca (WOM) sobre la intención de recompra en línea entre estudiantes universitarios colombianos, utilizando la Teoría del Comportamiento Planificado (TPB) como marco teórico.	estructurado con escalas validadas para medir experiencia del cliente, satisfacción, confianza, WOM e intención de recompra. Los datos fueron analizados mediante un modelo de ecuaciones estructurales basado en covarianza (CB-SEM), análisis factorial confirmatorio (AFC) y técnica de bootstrapping con 2000 muestras para validar las hipótesis propuestas.	predictor más fuerte de la intención de recompra. Asimismo, la experiencia del cliente influye significativamente sobre la satisfacción y el boca a boca. El WOM fortalece la confianza y contribuye indirectamente a la recompra. Contrariamente a lo esperado, la confianza no presentó un efecto directo significativo sobre la intención de recompra.	satisfacción, el WOM y la experiencia del cliente explicaron gran parte de la intención de recompra. El modelo explicó el 78,2 % de la varianza de la intención de recompra, evidenciando un alto poder predictivo. Además, la satisfacción explicó el 51,3 % de la varianza de la confianza y, junto con la experiencia, explicó el 73 % del WOM.
10	(Ledro et al., 2023)	Analizar los desafíos de la integración de la inteligencia artificial (IA) en la gestión de relaciones con clientes (CRM) desde diferentes etapas de implementación y perspectivas organizacionales.	Se realizaron entrevistas semiestructuradas, análisis temático y análisis de contenido utilizando ATLAS.ti. Además, se aplicó triangulación de datos y muestreo teórico.	El estudio identificó once desafíos clave en la integración IA-CRM, incluyendo cultura basada en datos, ética, gestión del cambio, calidad de datos, transferencia de conocimiento, colaboración interdisciplinaria, confianza del usuario y transformación de competencias laborales.	Los resultados muestran que el éxito de la integración IA-CRM depende de objetivos claros, participación activa de áreas de negocio, capacitación continua, gobernanza de datos y colaboración entre expertos técnicos y comerciales. Además, las organizaciones deben adoptar una cultura centrada en el cliente y la toma de decisiones basada en datos.

11	(Dr. Mariyappan N, Dr. Bhuvaneswari D, Dr. Shankargouda Lakkangoudra, Dr. Geetha CJ y Dr. Gagana V (2025),	Analizar cómo la facilidad de uso, calidad de la información, tiempo de respuesta y personalización de los chatbots influyen en la satisfacción del cliente en compras online, considerando la utilidad percibida como variable mediadora.	Se aplicaron cuestionarios estructurados a consumidores online. Los datos fueron analizados mediante IBM y SPSS utilizando análisis porcentual, chi-cuadrado, regresión y ANOVA.	La facilidad de uso, personalización y tiempo de respuesta es de gran importancia en la utilidad percibida y satisfacción del cliente. El tiempo de respuesta mostró el mayor impacto estadístico.	El modelo de regresión mostró una relación positiva moderadamente fuerte (R=0.614) y explicó el 37.8% de la variación en la satisfacción del cliente. Además, la utilidad percibida tuvo un efecto significativo sobre la satisfacción del cliente (p=0.000).
12	(G. A. Ogunmola y V. Kumar (2023)	Proporcionar un análisis detallado de los modelos y paradigmas de investigación del comercio electrónico, identificando factores determinantes para el éxito del e-commerce.	Se realizó una búsqueda en bases de datos académicas como Google Scholar, EBSCO, ACM Digital Library y ScienceDirect utilizando descriptores relacionados con modelos de comercio electrónico y éxito de sistemas de información.	El éxito del comercio electrónico depende de múltiples factores: calidad del sistema, calidad de información, confianza, facilidad de uso, satisfacción del cliente, utilidad percibida, experiencia del usuario y comportamiento del consumidor. Además, no existe un único modelo universal para explicar el éxito del e-comerce debido a la naturaleza dinámica del entorno digital.	El estudio identificó modelos clave como D&M IS Success Model, TAM, TRA/TPB, MEC, Prospect Theory y AHP. También concluyó que las estrategias exitosas de comercio electrónico requieren integrar factores tecnológicos, conductuales y organizacionales para mejorar la experiencia y fidelización del cliente.
13	(Vebrianti et al., 2025)	Examinar el impacto del tiempo de respuesta, calidad de la información, utilidad percibida y facilidad de uso percibida en la satisfacción y lealtad del cliente hacia los chatbots en el comercio electrónico.	Se aplicaron encuestas y se analizaron mediante PLS-SEM utilizando pruebas de confiabilidad, validez convergente,	El tiempo de respuesta, calidad de información, utilidad percibida y facilidad de uso influyen significativamente en la satisfacción del usuario. A su vez, la satisfacción fortalece la lealtad del cliente hacia las plataformas de e-commerce.	El modelo mostró un buen ajuste (SRMR=0.065; GoF=0.593). La satisfacción del cliente alcanzó un R^2=0.689 y la lealtad del cliente un R^2=0.517, indicando capacidad predictiva moderada-alta. Los autores concluyen que optimizar chatbots mejora la experiencia, retención y

			HTMT, VIF, SRMR y R^2 para evaluar las relaciones entre variables.		fidelización del cliente en el comercio electrónico.
14	Nazgul Aidargaliyeva, Meirambala Seisekenova y Elmira Kydyrbayeva (2025)	Evaluar las oportunidades para mejorar la optimización de las ventas online en las PYMES mediante la integración del e-commerce y el marketing digital.	Se aplicaron métodos de comparación, prospección, sistematización, abstracción, análisis descriptivo y representación gráfica/tabular. Los cálculos fueron realizados en Microsoft Excel utilizando datos estadísticos oficiales.	Las PYMES incrementaron progresivamente su participación en el PIB de Kazajistán y el comercio electrónico mostró un crecimiento acelerado. Las redes sociales, SEO, marketing de contenidos, CRM e inteligencia artificial son herramientas clave para aumentar ventas y competitividad. Sin embargo, tecnologías avanzadas como IA y realidad aumentada aún presentan limitaciones financieras para muchas PYMES.	El e-commerce minorista en Kazajistán alcanzó 3.156,4 mil millones de tenge en 2024 y representó el 16,6% del comercio minorista total. El 76% de la población utilizó redes sociales en 2024 y se proyecta superar el 90% en 2028. El estudio concluye que integrar comercio electrónico, marketing digital y tecnologías digitales mejora la competitividad y crecimiento de las PYMES.
15	Ashwini Ranjan y Ashwani Kumar Upadhyay (2024)	Comprender cómo los chatbots y estilistas personales virtuales impulsados por IA generan valor, transforman la experiencia de compra y modifican el comportamiento del consumidor en el comercio electrónico de moda.	Se realizaron entrevistas semiestructuradas mediante Zoom a consumidores digitales. Las entrevistas fueron grabadas, transcritas, codificadas y analizadas temáticamente utilizando un enfoque deductivo.	Los chatbots y estilistas virtuales aportan conveniencia, ahorro de tiempo, personalización y confianza durante las compras online. Los usuarios valoran las recomendaciones inteligentes y la accesibilidad, aunque persisten limitaciones relacionadas con retrasos, falta de empatía humana, privacidad y comprensión contextual.	El estudio concluye que los consumidores consideran a los chatbots como herramientas útiles para investigación y apoyo en decisiones de compra. Además, se destaca la necesidad de mejorar la personalización, la interacción emocional, las respuestas en tiempo real y la compatibilidad multimodal para fortalecer la confianza y la experiencia del usuario en el comercio electrónico de moda.

16	(Zhang & Chai, 2025b)	Reconocer los factores que influyen en la satisfacción, confianza y fidelización del cliente en la plataforma de comercio electrónico Pinduoduo.	Se utilizó SmartPLS 4 para evaluar el modelo estructural y las hipótesis. Se aplicaron pruebas de fiabilidad, validez convergente, discriminante y análisis de factores como calidad de interfaz, calidad de información, privacidad y seguridad percibida.	La calidad de la interfaz de usuario, de información, la percepción de seguridad y privacidad influyen significativamente en la agrado y confianza del cliente. Además, la satisfacción y la confianza generan mayor fidelización en la plataforma.	El modelo mostró buen ajuste estadístico (SRMR = 0.069; NFI = 0.814). Las hipótesis relacionadas con la calidad de la información, la satisfacción y la confianza fueron significativas ($p < 0.001$). El estudio concluye que mejorar la experiencia de usuario, seguridad y privacidad fortalece relaciones duraderas y lealtad del cliente en Pinduoduo.
17	Sookhdeo y Moodley (2024)	Explorar cómo las características de personalización impulsadas por IA influyen en la intención de compra (PI), intención de recompra (RPI) y lealtad del cliente (LO) en plataformas de comercio electrónico.	Se aplicó una encuesta digital con escala Likert de 5 puntos. Los datos fueron analizados mediante análisis factorial exploratorio (AFE), análisis factorial confirmatorio (AFC) y modelado de ecuaciones estructurales (SEM) usando IBM SPSS y AMOS.	La ventaja relativa de la personalización impulsada por IA y la voluntariedad de uso influyen positivamente en la intención de compra, recompra y lealtad del cliente. Sin embargo, la utilidad percibida y facilidad de uso no mostraron efectos significativos en algunos casos. También se destacó la importancia de privacidad, control de datos y personalización emocional.	El estudio concluye que las plataformas de e-commerce impulsadas por IA deben priorizar personalización, control del usuario sobre sus datos, facilidad de interacción y recomendaciones relevantes para fortalecer satisfacción, intención de compra y fidelización. Además, se recomienda mejorar experiencias emocionales y transparencia en privacidad para aumentar la confianza del consumidor.
18	Tuong Cat Tran Pham y colaboradores (2025)	Analizar cómo los atributos de los chatbots de IA influyen en la satisfacción y fidelización de clientes de la Generación Z en	Se aplicó una encuesta online en escala Likert de 7 puntos. El muestreo fue por	La personalización, calidad del sistema, calidad de información y usabilidad incrementan significativamente la satisfacción del cliente. La	El modelo explicó el 57.5% de la varianza de satisfacción del cliente (R^2=0.575) y el 24.9% de la fidelización (R^2=0.249). La personalización tuvo el mayor

		plataformas de comercio electrónico.	juicio/intencional. Los datos se analizaron mediante PLS-SEM, bootstrap con 5000 submuestras, pruebas de confiabilidad, validez convergente, discriminante, VIF, R^2 y Q^2.	satisfacción influye fuertemente en la fidelización. En cambio, interactividad, experiencia y propiedad psicológica no mostraron efectos significativos en la satisfacción de la Generación Z.	impacto positivo sobre satisfacción (β=0.552; $p<0.05$). Además, la satisfacción del cliente influyó significativamente en la lealtad (β=0.499; $p<0.001$).
19	(Antonius & Rembulan, 2023)	Identificar los factores clave que influyen en la experiencia del cliente, el engagement y la lealtad en la industria del e-commerce en Indonesia, generando recomendaciones prácticas de implementación para empresas del sector.	Enfoque cualitativo con estudio de caso explicatorio; entrevistas en profundidad a consumidores de alto nivel de involucramiento. Se analizaron narrativas, percepciones y expectativas del cliente sobre la experiencia digital. Adicionalmente se empleó el enfoque de expectativas del cliente para comparar factores existentes con las aspiraciones de los usuarios.	*1.Experiencia:* los factores más determinantes fueron promociones/descuentos, calidad en el producto, interfaz amigable, velocidad de respuesta, variedad de productos, reseñas, calificaciones, y características especiales *2.Engagement:* disponibilidad de productos, precios competitivos, y eventos/ventas relámpago. *3. Lealtad:* programas con beneficios exclusivos, satisfacción y confianza, plataforma.	El estudio confirmó que las empresas de e-commerce deben atender las brechas identificadas para mejorar la experiencia y fortalecer la lealtad. Las recomendaciones concretas incluyen: implementar live chat con vendedores, desarrollar personalización de contenido basada en preferencias, mejorar tiempos de respuesta y velocidad de página, priorizar la seguridad de datos y ampliar las recomendaciones personalizadas durante el engagement. Estas acciones permitirían a las plataformas obtener ventaja competitiva sostenible en un mercado altamente dinámico.
20	Canh Chi Hoang & Bui Thanh Khoa / 2024	Investigar empíricamente cómo las dimensiones clave de las reseñas y	Encuesta online estructurada con escalas tipo Likert.	1.La cantidad de reseñas (H1), consistencia (H2), expertos del revisor (H3) y calificación del	Las cuatro hipótesis fueron aceptadas. Expertos del revisor mostró el mayor impacto (β =

		calificaciones en línea — cantidad, consistencia, expertos del revisor y valoración del producto/servicio— influyen en la satisfacción y lealtad del cliente dentro de los mercados electrónicos (e-Marketplace).	Los datos fueron procesados con SPSS 25.0 aplicando estadísticas descriptivas, Alfa de Cronbach, Análisis Factorial Exploratorio (EFA) y análisis de regresión múltiple.	producto/servicio (H4) tienen impacto positivo y significativo sobre la experiencia del cliente. 2. El modelo explicó el 61.3% de la varianza en experiencia del cliente (R^2= 0.613). 3. No se detectaron problemas de multicolinealidad (VIF < 10).	0.320), seguido de la calificación del producto (β = 0.270), consistencia de reseñas (β = 0.213) y cantidad de reseñas (β = 0.209). Se recomienda a los operadores de e-Marketplace optimizar sus sistemas de reseñas y calificaciones para mejorar la satisfacción y fidelización del cliente.
21	Valeria Belvedere, Elisa Martina Martinelli y Annalisa Tunisini / 2021.	Analizar las condiciones bajo las cuales la implementación de una estrategia integrada de conductos en línea y fuera de ella (omnichannel) permite a las empresas tradicionales ("brick and mortar") obtener beneficios de optimización en los procesos de marketing y ventas, así como en la gestión de la cadena de suministro (SCM).	Revisión de la literatura seguida de una validación teórica mediante un método Delphi y un grupo de enfoque con los 10 expertos; posteriormente, se aplicó un protocolo de entrevistas semiestructuradas de forma directa a los gerentes de marketing y de la cadena de suministro de cada una de las cuatro empresas estudiadas.	Se validó un marco conceptual basado en dos factores esenciales (canal de distribución principal y densidad de valor del producto), lo que permitió identificar cuatro arquetipos de enfoque empresarial: enfoque de Oportunidad (Luxottica), enfoque de Luces y Sombras (Henkel), enfoque En busca de una estrategia (Ferragamo) y enfoque de Necesidad (Ikea).	Se determinó que las plataformas de comercio electrónico son altamente valiosas para recolectar información en tiempo real sobre la demanda en canales indirectos, mientras que los productos de baja densidad de valor (como muebles o productos del hogar) requieren de soluciones logísticas alternativas y eficientes de última milla (como el *Click&Collect*) para salvaguardar la rentabilidad debido al alto costo de transporte.
22	(Schnurr & Wetzels, 2020).	Proponer y comprobar que el impacto que tiene la estética visual de las cajas de envío sobre las intenciones de lealtad de los clientes depende estrictamente de sus	Realización de un estudio de campo inicial mediante el análisis de registros visuales en internet de las prácticas de empaque de	Las cajas de envío estéticamente atractivas incrementan la lealtad de los clientes al generar una experiencia de entrega más disfrutable; sin embargo, este efecto solo funciona cuando el cliente compra a marcas de valor	Se demostró la existencia de un efecto condicional donde los empaques atractivos pierden impacto emocional ante marcas de lujo o productos hedónicos (donde las expectativas ya son altas de por sí) y se revierte

		expectativas afectivas previas, aplicando el Modelo de Expectativas Afectivas.	grandes empresas; posteriormente, se ejecutaron tres diseños experimentales controlados.	económico, cuando el producto es de tipo funcional y cuando el artículo recibido coincide con la descripción del sitio web.	negativamente si el pedido entregado contiene errores, evidenciando la interrelación de los puntos de contacto en la fase de poscompra dentro del comercio electrónico.
23	Jagdish N. Sheth (2021)	Analizar el futuro del comercio minorista físico frente a la disrupción del comercio electrónico y proponer cómo este sector puede sobrevivir y prosperar mediante su reposicionamiento estratégico.	Enfoque cualitativo basado en una revisión histórica de las fases evolutivas del comercio combinada con el análisis de teorías tradicionales del retail y la formulación de propuestas de adaptación tecnológica pos-COVID-19.	Se determinó que las tiendas físicas no van a desaparecer, sino que deben transformarse adoptando alta tecnología en sus tiendas y migrando de la simple venta de mercancías hacia el ofrecimiento de servicios de valor agregado por los cuales el consumidor esté dispuesto a pagar.	El estudio propone un modelo de reposicionamiento que consta de ocho recomendaciones estratégicas de servicios de valor añadido (tales como financiamiento, programas de lealtad inteligentes y suscripciones) y siete estrategias de retail inteligente de alta tecnología (como cajas automáticas, espejos inteligentes y asistentes robóticos).
24	(Gomez-Pino L. B., Huerta-Vilca, Cordova-Buiza, & Maqguiña-Rivero, 2023)	Conocer las acciones implementadas por la gestión administrativa de corporaciones internacionales en lo que respecta a la inversión en comercio electrónico y la mejora de la fidelidad de sus consumidores	Se utilizó la técnica de análisis documental aplicada a los reportes corporativos anuales de las empresas seleccionadas. La información recolectada se sintetizó mediante procedimientos de reducción de datos evaluando cinco dimensiones	Se halló que las estrategias orientadas a promover el e-commerce y la lealtad del cliente impulsan satisfactoriamente la transformación digital a largo plazo cuando la gestión administrativa se enfoca de manera directa en la adquisición y satisfacción del usuario.	Los análisis arrojaron que el 54% de las inversiones en gestión empresarial mantuvieron un enfoque de atracción mediante e-commerce; el 57% de los recursos se destinó al diseño de planes de marketing en sitios oficiales; el 54% de la escala de incentivos se enfocó en ofertas para fechas conmemorativas; el 61% destacó la relevancia del reconocimiento de la experiencia de compra digital; y el 47% de la inversión se centró en fortalecer el cumplimiento

			específicas de la lealtad (comunicación, marketing, incentivos, experiencia e información).		del deber de idoneidad del producto o servicio.
25	(Antonius & Rembulan, 2023)	Explorar y comprender la intrincada interacción que existe entre la fidelidad, el compromiso (engagement) y la experiencia del consumidor en las plataformas de e-commerce con el fin de proveer estrategias prácticas e implementables para las empresas del sector.	Enfoque cualitativo a través de estudios de caso explicativos donde se recolectaron datos primarios profundos de los informantes mediante entrevistas. Adicionalmente, el diseño metodológico innovó al fusionar el estudio de las expectativas tradicionales del cliente con análisis contextuales de narrativas de los usuarios altamente involucrados.	Se descubrió que elementos como los descuentos, cupones y la promoción de envío gratuito reducen gastos y fomentan la retención del cliente. Asimismo, la total ausencia de fraudes en las transacciones y la uniformidad en la calidad de los productos suministrados demostraron ser factores vitales para construir y asegurar la confianza del consumidor.	Se identificaron y categorizaron formalmente los cuatro factores primordiales que dan forma a una experiencia de cliente positiva en e-commerce: 1) Promociones y descuentos; 2) Calidad del producto y confianza; 3) Conveniencia en la transacción y herramientas de soporte (como la búsqueda de artículos por fotos); y 4) Amplia gama de productos junto con la facilidad de búsqueda dentro de la plataforma. De forma complementaria, se estableció un esquema de cuatro factores clave para la retención digital: programas de lealtad atractivos, experiencias personalizadas, campañas a la medida del usuario e interacción constante mediante redes sociales.

Discusión

En cuanto al primer objetivo que busca establecer si la experiencia del cliente está vinculada con la fidelización en el comercio electrónico, la literatura revisada confirma que la relación es real y se sostiene de manera constante en diferentes escenarios. Desde el marco teórico, la CX es considerada una entidad multidimensional que moldea la lealtad conductual y actitudinal del consumidor (Bascur & Rusu., 2020) Esta idea es apoyada por los hallazgos empíricos: la lealtad electrónica se ve reforzada por la satisfacción del cliente y el valor percibido, además de que son mediadores fundamentales entre la experiencia. y la fidelidad (Nguyen, Nguyen, & Voak, 2026). Asimismo, el modelo de (Pires et al., 2025b). determinó que la lealtad se explica en un 66,7% con respecto a la satisfacción y la experiencia del consumidor, mientras que (Zhang & Chai, 2025b) demostraron que una interfaz de calidad y una seguridad percibida fomentan la confianza, lo cual resulta en un incremento de fidelización en las plataformas digitales de comercio electrónico. En general, estos hallazgos corroboran que la experiencia del cliente es un precursor crucial para la fidelización en el ámbito digital.

La investigación literaria revisada indica que la atención al cliente, el marketing digital y la inteligencia artificial tiene un impacto positivo en el segundo objetivo, que se enfoca en identificar las tácticas digitales que las compañías pueden utilizar para promover la lealtad de los clientes, según (Vebrianti et al., 2025). la calidad de la información, el tiempo de respuesta y la facilidad de uso de los chatbots incrementan la satisfacción del cliente y, por ende, su fidelidad a las plataformas de comercio electrónico. En la misma frecuencia y constante, (Farmania et al., 2021) señalaron que los programas de lealtad, las promociones y los descuentos son elementos cruciales para fortalecer el compromiso y la fidelidad del cliente digital. (Gomez-Pino et al., 2023). Por su parte, mostraron que las tácticas de marketing y los incentivos para reconocer la experiencia de compra fomentan la retención de clientes y el cambio digital.

Estos resultados demuestran que la experiencia del cliente CX es un factor sumamente importante en la fidelización en el comercio electrónico, dado que tanto la satisfacción como el valor percibido median dicha relación y explican una gran parte de la variabilidad de la lealtad. Respecto a la atención al cliente, se observó que el tiempo de respuesta, la calidad de los datos y lo sencillo que es usar los chatbots mejoran la satisfacción del cliente y consolidan su relación con la empresa. La inteligencia artificial, en cuanto a su función, es un soporte tecnológico que mejora la seguridad

percibida y la interacción, lo que genera confianza en las plataformas digitales. Las promociones, los descuentos y los programas de lealtad, en conjunto con las estrategias enfocadas en la valoración de la experiencia de compra, fomentan la retención de clientes y la transformación digital. Esto demuestra que combinar estos tres elementos es un medio eficaz para consolidar la fidelidad en el e-commerce.

Conclusiones

La revisión sistemática (2022–2026) sostiene que existe un buen vínculo entre la experiencia del cliente CX y la fidelización en el sector del e-commerce. Por lo tanto, a mayor experiencia del cliente, será mayor la fidelización en el comercio electrónico. Por un lado, se investiga muy poco sobre las habilidades de las tecnologías emergentes en CX. Aunque el documento no ahonda en su empleo estratégico, tanto el Big Data como la IA pueden ofrecer recomendaciones altamente personalizadas que mejoran la experiencia del usuario. La dimensión emocional de la variable experiencia tampoco es tratada de manera explícita: el estudio indica que emociones agradables vinculadas a la compra (entretenimiento, satisfacción, sorpresa) tienen un impacto en la intención de repetición. En cuanto a términos de metodología, carece de indicadores cualitativos intrapersonales (análisis de sentimientos) que complementen parámetros tradicionales de satisfacción.

Ante estas carencias, para estudios posteriores se sugiere incluir otros complementos modernos en relación directa con nuestras variables, como la integración de nuevas tecnologías inmersivas (realidad Aumentada/Realidad virtual), para mayor atracción del cliente, como los simuladores del producto o servicio, que aumentan el compromiso y reducen la incertidumbre del cliente a través de la compra online. Esta experiencia estimula la fidelización convirtiéndose en vivencias memorables; también se sugiere el Big Data y CMR Inteligentes, si bien se menciona la personalización, proponemos extender su alcance a través de la implementación de sistemas CMR potenciados con IA para anticipar el comportamiento del cliente, por lo que sería posible prever necesidades y personalizar ofertas en tiempo real, adicionalmente es importante reforzar la transparencia y privacidad en la gestión de datos a través de blockchain por ejemplo, es una plataforma digital de base de datos que registra transacciones de forma segura, un punto que fortalece la confianza del usuario; por ultimo y no menos importante también se sugiere la Gamificación y Métricas emocionales, es recomendable diseñar programas de lealtad y contenido

que integre componentes lúdicos como recompensas o desafíos. Los estudios literarios revisados indican que las vivencias cautivan a los clientes, lo cual hace que su compromiso y experiencia aumenten. Por ello también se propone crear indicadores que estén basados en el estado de ánimo del cliente (satisfacción, estado de ánimo y entusiasmo) mediante apps de encuestas interactivas, esta última perspectiva atendería el aspecto afectivo de la lealtad ausente y complementaría los enfoques convencionales de satisfacción.

El resultado final de este estudio es de gran importancia para los comercios online a fin de incorporar nuevas estrategias que incrementen la experiencia del cliente y la fidelización, asimismo, reciban una mayor cartera de clientes, dado que la fidelización estimula el marketing de boca a boca a través de comentarios positivos y recomendaciones.

Referencias bibliográficas

Amado-Mateus, M., Guzmán-Rincón, A., & Ortega-Almonacid, F. D. (2025). Online repurchase intention among Colombian university students: A TPB-based model using structural equation modeling. *Digital Business, 5*(2), 1-11.

Amado-Mateus, M., Ortega-Almonacid c, F. D., & Guzmán-Rincón , A. (2025). Intención de recompra en línea entre estudiantes universitarios colombianos: un modelo basado en la Teoría del Comportamiento Planificado (TPB) mediante modelado de ecuaciones estructurales. Negocios digitales, 5(2). doi:https://doi.org/10.1016/j.digbus.2025.100146

Antonius , F., & Rembulan, G. (2023). Análisis de los factores d¿clave para mejorar la experiencia, el compromiso y la lealtad del cliente en la industria del comercio electronico en Indonesia. Universidad de Bunda Mulia Lodan Raya Ancol, Yakarta del Norte., 18.

Gomez-Pino, L. B., Huerta-Vilca, K. S., Cordova-Buiza, f., & Maqguiña-Rivero, O. F. (2023). Fidelización de clientes y gestion administrativa del comercio electronico en el sector de las telecomunicaciones en América Latina. Problems and Perspectives in Management.

Gomez-Pino, L., Huerta-Vilca, K., Cordova-Buiza, F., & Maqguiña-Rivero, O. (2023). Fidelización de clientes y gestión administrativa del comercio electronico en el sector de las telecomunicaciones en América Latina. Problems and Perpectives in Management.

Keiningham, T., Aksoy, L., Andreassen , T., Weiner , J., & Cooil, B. (2007). El valor de diferentes métricas de satisfacción y lealtad del cliente para predecir la retención de clientes, la recomendación y la participación en el gasto del cliente. Managing Service Quality, 17.

Keiningham, T., Askoy, L., Bruce , H., Cadel F., Clennell, N., Hodgkinson, I., & KearneyT. (2020). Innovación de modelos de negocio impulsada por la experiencia del cliente. Journal of Business Research.

Kotler, P., & Armstrong, G. (2017). Los Principios del marketing 7ma edicion.

López-Macías, L. E. (2025). Estrategias digitales para la mejora de la experiencia del cliente y su fidelización en plataformas de comercio electrónico. O´HIGGINS Instituto superior Universitario.

Masnun, A., Zulkifli, Rianto, Zakiah, T., & Istianingsih, N. (2026). Un estudio PLS-SEM que integra la hiperpersonalización impulsada por IA, la experiencia del cliente y la confianza electrónica para explicar la fidelización electrónica en el comercio electrónico indonesio. Qubahan Academic Journal, 6(2).

Merle, A., St-Onge, A., & Sénécal, S. (2022). ¿Compensa ser honesto? El efecto de la retroalimentación negativa proporcionada por el minorista en la elección de productos y la experiencia de compra de los consumidores. Journal of Business Research,.

Mouamine, Y. (2026). Inteligencia artificial en la experiencia del cliente y el marketing digital: una revisión bibliométrica y temática (2004-2025) con perspectiva de marketing sensorial. Negocios y gestión de Cogent, 13(1). doi:https://doi.org/10.1080/23311975.2026.2613596

Nguyen , T., Nguyen, T., & Voak, A. (2026). Una investigación empírica sobre la formación de lealtad electrónica para las compras en línea en China. Revista de académicos globales de la ciencia del marketing: Uniendo Asia y el mundo, 36(1), 11. doi:10.1080/21639159.2025.2577721

Pires, P. B., Perestrelo, B. M., & Duarte Santos, J. (2025). Medición de la experiencia del cliente en el comercio electrónico. Instituto Multidisciplinario de Publicaciones Digitales (MDPI), 15(434), 33. doi: 10.3390/admsci15110434

Pires, P. B., Perestrelo, B. M., & Santos, J. D. (2025). Analizando la experiencia del cliente en las compras en línea: efectos sobre la satisfacción y la fidelización. Revista de Investigación Teórica y Aplicada sobre Comercio Electrónico, 20(245), 37. doi:10.3390/jtaer20030245

Rajala , A., Hautala-Kankaanpää, T., & Joensuu-Salo, S. (2025). La experiencia del proveedor como antecedente de la satisfacción del proveedor: un Estudio exploratorio de las PYMES. Industrial Marketing Management.

Rust, R. T., & Oliver , R. L. (1999). Calidad de servicio: Perspectivas e implicaciones gerenciales de la Vanguardia. En Calidad del Servicio: Nuevas direcciones en teoria y practica., 19.

Schnurr, B., & Wetzels, M. (2020). Efecto condicional de la estética de las cajas de envio en la mejora del disfrute. Sciencie Direct Journal of Retailing and Consumer.

Steffen, A., & Doppler, S. (2020). Introducción a la economía de la experiencia.

Tran, V. (2025). Optimización de la experiencia del cliente en la entrega de última milla en el comercio electrónico. Revista de Ciencias de la Distribución, 23(5), 8. doi:10.15722/jds.23.05.202505.41

WAllace, L. M., Beavan, J., McCaffrey, R., & Darby, D. (2004). Acoplamiento de zonas de subducción y rotaciones de bloques tectónicos en la Isla Norte, Nueva Zelanda. Journal of Geophysical Research: Solid Earth.

Williams, L., Buoye,, A., Keiningham, T., & Aksoy. (2020). El camino de los profesionales hacia la fidelización del cliente: experiencias memorables o ¿Experiencias sin fricciones? J. Retail. Consum.

Juanli, L., Lei, H., Yubo, W., Ye, L., Sleiman, K. A. A., & Suliman, M. A. E. (2025). An empirical investigation of E-loyalty formation for online shopping in China. Acta Psychologica, 258. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2025.105135

Kalayci, E., Becker, J. U., & Barrot, C. (2024). Understanding customers' choice for digital D2C versus multi-brand operations. Journal of Retailing, 100(2), 256–273. https://doi.org/10.1016/j.jretai.2024.02.001

Ledro, C., Nosella, A., & Dalla Pozza, I. (2023). Integration of AI in CRM: Challenges and guidelines. Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity, 9(4). https://doi.org/10.1016/j.joitmc.2023.100151

Nazgul Aidargaliyeva, Meirambala Seisekenova y Elmira Kydyrbayeva (2025). (s. f.).

Pires, P. B., Perestrelo, B. M., & Santos, J. D. (2025). Unpacking Customer Experience in Online Shopping: Effects on Satisfaction and Loyalty. Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research, 20(3). https://doi.org/10.3390/jtaer20030245

Vebrianti, R., Aras, M., Putri, M. S. S., & Swandewi, I. A. (2025). AI Chatbots in E-Commerce: Enhancing Customer Engagement, Satisfaction and Loyalty. Paper Asia, 41(2b), 248–260. https://doi.org/10.59953/paperasia.v41i2b.445

Zhang, Y., & Chai, Y. (2025a). How Pinduoduo's E-Commerce Experience Shapes Customer Satisfaction and Loyalty: Leveraging Social Networks. Journal of Electronic Commerce in Organizations, 23(1). https://doi.org/10.4018/JECO.381236

Zhang, Y., & Chai, Y. (2025b). How Pinduoduo's E-Commerce Experience Shapes Customer Satisfaction and Loyalty: Leveraging Social Networks. Journal of Electronic Commerce in Organizations, 23(1). https://doi.org/10.4018/JECO.381236

Capítulo VIII

De la estrategia digital a la decisión del viajero: una revisión de la literatura sobre marketing y comportamiento del consumidor turístico

From digital strategy to the traveler's decision: a review of the literature on marketing and tourist consumer behavior

Medalit Villegas Casaverde
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
mvillegasc@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0001-7408-1980
Apurímac, Perú

Jeferson Ccorisapra Quintana
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
jccorisapra@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-2968-8297
Apurímac, Perú

Edison Vega Otazu
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
evega@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0009-0004-1233-8065
Apurímac, Perú

Silvia Soledad Lopez Ibañez
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
slopez@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-5815-8906
Apurímac, Perú

Luis Porras Durand
Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac
lporras@unamba.edu.pe
https://orcid.org/0000-0003-2802-4429
Apurímac, Perú

Resumen

El estudio tuvo como propósito examinar la relación entre el marketing digital y el comportamiento del consumidor en el ámbito turístico a partir de una revisión sistemática de publicaciones científicas. La unidad de análisis estuvo integrada por artículos que abordaban ambas variables y que se encontraban registrados en la base de datos Scopus. Después de aplicar los criterios de inclusión y exclusión, se seleccionaron 30 investigaciones para la revisión definitiva. La búsqueda, depuración y organización de los documentos se realizó siguiendo las etapas del método PRISMA. Para sistematizar la evidencia se elaboró una matriz que reunió información sobre autoría, año, país, objetivo, muestra, diseño metodológico, resultados y contribución de cada trabajo. La actividad turística incorpora cada vez con mayor intensidad herramientas digitales debido a que las redes sociales, junto con la personalización de contenidos así como la inteligencia artificial y otras soluciones tecnológicas intervienen en la manera en que los viajeros buscan información comparan alternativas y seleccionan servicios o destinos, mientras que las estrategias digitales fortalecen la comunicación con el público además de incrementar la confianza y favorecer una experiencia turística más satisfactoria aunque su efecto varía según las condiciones culturales geográficas y tecnológicas presentes en cada contexto.

Palabras clave: marketing digital, comportamiento del consumidor, turismo, redes sociales, transformación digital.

Abstract

The purpose of the study was to examine the relationship between digital marketing and consumer behavior in the tourism sector based on a systematic review of scientific publications. The unit of analysis consisted of articles that addressed both variables and were indexed in the Scopus database. After applying the inclusion and exclusion criteria, 30 studies were selected for the final review. The search, screening, and organization of the documents were conducted following the steps of the PRISMA method. To systematize the evidence, a matrix was developed that compiled information on authorship, year, country, objective, sample, methodological design, results, and contribution of each study. The tourism industry is increasingly incorporating digital tools because social media, along with content personalization, artificial intelligence, and other technological solutions, influence the way travelers search for information, compare alternatives, and select services or destinations, while digital strategies strengthen communication with the public, increase trust, and promote a more satisfying tourism experience, although their impact varies depending on the cultural, geographic, and technological conditions present in each context.

Keywords: Digital marketing, consumer behavior, tourism, social media, digital transformation.

Introducción

Las organizaciones turísticas han modificado durante los últimos años la presentación de sus servicios, al igual que la relación que mantienen con los viajeros debido a la expansión de internet, las redes sociales así como las plataformas digitales; puesto que el marketing digital funciona como un recurso estratégico capaz de difundir información y segmentar públicos; además de acompañar al usuario durante la búsqueda de opciones, mientras que los consumidores revisan destinos comparan alternativas y organizan sus viajes mediante distintos canales digitales (Martins et al., 2024) al tiempo que las opiniones recomendaciones junto con las experiencias compartidas por otros usuarios intervienen en la percepción del servicio; de tal manera que pueden orientar la decisión final de compra (Delgado, 2024).

El uso creciente de estas herramientas, ha incrementado el interés por comprender de qué manera las estrategias digitales influyen en la conducta del consumidor; aunque existe una cantidad considerable de investigaciones sobre turismo y marketing digital, puesto que sus resultados se encuentran distribuidos entre diferentes países grupos de estudio así como enfoques metodológicos, de tal manera que esta dispersión dificulta reconocer patrones comunes junto con comprender con precisión la relación entre las dos variables (Batista Sánchez et al., 2022),mientras que una parte importante de la producción científica procede de Asia Europa y Estados Unidos frente a estudios latinoamericanos que todavía son más limitados (Cunha et al., 2025).

Las redes sociales, junto con los contenidos digitales participan en distintas etapas del proceso de compra según los antecedentes revisados puesto que Sandoval et al. (2024) señalan que los mensajes promocionales, así como la información difundida en plataformas digitales pueden modificar la valoración que los consumidores realizan de los productos y servicios turísticos de tal manera que la calidad la claridad junto con la utilidad del contenido adquieren especial importancia cuando el viajero compara opciones.

Estado del arte

El marketing mix, junto con la distribución turística evidencian un cambio desde modelos centrados exclusivamente en la comercialización hacia enfoques que incorporan sostenibilidad digitalización, así como segmentación avanzada, mientras que Castelo González y Torres Jara (2026) después de

revisar 35 artículos científicos concluyeron que estas estrategias se orientan cada vez más hacia propuestas integrales ajustadas a las características de los mercados emergentes.

El marketing digital no necesariamente sustituye al marketing tradicional puesto que ambos pueden complementarse y cumplir funciones diferentes a lo largo del proceso de compra (Kotler et al., 2016), mientras que las acciones digitales permiten a las empresas comunicarse con mayor rapidez interactuar con sus clientes así como adaptar sus mensajes a necesidades específicas de tal manera que esta capacidad puede mejorar el valor percibido junto con fortalecer la relación con el consumidor cuando la estrategia se ajusta a sus expectativas (Martínez, 2020) aunque su efectividad depende de que las marcas elaboren contenido pertinente además de mantener una participación activa y coherente en los medios digitales (Díaz et al., 2024).

El comportamiento del consumidor turístico comprende la manera en que una persona reconoce una necesidad de viaje busca información compara alternativas y decide qué destino visitar o qué servicio contratar, mientras que en la actualidad este proceso se encuentra estrechamente relacionado con la información disponible en redes sociales así como plataformas digitales puesto que la influencia resulta particularmente visible entre los consumidores jóvenes quienes recurren con mayor frecuencia a videos recomendaciones junto con contenidos en línea para planificar sus viajes (Armijo et al., 2026) de tal manera que comprender estos patrones permite que las organizaciones turísticas adapten sus propuestas a un mercado con más opciones y cambios constantes (Silva Guerra, 2012).

Metodología

La revisión sistemática de literatura científica constituyó el procedimiento mediante el cual se realizó la investigación con el propósito de examinar cómo el marketing digital influye en el comportamiento del consumidor dentro del sector turístico (Quispe et al., 2021), mientras que el proceso se organizó de acuerdo con los lineamientos del método PRISMA puesto que este permite ordenar de forma transparente las etapas de identificación evaluación selección e inclusión de los artículos analizados (Page et al., 2021).

El enfoque documental junto con el carácter descriptivo del estudio respondieron a la finalidad principal de reconocer tendencias patrones, así como hallazgos relevantes presentes en la evidencia disponible mientras que la unidad de análisis estuvo constituida por artículos científicos centrados

en el marketing digital y el comportamiento de los viajeros, de tal manera que la búsqueda se efectuó en Scopus mediante criterios de inclusión y exclusión destinados a asegurar que los documentos respondieran al objetivo de la revisión considerando trabajos publicados o en proceso de impresión entre 2024 y 2026 principalmente dentro de las áreas de ciencias sociales negocios gestión y contabilidad hasta seleccionar 30 artículos después de la evaluación.

La búsqueda bibliográfica combinó mediante operadores booleanos los descriptores relacionados con las variables de estudio digital marketing consumer behavior y tourism, junto con antecedentes sobre marketing digital y conducta del consumidor turístico (Sandoval et al., 2024) así como revisiones vinculadas con la influencia de internet en las decisiones del viajero (Batista Sánchez et al., 2022) de tal manera que esta estrategia permitió reducir resultados ajenos al tema e identificar investigaciones directamente relacionadas con el propósito del estudio.

Tabla 1

Criterios de búsqueda

Criterios de búsqueda	
Ecuación de búsqueda	ALL (marketing digital AND comportamiento del consumidor AND turismo) AND (LIMIT-TO (SUBJAREA, "BUSI")) AND (LIMIT-TO (DOCTYPE, "ar"))
Base de datos	Scopus
Área de conocimiento	Ciencias sociales, Business, Management and Accounting
Tipos de documentos	Artículos científicos
Etapa de publicación	Artículos publicados y artículos en proceso de impresión
Años de publicación	2024-2026
Artículos incluidos en la revisión	30 artículos

Nota. Elaboración propia.

La información seleccionada se organizó en una matriz de extracción que reunió los siguientes datos: autoría, año de publicación, país, objetivo, muestra, diseño metodológico, principales resultados y aporte de cada investigación. Luego se realizó una síntesis narrativa para comparar coincidencias, diferencias y tendencias relacionadas con la influencia del marketing digital en el comportamiento del consumidor turístico.

Resultados

N.º	Autor(es)	Objetivo del estudio	Diseño metodológico	Hallazgos principales	Aporte al estudio
1	Dimitrios et al. (2026)	Analizar la respuesta de los usuarios en línea ante situaciones de desastre y el papel del marketing digital en hoteles de lujo de Santorini.	Estudio cuantitativo, observacional y longitudinal.	Antes de la crisis predominó la búsqueda orgánica para obtener información y seguridad; después del evento aumentó el tráfico directo y la publicidad pagada para confirmar reservas y buscar marcas confiables.	Propone un modelo estratégico para optimizar la inversión en marketing digital durante situaciones de crisis en el sector hotelero.
2	Radovan Bacik, Jaroslava Gburova, Stefan Gavura y Barbara Iannaccone	Evaluar la influencia del marketing digital y otros canales en el comportamiento de compra de los consumidores turísticos.	Estudio cuantitativo, transversal y correlacional mediante cuestionario en línea.	La televisión continúa siendo el principal medio de promoción turística; sin embargo, Internet ejerce una influencia significativa, especialmente entre los consumidores jóvenes.	Recomienda integrar medios tradicionales y digitales para fortalecer las estrategias de promoción turística.
3	Luis Ernesto Merino-Sánchez, Jocelyne Yajaira Alvarado-Tapuy, Boris Adrian Uquillas-Granizo, Cristian Geovanny Merino-Sánchez y Roberto Carlos Vega-Bonilla	Diseñar estrategias de marketing digital para fortalecer la promoción turística del cantón Carlos Julio Arosemena Tola.	Estudio no experimental de enfoque descriptivo.	El 79,9 % de los turistas utiliza las redes sociales como principal fuente de información sobre los atractivos turísticos.	Evidencia la importancia de las redes sociales como herramienta para promocionar destinos turísticos y atraer visitantes.
4	Fatima Sophia Armijo Durand, Marianella Gabriella Lescano Zevallos y Carmen Rosa Chieng Cueva	Determinar la influencia del marketing digital sobre las decisiones de compra de turistas peruanos pertenecientes a la Generación Z.	Estudio cuantitativo, transversal y correlacional.	Se encontró una relación positiva y estadísticamente significativa entre el marketing digital y el comportamiento de compra de los turistas.	Demuestra que las estrategias de marketing digital influyen significativamente en las decisiones de compra de la Generación Z.
5	Barış Armutcu, Ahmet Tan, María Amponsah,	Analizar la influencia del contenido digital de los destinos turísticos sobre la	Estudio cuantitativo, transversal y	La calidad del contenido digital influye directamente en la intención de visitar un destino;	Propone un modelo que demuestra la importancia del contenido digital para

	Subhadarsini Parida y Haywantee Ramkissoon	intención de viaje de turistas de origen oriental.	explicativo mediante PLS-SEM.	además, la satisfacción y la interacción en redes sociales fortalecen el boca a boca electrónico y la intención de revisita.	generar ventajas competitivas sostenibles en los destinos turísticos.
6	Raquel Rocha, Cristina Estevão, Helena Alves, Carla Pereira y Sara Nunes	Determinar la eficacia de las estrategias digitales considerando la conducta del consumidor turístico.	Estudio cuantitativo y empírico.	Las estrategias de marketing digital mejoran la intención de visita y fortalecen la fidelización de los turistas.	Proporciona directrices para optimizar la presencia digital de empresas y destinos turísticos.
7	Maria Nascimento Cunha, Manuel Pereira, António Cardoso, Jorge Figueiredo e Isabel Oliveira	Analizar la influencia de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático en las estrategias de marketing digital del turismo de lujo.	Estudio cuantitativo y empírico.	La inteligencia artificial mejora la personalización de los servicios y fortalece la influencia de las herramientas digitales en la decisión de compra y la fidelización del cliente.	Ofrece recomendaciones para incorporar tecnologías inteligentes en las estrategias de marketing digital del sector turístico.
8	Luis Fernando Garcés Giraldo, Vanessa García Pineda, Jackeline Valencia Arias, Lucía Palacios-Moya y Jefferson López Goycochea	Analizar las tendencias de investigación sobre marketing en los sectores de turismo y hospitalidad.	Estudio bibliométrico con metodología PRISMA 2020.	Se observó un incremento del 99 % en la producción científica, especialmente durante los años 2021 y 2022.	Identifica las principales líneas de investigación y las tendencias futuras relacionadas con el marketing digital en turismo.
9	Md Istiaq Mohammad Shuv y Md Jamsedul Islam	Analizar el impacto de la transformación digital y las redes sociales en el comportamiento del turista.	Estudio cuantitativo, descriptivo y transversal mediante modelos de ecuaciones estructurales.	La adopción tecnológica y el uso de redes sociales incrementan la confianza, facilitan la planificación del viaje y mejoran la satisfacción del turista.	Presenta un modelo que orienta a empresas y responsables de políticas públicas para fortalecer la transformación digital del turismo.
10	Noel Fernández Cueria, Elizabeth del Carmen Pérez Ricardo, Ramona Medina Labrada,	Crear y comprobar un procedimiento orientado a la administración del marketing digital en organizaciones turística	Investigación aplicada de enfoque cualitativo-cuantitativo	La implementación del procedimiento mejoró el comercio electrónico, el posicionamiento SEO, el uso de redes sociales y el email	Presenta un procedimiento de gestión del marketing digital que puede ser replicado en otras

	Katia Zucel Coronado y Francisco Fidel Feria Velázquez		basada en investigación-acción.	marketing, incrementando la interacción con los usuarios.	organizaciones del sector turístico.
11	Dayana Duffus Miranda y Donnel Briley	Validar un modelo conceptual que explique el comportamiento de compra del turista digital para optimizar la gestión de productos turísticos.	Investigación exploratoria y empírica basada en estudio de caso.	Se validó un modelo que identifica los estilos de vida digitales del turista y los canales en línea más influyentes en cada etapa del proceso de compra.	Presenta un modelo predictivo que facilita el diseño de estrategias de marketing digital orientadas al comportamiento del turista.
12	Ernesto Batista Sánchez, Jim Deegan y Elizabeth del Carmen Pérez Ricardo	Analizar la influencia de Internet en el comportamiento del consumidor turístico durante las diferentes etapas del viaje.	Revisión sistemática de literatura.	Internet influye significativamente antes, durante y después del viaje, modificando la planificación, la experiencia y la interacción del turista.	Propone un marco teórico que organiza el impacto de Internet en el comportamiento del consumidor turístico.
13	Mohammad Alsoud, Sulaiman Alfdool, Ahmad Trawnih, Ahmad Helalat y Nawaf Mahrakani	Examinar el efecto de internet sobre la conducta del consumidor turístico a lo largo de las distintas fases del viaje.	Estudio cuantitativo mediante modelos de ecuaciones estructurales.	La interacción y la actualización de contenidos influyen positivamente en la intención de compra; el eWOM no mostró un efecto significativo.	Desarrolla un modelo que explica la influencia de las redes sociales en la intención de compra turística.
14	Rima Baber y Prateek Baber	Examinar la influencia de la reputación electrónica, la imagen del destino y el marketing en redes sociales sobre la intención de visita.	Estudio cuantitativo mediante PLS-SEM.	La reputación electrónica, el marketing en redes sociales y la imagen del destino incrementan significativamente la intención de visita.	Confirma la utilidad del modelo Estímulo–Organismo–Respuesta para explicar el comportamiento del turista digital.
15	Ilmiawan Auwalin, Rahmatina A. Kasri y Nuralam	Analizar la influencia del marketing en redes sociales sobre la intención de revisita de turistas internacionales.	Estudio cuantitativo mediante encuesta estructurada.	La satisfacción del turista actúa como variable mediadora entre el marketing en redes sociales y la intención de volver a visitar el destino.	Evidencia la importancia de la satisfacción del turista para fortalecer la fidelización mediante estrategias digitales.
16	Ana Pahor Zvanut y Petra Zabukovec Baruca	Analizar las estrategias de marketing en redes sociales	Revisión sistemática de literatura.	Existe una brecha entre los modelos teóricos propuestos y	Identifica oportunidades de investigación y mejora

		utilizadas en la industria turística.		su aplicación práctica en las organizaciones turísticas.	en la implementación del marketing digital.
17	Ivo Gutierriz, João J. Ferreira y Paula Odete Fernandes	Examinar la transformación digital y las nuevas tendencias de negocio en el sector turístico.	Revisión sistemática con enfoque bibliométrico.	Se identifican como principales líneas de investigación el marketing digital, la economía digital, la educación turística y la hospitalidad inteligente.	Establece una agenda de investigación sobre transformación digital aplicada al turismo.
18	Eva Sánchez-Amboage, Verónica Crespo-Pereira, Manuel Membiela-Pollán y Joaquim Pedro Jesús Faustino	Analizar el desarrollo del marketing turístico en el contexto del metaverso y las tecnologías emergentes.	Revisión sistemática de literatura.	Se identifican tecnologías como realidad virtual, NFT y avatares como elementos con potencial para transformar el marketing turístico.	Propone un marco conceptual para futuras investigaciones sobre turismo y metaverso.
19	Xiaoxiao Zheng, Jim Min Luo y Zhang Shang	Examinar cómo los personajes influyentes en plataformas sociales afectan la percepción del destino y la intención de visitarlo.	Estudio cuantitativo mediante encuesta estructurada.	La relación parasocial con influencers mejora la percepción del destino e incrementa la intención de visitarlo.	Demuestra la importancia del marketing de influencers como estrategia de promoción turística.
20	Wenjie Yang, Qi Chen, Xin Huang, Jing Xie, Min Xie y Jing Shi	Analizar cómo diferentes formatos de publicidad turística influyen en la atención visual y la intención de visita.	Estudio experimental.	Los anuncios con mayor predominio de imágenes generan mayor atención visual e incrementan la intención de visitar el destino.	Evidencia experimental sobre la efectividad del diseño visual en la publicidad turística digital.
21	Yi Zhang Yue Liu Wenxia Tao	Analizar el papel de la envidia hacia el destino como variable mediadora entre el contenido de redes sociales y la intención conductual del turista.	Estudio cuantitativo mediante encuesta estructurada.	La envidia hacia el destino media significativamente la relación entre el contenido publicado en redes sociales y las decisiones de comportamiento del turista.	Evidencia la importancia de los factores emocionales en la eficacia del marketing digital turístico.
22	Muyi Gan Yao Ouyang	Evaluar cómo el marketing desarrollado en redes sociales influye en las decisiones de compra de viajes online después de la pandemia de COVID-19.	Estudio cuantitativo mediante encuesta estructurada.	El marketing en redes sociales fortalece la confianza y la lealtad hacia la marca, incrementando la intención de compra en línea.	Propone un modelo que explica la influencia de la confianza y la lealtad en el comportamiento de compra digital.

23	Jing Li Bin Cao	Examinar la influencia del marketing en redes sociales sobre los comportamientos pro-turísticos del consumidor.	Estudio cuantitativo mediante encuesta estructurada.	La actitud del consumidor y el atractivo percibido del destino median la relación entre el marketing digital y el comportamiento turístico.	Aporta un modelo explicativo sobre los factores que favorecen el comportamiento pro-turístico.
24	Mohammad Ashraful Babu, Halima Akter Urmi, Abu Hena Tofayel, Md. Mahmudul Islam Sabuj y Md. Touhidul Alam	Analizar el efecto del marke cómo las acciones de marketing digital mediante redes sociales afectan la intención compra de servicios turísticos.	Estudio cuantitativo mediante modelos de ecuaciones estructurales.	El marketing digital en redes sociales influye significativamente en la intención de compra de servicios turísticos.	Confirma la efectividad de las redes sociales como herramienta para incrementar la intención de compra.
25	Yue Zhang, Ying Liu y Wei Tao	Evaluar el impacto del contenido difundido en redes sociales sobre la intención de viajar de posibles turistas.	Estudio cuantitativo mediante encuesta estructurada.	El contenido digital de calidad incrementa la confianza, el compromiso del usuario y la intención de viajar.	Evidencia la importancia del marketing de contenidos en la promoción de destinos turísticos.
26	Mengyao Gan y Yuting Ouyang	Analizar la influencia de las transmisiones en vivo (live streaming) sobre la intención de compra de productos y servicios turísticos.	Estudio cuantitativo mediante encuesta estructurada.	Las transmisiones en vivo fortalecen la confianza y aumentan la intención de compra de los consumidores.	Demuestra la efectividad del live streaming como estrategia innovadora de marketing digital.
27	Jing Li y Bin Cao	Analizar el efecto del marketing digital y las plataformas de comercio electrónico sobre la satisfacción del consumidor turístico.	Estudio cuantitativo mediante modelos de ecuaciones estructurales.	El marketing digital mejora la satisfacción del consumidor y favorece la intención de recompra.	Evidencia la importancia de integrar estrategias digitales en plataformas de comercio electrónico turístico.
28	Michael Chamboko-Mpotaringa	Analizar el papel del marketing digital en la recuperación y resiliencia del sector turístico después de situaciones de crisis.	Estudio cuantitativo con análisis comparativo.	Las estrategias de marketing digital favorecen la recuperación de la demanda turística y fortalecen la competitividad de los destinos.	Resalta el valor del marketing digital como herramienta para la recuperación del sector turístico.
29	Dan Zhong, Yue Wang, Lei Wang,	Analizar la influencia del marketing digital personalizado sobre la	Estudio cuantitativo mediante modelos	La personalización del marketing digital incrementa	Demuestra la importancia de la personalización como estrategia para

	Qian Sun y Meng Wang	intención de compra de paquetes turísticos.	de ecuaciones estructurales.	significativamente la intención de compra de los consumidores.	mejorar el desempeño del marketing turístico.
30	Costa et al. (2022)	Analizar la influencia del marketing digital orientado a la sostenibilidad sobre el comportamiento del consumidor turístico.	Estudio cuantitativo mediante encuesta estructurada.	Las estrategias de marketing digital con enfoque sostenible favorecen un comportamiento de consumo turístico responsable.	Evidencia que la sostenibilidad constituye un elemento diferenciador en las estrategias actuales de marketing digital turístico.

Discusión

Los estudios revisados permiten comprender el marketing digital no como una sola herramienta sino como un conjunto de estrategias que trabajan dentro del entorno digital puesto que Reklitis et al., (2025), demostraron que no se limita a un solo punto de contacto al combinar la búsqueda orgánica junto con la publicidad pagada cuya importancia varía según el momento por el que atraviesa el turista sobre todo en contexto de crisis mientras que Gburov y Iannaccone (2025) plantean que aunque medios como la televisión todavía conservan cierta relevancia el marketing digital ha ganado cada vez más peso principalmente entre los usuarios más jóvenes lo cual respalda que su efectividad no recae en un solo canal sino en la combinación estratégica de varios de ellos al tiempo que María et al., (2024), observaron que la incorporación de la inteligencia artificial abre nuevas posibilidades dentro del marketing digital al hacer posible una personalización más exacta de la oferta turística de tal manera que este campo continúa evolucionando junto con los avances tecnológicos.

La promoción junto con la búsqueda de información así como la decisión de compra reciben la intervención de las acciones digitales según la evidencia puesto que Armijo et al. (2026) identificaron una relación positiva y significativa entre el marketing digital y el comportamiento de compra de turistas peruanos de la Generación Z mientras que Rocha et al. (2024) observaron que una estrategia digital adecuada puede incrementar la intención de visita, junto con favorecer la fidelización al tiempo que Mohammad y Jamsedul (2024) añaden que la transformación digital mejora la confianza facilita la planificación y contribuye a una experiencia más satisfactoria para el viajero.

La comparación de estudios desarrollados en diferentes contextos permite reconocer una tendencia común donde las plataformas digitales influyen en la búsqueda de información la atención así como la intención de compra puesto que Bacik et al. (2025) indican que internet presenta una influencia especialmente visible entre consumidores jóvenes, mientras que Durand et al. (2026) encontraron una relación estrecha entre marketing digital y compra turística en el contexto peruano además de que Rocha et al. (2024) señalan que este efecto puede extenderse a la fidelización junto con la intención de volver a contratar un servicio.

La personalización junto con la inteligencia artificial así como el comercio electrónico reciben especial importancia en las investigaciones realizadas en Europa y Asia puesto que Cunha et al. (2024) explican que la inteligencia artificial y el aprendizaje automático permiten adaptar con mayor precisión la oferta turística mientras que en América Latina Merino et al. (2024) resaltan con mayor fuerza el papel de las redes sociales como fuente de información y promoción de destinos al tiempo que Armutcu et al. (2024) muestran que la calidad del contenido digital influye en la intención de viaje y puede estimular el boca a boca electrónico, de tal manera que estas diferencias sugieren adaptar las estrategias a las condiciones tecnológicas culturales y geográficas de cada mercado.

El comportamiento del consumidor comprende el reconocimiento de una necesidad junto con la búsqueda de información la evaluación de alternativas así como la decisión de compra (Schiffman y Wisenblit, 2015), mientras que en el turismo estas etapas se relacionan con la elección de destinos y servicios además de recibir la influencia de factores personales culturales económicos y tecnológicos (Kotler y Keller, 2016) puesto que Solomon (2021) añade que las decisiones están condicionadas por elementos internos y externos capaces de modificar la percepción las preferencias y la elección final de tal manera que conocer al consumidor permite diseñar estrategias más pertinentes junto con generar valor para el mercado.

Los consumidores jóvenes constituyen uno de los grupos que utiliza con mayor intensidad las plataformas digitales para informarse comparar alternativas así como decidir un viaje (Armijo et al., 2026) mientras que Batista Sánchez et al. (2022) señalan que internet interviene antes durante y después de la experiencia turística al tiempo que Armutcu et al. (2024) muestran que la calidad del contenido digital puede elevar la intención de viaje mientras Baber y Baber (2023) destacan la influencia de la reputación electrónica junto con la imagen del destino además de que Cevallos et al. (2025) sostienen que la transformación digital crea nuevas formas de interacción entre destinos y consumidores.

Los antecedentes respaldan en conjunto la existencia de una relación favorable entre marketing digital y comportamiento del consumidor turístico, aunque el efecto no depende únicamente de la tecnología utilizada puesto que también intervienen la confianza la calidad de la información la cultura la edad, junto con las características del destino de tal manera

que esta diversidad explica por qué una misma estrategia puede producir resultados distintos entre países y grupos poblacionales.

La literatura revisada ofrece resultados consistentes aunque todavía presenta limitaciones debido a que una parte considerable de los estudios emplea diseños transversales junto con una concentración en determinados países lo cual dificulta observar cambios a largo plazo o generalizar los hallazgos a todos los mercados turísticos, de tal manera que se requieren más investigaciones latinoamericanas comparaciones entre regiones así como análisis específicos sobre inteligencia artificial personalización reputación digital y tecnologías emergentes.

La eficacia del marketing digital se relaciona según la discusión con la capacidad de comprender al consumidor junto con ajustar los mensajes a sus necesidades reales puesto que utilizar redes sociales o publicidad en línea no resulta suficiente al requerirse contenido confiable, así como la selección de los canales adecuados además de una interacción coherente antes durante y después del viaje.

Conclusiones

El primer objetivo del estudio se orientó a analizar las herramientas y estrategias de marketing digital utilizadas en el sector turismo junto con su influencia en los procesos de promoción posicionamiento así como decisión de compra, de tal manera que la revisión permitió constatar que herramientas como el live streaming la personalización de contenidos las redes sociales y la inteligencia artificial se han vuelto recursos eficaces para generar confianza en el consumidor, puesto que como se evidenció en la discusión estas herramientas no se limitan a un solo canal sino que se combinan estratégicamente según el momento por el que atraviesa el turista mientras que no solamente influyen en la decisión de compra sino que también contribuyen a mejorar la experiencia, junto con la satisfacción del turista dentro del entorno digital generando además respuestas concretas y duraderas en el consumidor como se discutió previamente.

El segundo objetivo orientado al comportamiento del consumidor busca reconocer los patrones de búsqueda, junto con las preferencias e intenciones de viaje de los turistas según su generación país de origen nivel socioeconómico así como el tipo de medio digital utilizado puesto que los hallazgos evidencian diferencias importantes asociadas a estas variables de tal

manera que los turistas más jóvenes recurren con mayor frecuencia a plataformas como TikTok e Instagram, para informarse y seleccionar sus destinos mientras que en los mercados de Europa y Asia adquieren mayor relevancia valores como la sostenibilidad, junto con una oferta altamente personalizada al momento de tomar decisiones lo cual coincide con lo analizado previamente debido a que en contextos asiáticos predominan la inteligencia artificial, así como los contenidos personalizados mientras que en América Latina las redes sociales ejercen mayor influencia en la elección de los destinos razón por la cual estas preferencias varían no solo según la edad sino también de acuerdo con el entorno cultural y geográfico de cada viajero.

El tercer objetivo orientado a comprender la naturaleza junto con el sentido de la relación entre el marketing digital y la conducta del turista permite establecer mediante el análisis comparativo que dicha relación es positiva, así como significativa puesto que estrategias digitales mejor desarrolladas y ajustadas generan una respuesta más favorable del público en términos de confianza intención de compra y lealtad independientemente de la ubicación del consumidor, de tal manera que este resultado coincide con lo señalado en la discusión donde el vínculo favorable se mantiene constante entre distintos países y grupos poblacionales aunque su intensidad puede variar ligeramente según las particularidades culturales y geográficas de cada región.

Referencias bibliográficas

Alberto Camata, R. L., Mamami Mamani, L., & Flores López, J. (2025). Evolución del marketing digital turístico: análisis bibliométrico de la compra de servicios. *Negocios & Tendencias, 1*(2), 52–68. https://revistas.usfx.bo/index.php/negociosytendencias/article/view/2164

Armijo Durand, F. S., Lescano Zevallos, M. G., & Chieng Cueva, C. R. (2026). Impacto del marketing digital en el comportamiento de compra del turista peruano de la Generación Z. *Revista Científica en Ciencias Sociales, 8*(1), 1–11. https://doi.org/10.53732/rccsociales/e8837

Armutcu, B., Tan, A., Amponsah, M., Parida, S., & Ramkissoon, H. (2023). Tourist behaviour: The role of digital marketing and social media. *Acta Psychologica, 240*, 104025. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2023.104025

Baber, R., & Baber, P. (2023). Influence of social media marketing efforts, e-reputation and destination image on intention to visit among tourists: Application of the S-O-R model. *Journal of Hospitality and Tourism Insights, 6*(5), 2298–2316. https://doi.org/10.1108/JHTI-06-2022-0270

Bacik, R., Gburova, J., Gavura, S., & Iannaccone, B. (2025). Impact of digital marketing on the purchasing behavior of modern consumers in the field of tourism. *Journal of International Studies, 18*(1), 116–129. https://doi.org/10.14254/2071-8330.2025/18-1/7

Batista Sánchez, E., Deegan, J., & Pérez Ricardo, E. D. C. (2022). Influence of internet on tourism consumer behaviour: A systematic review. *Advances in Hospitality and Tourism Research, 10*(1), 130–156. https://doi.org/10.30519/ahtr.917210

Castelo González, J. F., & Torres Jara, G. N. (2026). Estrategias de marketing mix y distribución en el turismo: un estudio de segmentos de mercado emergentes en el turismo sostenible. *Sinergia Académica, 9*(5), 668–684. https://doi.org/10.51736/sa1084

Cunha, M. N., Pereira, M., Cardoso, A., Figueiredo, J., & Oliveira, I. (2024). Revolutionizing luxury: The role of AI and machine learning in enhancing marketing strategies within the tourism and hospitality luxury sectors. *GeoJournal of Tourism and Geosites, 55*(3), 1345–1353. https://doi.org/10.30892/gtg.55335-1307

den Hond, F. (2001). Industrial ecology. In N. J. Smelser & P. B. Baltes (Eds.), *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences* (pp. 7320–7326). Pergamon. https://doi.org/10.1016/B0-08-043076-7/04138-3

Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.

Kotler, P., Kartajaya, H., & Setiawan, I. (2016). *Marketing 4.0: Moving from traditional to digital*. Wiley. https://www.drnishikantjha.com/booksCollection/Marketing%204.0_%20Moving%20from%20Traditional%20to%20Digital%20(%20PDFDrive%20).pdf

Kotler, P., & Keller, K. L. (2016). *Marketing management* (15th ed.). Pearson.

Martins, L. M., França, K. D. L. de, Mendes Filho, L., & Marques Júnior, S. (2024). Influência da rede social TikTok na intenção de viagem: uma abordagem com a teoria do comportamento planejado. *Revista Turismo em Análise, 35*, 120–142. https://doi.org/10.11606/issn.1984-4867.v35ip120-142

Merino-Sánchez, L. E., Alvarado-Tapuy, J. Y., Vega-Bonilla, R. C., Uquillas-Granizo, B. A., & Merino-Sánchez, C. G. (2023). Impacto en el sector turístico aplicando estrategias de marketing digital: caso real. *Polo del Conocimiento, 8*(3), 772–809. https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/5335

Mieles Cevallos, D., Zambrano Mieles, J. D., & Zambrano Burgos, V. R. (2025). Transformación digital en la industria del turismo: revisión sistemática de literatura y análisis bibliométrico. *GADE: Revista Científica, 5*(1), 415–437. https://doi.org/10.63549/rg.v5i1.608

Millán, O. (2024). Redes sociales y la influencia en la decisión del destino turístico. *Cuadernos.info, 57*, 315–337. https://doi.org/10.7764/cdi.57.65499

Mohhamad Shuvo, M. I., & Islam, M. J. (2024). The digital transformation of tourism: A study of tourist behaviour and preferences in the age of technology in Bangladesh. *Research in Hospitality Management, 14*(3), 236–244. https://doi.org/10.1080/22243534.2024.2419366

Núñez Cudriz, E. C., & Miranda Corrales, J. (2020). El marketing digital como un elemento de apoyo estratégico a las organizaciones. *Cuadernos Latinoamericanos de Administración, 16*(30). https://doi.org/10.18270/cuaderlam.v16i30.2915

Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., … Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *BMJ*, *372*, n71. https://doi.org/10.1136/bmj.n71

Piña-Ferrer, L. S. (2023). El enfoque cualitativo: una alternativa compleja dentro del mundo de la investigación. *Revista Arbitrada Interdisciplinaria Koinonía*, *8*(15), 1–3. https://doi.org/10.35381/r.k.v8i15.2440

Prado Najarro, L. S., Sandoval Villacorta, A. M., Cruz Aliaga, E. J., & Quiliano Roldan, V. (2024). Una revisión sistemática entre el comportamiento del consumidor y el marketing digital. *Revista de Ciencias y Artes*, *2*(3), 31–80. https://doi.org/10.37211/2789.1216.v2.n3.66

Quispe, A. M., Hinojosa-Ticona, Y., Miranda, H. A., & Sedano, C. A. (2021). Serie de redacción científica: revisiones sistemáticas. *Revista del Cuerpo Médico del HNAAA*, *14*(1), 94–99. https://doi.org/10.35434/rcmhnaaa.2021.141.906

Reklitis, D. P., Terzi, M. C., Sakas, D. P., & Konstantinidou Konstantopoulou, C. (2025). Customer behaviour in response to disaster announcements: A big data analysis of digital marketing in hospitality. *Tourism and Hospitality*, *6*(2), 112. https://doi.org/10.3390/tourhosp6020112

Rocha, R., Estevão, C., Alves, H., Pereira, C., & Nunes, S. (2024). Estratégias de marketing digital no turismo: um estudo sobre a perspetiva do consumidor turístico. *Revista Turismo & Desenvolvimento*, *47*, 425–441. https://doi.org/10.34624/rtd.v47i0.38781

Schiffman, L. G., & Wisenblit, J. (2015). *Consumer behavior* (11th ed.). Pearson Education.

Silva Guerra, H. (2012). La importancia del comportamiento del consumidor: factor diferenciador de las organizaciones. *TEACS*, *4*(9), 37–49. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo6577541=

Solomon, M. R. (2020). *Consumer behavior: Buying, having, and being* (13th ed.). Pearson.

Vásquez Noriega, L. A., Díaz Cercado, J. G., Rojas Ortiz, J. M., & Sánchez Gaspar, V. K. (2024). Marketing digital en la efectividad de las estrategias de redes sociales en América 2020–2024: una revisión sistemática. *Revista de Ciencias y Artes*, *2*(3), 81–117. https://doi.org/10.37211/2789.1216.v2.n3.67

Capítulo IX

Análisis Multicriterio PRO: evaluación funcional de un sistema de apoyo a la decisión AHP–TOPSIS para vivienda social sostenible

Multicriteria Analysis PRO: Functional Evaluation of an AHP–TOPSIS Decision Support System for Sustainable Social Housing

Wilson Eduardo Jaramillo Sangurima
Universidad Internacional del Ecuador (UIDE)
wijaramillosa@uide.edu.ec
https://orcid.org/0000-0002-4058-5053
Quito, Ecuador

Resumen

La priorización de alternativas de vivienda social sostenible exige integrar criterios económicos, técnicos, ambientales, sociales y temporales, además de verificar condiciones mínimas de viabilidad. Este estudio diseñó y evaluó funcionalmente Análisis Multicriterio PRO, un sistema de apoyo a la decisión basado en requisitos de elegibilidad no compensatorios, Proceso Analítico Jerárquico (AHP), matriz ponderada, Técnica para el Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS) y análisis de sensibilidad. La investigación siguió un enfoque de Ciencia del Diseño y utilizó un caso demostrativo con cinco alternativas para un conjunto habitacional hipotético de 20 viviendas unifamiliares de 50 m², con urbanización básica equivalente. Se evaluaron costo de construcción, calidad estructural, eficiencia energética, impacto social y plazo de ejecución. ConstruccionSocial fue excluida por incumplir el requisito de permisos. La matriz AHP obtuvo CR=0.0030. La matriz ponderada ubicó a SostenibleHabitat en primer lugar, con 6.8417/10, mientras que TOPSIS priorizó a EcoCasa, con C*=0.6579. En los 25 escenarios de sensibilidad, EcoCasa mantuvo el primer lugar según TOPSIS. El sistema generó reportes trazables en formatos JSON y Excel. Los resultados evidencian el funcionamiento integrado de las etapas de elegibilidad, ponderación, priorización, sensibilidad y documentación, además de las diferencias entre reglas de agregación. El estudio corresponde a una evaluación funcional de un artefacto de software en un escenario demostrativo con datos sintéticos; por tanto, no constituye una evaluación empírica de sistemas constructivos reales ni recomienda una alternativa para proyectos ejecutados.

Palabras clave: Análisis multicriterio, vivienda social sostenible, AHP, TOPSIS, sistema de apoyo a la decisión, análisis de sensibilidad.

Abstract

Prioritizing sustainable social housing alternatives requires the integration of economic, technical, environmental, social, and time-related criteria, together with the verification of minimum feasibility conditions. This study designed and functionally evaluated Multicriteria Analysis PRO, a decision-support system based on non-compensatory eligibility requirements, the Analytic Hierarchy Process (AHP), weighted scoring, the Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS), and sensitivity analysis. The study followed a Design Science Research approach and used a demonstrative case comprising five alternatives for a hypothetical housing development of 20 single-family dwellings of 50 m² each, with equivalent basic urban infrastructure. Construction cost, structural quality, energy efficiency, social impact, and implementation time were assessed. ConstruccionSocial was excluded because it did not meet the permit requirement. The AHP matrix yielded CR=0.0030. Weighted scoring ranked SostenibleHabitat first, with 6.8417/10, whereas TOPSIS prioritized EcoCasa, with C*=0.6579. Across 25 sensitivity scenarios, EcoCasa retained the first TOPSIS position. The system generated traceable JSON and Excel reports. The results demonstrate the integrated operation of eligibility, weighting, prioritization, sensitivity, and reporting stages, while showing the differences associated with distinct aggregation rules. This study constitutes a functional evaluation of a software artifact in a demonstrative scenario using synthetic data; therefore, it is not an empirical assessment of real construction systems and does not recommend an alternative for implemented projects.

Keywords: Multicriteria analysis, sustainable social housing, AHP, TOPSIS, decision-support system, sensitivity analysis.

Introducción

La vivienda social sostenible constituye un ámbito prioritario para las políticas urbanas, habitacionales y de construcción, debido a la necesidad de responder simultáneamente a restricciones económicas, exigencias técnicas, desempeño ambiental, impacto social y plazos de ejecución. En este contexto, la selección de un sistema constructivo o de una alternativa de intervención no puede sustentarse únicamente en el menor costo inicial, pues cada opción implica compensaciones entre atributos que no siempre son directamente comparables. La sostenibilidad en edificación demanda, por tanto, modelos capaces de integrar variables heterogéneas y hacer explícitas las prioridades que orientan la decisión (Ding & Langston, 2004). Asimismo, la selección de proyectos sostenibles requiere considerar criterios tecnológicos, económicos, sociales y ambientales cuya relevancia depende del contexto institucional y territorial en el que se decide (Salimian et al., 2023).

Los métodos de decisión multicriterio, conocidos como Multi-Criteria Decision Making (MCDM), permiten estructurar problemas en los que un conjunto finito de alternativas debe evaluarse a partir de múltiples criterios, con unidades, escalas y sentidos de preferencia diferentes. En el ámbito de la construcción, estos enfoques se han utilizado para seleccionar métodos constructivos con mejor desempeño ambiental (Tsai et al., 2013), evaluar proyectos mediante criterios de tiempo, costo, calidad, seguridad y sostenibilidad (Taylan et al., 2014), y apoyar la selección de proyectos sostenibles bajo condiciones de incertidumbre (Fallahpour et al., 2020). En conjunto, estos estudios muestran que una decisión transparente requiere definir los criterios, asignar pesos, establecer reglas de agregación y comunicar de forma verificable el ranking resultante.

Entre los métodos más utilizados se encuentran el Proceso Analítico Jerárquico o Analytic Hierarchy Process (AHP) y la Técnica para el Orden de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal o Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). AHP permite obtener prioridades relativas a partir de comparaciones pareadas y verificar la coherencia interna de los juicios mediante el índice y la razón de consistencia (Saaty & Vargas, 2012). Por su parte, TOPSIS ordena las alternativas según su cercanía a una solución ideal positiva y su alejamiento respecto de una solución ideal negativa, considerando simultáneamente criterios de beneficio y de costo (Hwang & Yoon, 1981). La aplicación

conjunta de ambos métodos permite, por una parte, fundamentar la ponderación de los criterios y, por otra, contrastar las alternativas mediante una lógica de proximidad relativa al desempeño ideal.

No obstante, la formulación matemática de un ranking no resuelve por sí sola todas las exigencias de una decisión aplicable en proyectos de vivienda social. Antes de comparar preferencias, es necesario verificar si las alternativas cumplen condiciones mínimas de elegibilidad, tales como disponibilidad de terreno, estudios técnicos, permisos, financiamiento básico y viabilidad normativa. Estas condiciones no deben tratarse como atributos compensables: una ventaja en costo, plazo o calidad no debería permitir que una alternativa sin condiciones mínimas de viabilidad permanezca en competencia. La incorporación de restricciones y condiciones de decisión junto con los criterios de evaluación ha sido identificada como un componente relevante en la selección de proyectos de construcción (Ebrahimnejad et al., 2012).

Además, los rankings multicriterio dependen de los pesos asignados a los criterios y de la regla de agregación empleada. Una matriz ponderada permite compensaciones lineales entre desempeños normalizados, mientras que TOPSIS privilegia el equilibrio relativo de cada alternativa respecto de las soluciones ideal y antiideal. Por ello, un resultado de priorización debe acompañarse de un análisis de sensibilidad que permita examinar la estabilidad del ranking ante variaciones razonables en las preferencias de los decisores. Esta revisión resulta especialmente relevante en construcción, donde las prioridades institucionales pueden cambiar entre costo, calidad, plazo, riesgo y desempeño ambiental (Banihashemi et al., 2021; Plebankiewicz et al., 2021).

Si bien la literatura documenta aplicaciones de AHP, TOPSIS y otros modelos MCDM en la selección de proyectos y sistemas constructivos, persiste la necesidad de herramientas operativas que integren, en un flujo único y auditable, la validación de requisitos de elegibilidad, la ponderación consistente de criterios, la comparación de alternativas mediante distintas reglas de agregación, el análisis de sensibilidad y la generación de reportes reproducibles. Esta necesidad es particularmente pertinente en decisiones de vivienda social sostenible, donde el proceso debe ser comprensible para técnicos, gestores, evaluadores y responsables institucionales.

En respuesta a esta necesidad, se desarrolló Análisis Multicriterio PRO, una aplicación de escritorio orientada a apoyar la priorización de alternativas de vivienda social sostenible. El sistema integra el registro de alternativas y criterios, la verificación no compensatoria de requisitos mínimos, la ponderación mediante AHP, la generación de rankings por matriz ponderada y TOPSIS, el análisis de sensibilidad y la exportación de reportes trazables en formatos JSON y Excel. La contribución del estudio consiste en proponer y evaluar funcionalmente un flujo de decisión que diferencia las condiciones habilitantes de las preferencias compensables, verifica la consistencia de los pesos y permite comparar los resultados obtenidos mediante dos reglas de agregación.

En este marco, la investigación se plantea la siguiente pregunta: ¿en qué medida Análisis Multicriterio PRO permite ejecutar de forma consistente y trazable la priorización de alternativas de vivienda social sostenible mediante requisitos de elegibilidad, AHP, matriz ponderada, TOPSIS y análisis de sensibilidad? El objetivo fue diseñar y evaluar funcionalmente el sistema como apoyo a la decisión multicriterio, verificando la elegibilidad de las alternativas, la consistencia de las ponderaciones, la generación de rankings y la estabilidad de los resultados frente a variaciones en los pesos de los criterios.

Metodología

Enfoque y diseño de investigación

La investigación se desarrolló con un enfoque aplicado, de alcance descriptivo-evaluativo y con orientación de Ciencia del Diseño (Design Science Research, DSR). Su propósito fue diseñar y evaluar funcionalmente Análisis Multicriterio PRO, un artefacto de software orientado a apoyar la priorización de alternativas de vivienda social sostenible mediante técnicas de decisión multicriterio.

El estudio siguió las etapas propuestas para DSR: identificación del problema, definición de los objetivos de la solución, diseño y desarrollo del artefacto, demostración, evaluación y comunicación (Peffers et al., 2007). El problema se abordó como una decisión multicriterio discreta: un conjunto finito de alternativas constructivas se evaluó simultáneamente mediante criterios económicos, técnicos, ambientales, sociales y temporales.

La evaluación tuvo carácter funcional. Por tanto, se verificó que el software ejecutara de forma integrada y trazable el registro de información, la validación de requisitos, la ponderación AHP, la generación de rankings por matriz ponderada y TOPSIS, el análisis de sensibilidad y la exportación de resultados. El estudio no buscó validar la superioridad real de una alternativa constructiva ni estimar precios, indicadores ambientales o desempeños aplicables a proyectos ejecutados.

Diseño del artefacto

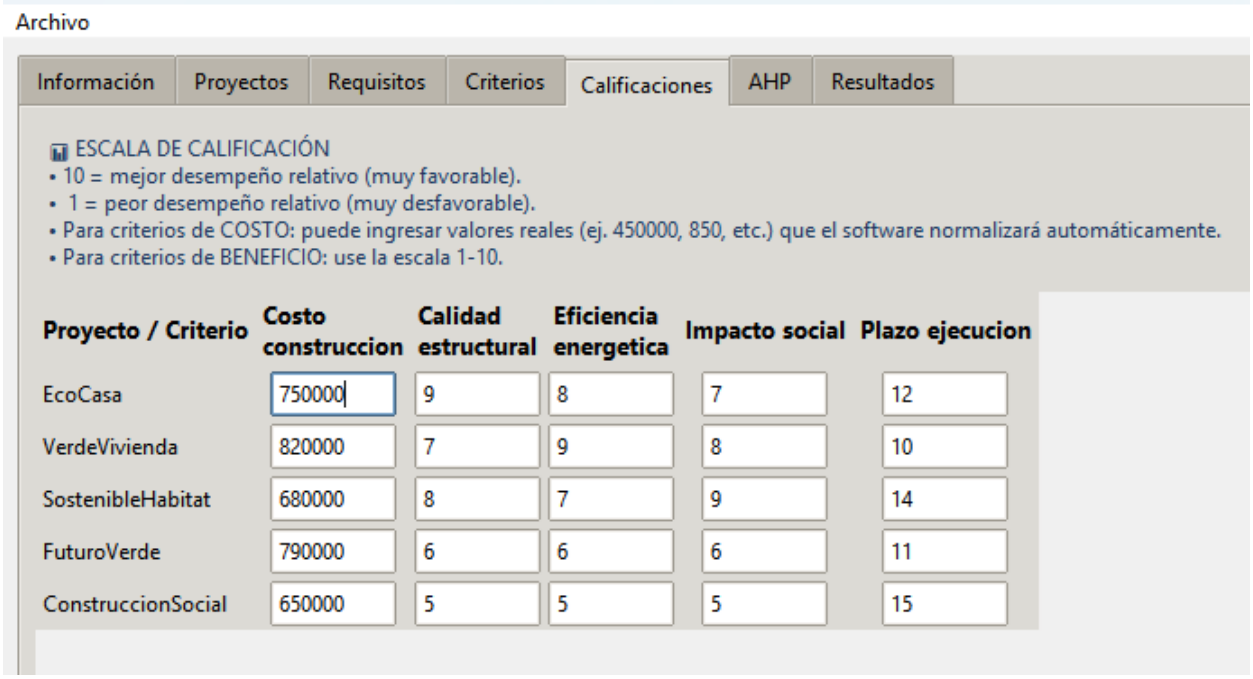
Análisis Multicriterio PRO se diseñó como una aplicación de escritorio para estructurar decisiones de selección de alternativas de vivienda social sostenible (Figura 1). El sistema integra los siguientes módulos funcionales:

- Registro de información general de la evaluación: nombre, fecha, participantes, fuentes de datos y observaciones.
- Registro y administración de alternativas de proyecto.
- Verificación de requisitos mínimos de elegibilidad.
- Definición de criterios, tipo de criterio, unidad de medida y peso.
- Registro de calificaciones cualitativas o valores cuantitativos.
- Comparaciones pareadas y cálculo de pesos mediante AHP.
- Priorización mediante matriz ponderada y TOPSIS.
- Análisis de sensibilidad ante variaciones de los pesos.
- Exportación de información y resultados en archivos JSON y Excel.

El sistema diferencia dos tipos de información. El primer grupo corresponde a requisitos de elegibilidad, considerados condiciones habilitantes y no compensatorias. El segundo corresponde a criterios de preferencia, utilizados para comparar las alternativas elegibles.

Esta separación evita que una ventaja relativa en costo, plazo o desempeño técnico compense el incumplimiento de una condición mínima de viabilidad.

Figura 1.
Interfaz del software Análisis Multicriterio PRO.



Nota. Elaboración propia

Caso demostrativo

La evaluación funcional se realizó mediante un caso demostrativo de vivienda social sostenible compuesto por cinco alternativas: EcoCasa, VerdeVivienda, SostenibleHabitat, FuturoVerde y ConstruccionSocial.

Para garantizar comparabilidad, se configuró un conjunto habitacional hipotético de 20 viviendas unifamiliares de 50 m² cada una, con un área construida total de 1.000 m². Todas las alternativas respondieron al mismo programa arquitectónico: dos dormitorios, sala-comedor, cocina, baño, área de lavado y posibilidad de crecimiento progresivo.

Asimismo, se asumió que cada alternativa incluía obras equivalentes de urbanización básica:

- Vías internas asfaltadas, aceras, bordillos y señalización básica.

- Red de agua potable y acometidas domiciliarias.
- Alcantarillado sanitario y drenaje pluvial.
- Red eléctrica, alumbrado público y acometidas domiciliarias.
- Obras complementarias básicas de urbanización.

En consecuencia, las diferencias entre alternativas se asociaron exclusivamente con el sistema constructivo, el costo total, la calidad estructural, la eficiencia energética, el impacto social y el plazo de ejecución. Los datos fueron sintéticos y se definieron únicamente para probar el funcionamiento integrado del software. Por esta razón, no representan presupuestos oficiales, precios de mercado, diseños definitivos, análisis de ciclo de vida ni recomendaciones para proyectos reales de vivienda social en Ecuador.

Alternativas y requisitos

El sistema registró cinco alternativas, las cuales fueron evaluadas frente a los siguientes requisitos mínimos de elegibilidad: disponibilidad de terreno, estudios técnicos, permisos, financiamiento básico y viabilidad normativa.

Los requisitos se definieron como condiciones no compensatorias. Para cada alternativa i, el indicador de elegibilidad se expresa como:

$$E_i = \prod_{r=1}^{q} g_{ir}$$

Donde Ei representa la condición de elegibilidad de la alternativa i, q corresponde al número de requisitos mínimos, g_{ir} toma el valor de 1 si la alternativa i cumple el requisito r, y 0 si no lo cumple.

Una alternativa se consideró elegible solo si:

$E_i = 1$

Si Ei =0, la alternativa fue excluida de la matriz ponderada, del cálculo TOPSIS y del análisis de sensibilidad. En el caso demostrativo, ConstruccionSocial fue configurada como alternativa no elegible debido al incumplimiento del requisito de permisos.

Criterios de evaluación

En la Tabla 1 se observan los cinco criterios de preferencia definidos:

Tabla 1.
Criterios de evaluación

Criterio	**Tipo**	**Unidad o escala**
Costo de construcción (total del conjunto habitacional y urbanización básica)	Costo	USD
Calidad estructural	Beneficio	Escala de 1 a 10
Eficiencia energética	Beneficio	Escala de 1 a 10
Impacto social	Beneficio	Escala de 1 a 10
Plazo de ejecución	Costo	Meses

El costo de construcción correspondió al valor total estimado para ejecutar el conjunto habitacional de 20 viviendas y las obras equivalentes de urbanización básica. Los valores fueron expresados en dólares estadounidenses, moneda de curso legal en Ecuador.

Los costos simulados fueron USD 750.000 para EcoCasa, USD 820.000 para VerdeVivienda, USD 680.000 para SostenibleHabitat, USD 790.000 para FuturoVerde y USD 650.000 para ConstruccionSocial. Estos valores equivalen a un rango aproximado de USD 32.500 a USD 41.000 por vivienda, o de USD 650 a USD 820 por m² construido.

Las diferencias de costo se asociaron con la complejidad relativa de los sistemas constructivos. Las alternativas que incorporaron soluciones de eficiencia energética, materiales de mejor desempeño o estrategias bioclimáticas tuvieron costos iniciales superiores. Por el contrario, los sistemas estandarizados, con especificaciones convencionales o mayor uso de componentes locales, registraron menores costos de inversión.

Ponderación AHP

Los pesos de los criterios se determinaron mediante AHP, método que organiza el problema de decisión en una jerarquía y permite obtener prioridades relativas a partir de comparaciones pareadas (Saaty & Vargas, 2012).

$$A = [a_{ij}]$$

Donde aij expresa la importancia relativa del criterio i frente al criterio j. La matriz cumple las siguientes propiedades:

$$a_{ii} = 1$$

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}$$

$$a_{ij} > 0$$

Las comparaciones se realizaron con la escala fundamental de Saaty, que utiliza valores de 1 a 9. El valor 1 representa igual importancia entre dos criterios y el valor 9 representa importancia extrema de un criterio sobre otro (Saaty & Vargas, 2012).

El vector de pesos w se obtiene mediante el vector propio principal de la matriz de comparación:

$$Aw = \lambda_{max} w$$

donde: A es la matriz de comparaciones pareadas, w es el vector de pesos de los criterios, λ_{max} es el valor propio principal de la matriz.

Los pesos se normalizaron para cumplir:

$$\sum_{j=1}^{n} w_j = 1$$

Donde w_j representa el peso del criterio j, y n es el número total de criterios. La consistencia de los juicios se verificó mediante el índice de consistencia:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Posteriormente, se calculó la razón de consistencia:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Donde RI corresponde al índice aleatorio asociado al orden de la matriz. Estas expresiones son parte del procedimiento estándar de AHP para evaluar la consistencia de los juicios pareados (Saaty & Vargas, 2012). Se aceptaron matrices con: CR<0.10

Matriz ponderada

La matriz ponderada se utilizó para generar un primer ranking de las alternativas elegibles. Se partió de una matriz de decisión:

$$X = [x_{ij}]$$

Donde x_{ij} representa el desempeño de la alternativa i respecto al criterio j.

Como los criterios se expresaron en distintas escalas, los valores fueron normalizados. Para un criterio de beneficio, en el que un valor más alto representa un mejor desempeño, se utilizó:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - min(x_j)}{max(x_j) - min(x_j)}$$

Para un criterio de costo, en el que un valor menor es preferible, se utilizó:

$$r_{ij} = \frac{max(x_j) - x_{ij}}{max(x_j) - min(x_j)}$$

Donde: r_{ij} es el desempeño normalizado de la alternativa i en el criterio j, $min(x_j)$ y $max(x_j)$ corresponden a los valores mínimo y máximo observados en dicho criterio.

El puntaje ponderado de cada alternativa se calculó como:

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} w_j \mathrm{r_{ij}}$$

Donde: S_i representa el puntaje total de la alternativa, w_j es el peso del criterio j derivado mediante AHP, y $\mathrm{r_{ij}}$ es el desempeño normalizado.

Para facilitar la interpretación, el resultado se expresó en una escala de 0 a 10:

$$P_i = 10S_i$$

Las alternativas se ordenaron en forma descendente según P_i. La alternativa con mayor valor ocupó el primer lugar.

Método TOPSIS

TOPSIS se aplicó para ordenar las alternativas elegibles según su cercanía relativa a una solución ideal positiva y su distancia respecto de una solución ideal negativa. La aplicación del método se fundamentó en el procedimiento de Hwang y Yoon (1981).

$$\mathrm{r_{ij}} = \frac{\mathrm{x_{ij}}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} (\mathrm{x_{ij}})^2}}$$

Donde m corresponde al número de alternativas elegibles. Posteriormente, se construyó la matriz normalizada ponderada:

$$\mathrm{V_{ij}} = w_j \mathrm{r_{ij}}$$

La solución ideal positiva se definió como:

$$A^+ = \{\mathrm{V_1}^+, \mathrm{V_2}^+, \ldots, \mathrm{V_n}^+\}$$

Para los criterios de beneficio:

$$\mathrm{V_j}^+ = max_i(\mathrm{V_{ij}})$$

Para criterios de costo:

$$V_j^+ = min_i(V_{ij})$$

La solución ideal negativa se definió de manera inversa:

$$A^- = \{V_1^-, V_2^-, \ldots, V_n^-\}$$

Para criterios de beneficio:

$$V_j^- = min_i(V_{ij})$$

Para criterios de costo:

$$V_j^- = max_i(V_{ij})$$

La lógica de estas soluciones es que la ideal positiva maximiza los criterios de beneficio y minimiza los criterios de costo, mientras que la ideal negativa opera de manera inversa (Hwang & Yoon, 1981). Luego se calcularon las distancias euclidianas de cada alternativa respecto de la solución ideal positiva y negativa:

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(V_{ij} - V_j^+)^2}$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(V_{ij} - V_j^-)^2}$$

Finalmente, se calculó el coeficiente de cercanía relativo:

$$C_i^* = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-}$$

Donde el valor de C_i^* se encuentra entre 0 y 1. Un valor más próximo a 1 representa una mayor proximidad a la solución ideal positiva y, por tanto, una posición más alta en el ranking TOPSIS.

Análisis de sensibilidad

La estabilidad del ranking se examinó mediante 25 escenarios de sensibilidad. El análisis modificó el peso de cada criterio en cinco niveles:

$$-20\%, -10\%, 0\%, +10\%, +20\%$$

Para cada criterio j, y el escenario s, el peso modificado se definió como:

$$w_j{}^{(s)} = w_j(1 + \delta_s)$$

Donde: $w_j{}^{(s)}$ representa el peso modificado del criterio j en el escenario s, w_j es el peso original y δ_s corresponde a la variación aplicada.

Los pesos de los criterios restantes se redistribuyeron proporcionalmente y se normalizaron para conservar la condición:

$$\sum_{j=1}^{n} w_j{}^{(s)} = 1$$

En cada escenario se recalculó el ranking TOPSIS y se registró la alternativa priorizada. El análisis de sensibilidad permitió observar la variación del ranking ante cambios en las preferencias relativas de los decisores, especialmente en las compensaciones entre costo, tiempo, calidad y riesgo, relevantes en la gestión de proyectos de construcción (Banihashemi et al., 2021; Plebankiewicz et al., 2021).

Evaluación funcional y trazabilidad

La evaluación funcional verificó que Análisis Multicriterio PRO pudiera registrar la información general de la evaluación; incorporar alternativas, requisitos, criterios y calificaciones; aplicar el filtro no compensatorio de elegibilidad; procesar la matriz AHP y

calcular pesos y consistencia; generar la matriz ponderada y el ranking TOPSIS; ejecutar escenarios de sensibilidad; y exportar resultados en formatos JSON y Excel.

La trazabilidad se definió como la capacidad del sistema para conservar y reportar los datos de entrada, los criterios, los requisitos de elegibilidad, los pesos, los resultados intermedios y los rankings generados. La exportación de los resultados permitió revisar el proceso de decisión y facilitó su documentación. Este tipo de integración es consistente con el propósito de los sistemas de apoyo a la decisión para la selección sostenible de proyectos de construcción (Fallahpour et al., 2020).

Alcance y consideraciones éticas

El estudio se limitó al diseño y evaluación funcional de Análisis Multicriterio PRO en un escenario demostrativo con datos sintéticos. Se verificó la integración del filtro de elegibilidad, AHP, matriz ponderada, TOPSIS, análisis de sensibilidad y reportes trazables. Los datos no corresponden a precios de mercado, presupuestos oficiales, proyectos ejecutados ni indicadores certificados; por tanto, los resultados no recomiendan sistemas constructivos reales. No participaron personas ni se utilizaron datos personales. La validación futura deberá evaluar usabilidad, utilidad y desempeño con técnicos y gestores de vivienda social mediante pruebas basadas en tareas, métricas de efectividad, eficiencia, satisfacción y entrevistas.

Resultados

La evaluación funcional se realizó con un caso demostrativo de cinco alternativas de vivienda social sostenible. Todas las alternativas representaron conjuntos habitacionales equivalentes de 20 viviendas unifamiliares de 50 m², con una superficie construida referencial de 1.000 m² y obras de urbanización básica equivalentes. Los datos fueron sintéticos y se emplearon exclusivamente para verificar el funcionamiento integrado de Análisis Multicriterio PRO; por ello, los resultados no constituyen recomendaciones para proyectos reales.

Evaluación de elegibilidad

El filtro no compensatorio de elegibilidad se ejecutó antes de los procedimientos de agregación multicriterio. EcoCasa, VerdeVivienda, SostenibleHabitat y FuturoVerde cumplieron los cinco requisitos mínimos y fueron incorporadas al análisis posterior. ConstruccionSocial fue descartada por incumplir el requisito de permisos, aun cuando presentó el menor costo estimado. Este resultado confirma que el sistema distingue entre condiciones habilitantes y criterios de preferencia: una ventaja económica no compensa la ausencia de una condición mínima de viabilidad (Tabla 2).

Tabla 2.
Estado de elegibilidad de las alternativas evaluadas

Alternativa	**Estado**	**Resultado**
EcoCasa	Apta	Cumplió los cinco requisitos
VerdeVivienda	Apta	Cumplió los cinco requisitos
SostenibleHabitat	Apta	Cumplió los cinco requisitos
FuturoVerde	Apta	Cumplió los cinco requisitos
ConstruccionSocial	Descartada	Incumplió el requisito de permisos

Ponderación y consistencia AHP

La matriz de comparaciones pareadas procesada por el sistema produjo un valor propio principal de $\lambda max = 5.0133$, un índice de consistencia de $CI = 0.0033$ y una razón de consistencia de $CR = 0.0030$ (Tabla 3). Dado que este último valor es inferior al umbral de 0.10, los juicios configurados se consideran internamente consistentes para el caso demostrativo. El costo de construcción recibió el mayor peso (36.83 %), seguido de la calidad estructural y la eficiencia energética (20.64 % cada una) como se observa en la Tabla 4.

Tabla 3.
Indicadores de consistencia de la matriz AHP

Indicador	Valor	Estado
λmax	5.0133	—
CI	0.0033	—
CR	0.0030	Consistente
Umbral de aceptación	< 0.10	Cumplido

Tabla 4.
Pesos de los criterios de evaluación obtenidos mediante AHP

Criterio	Tipo	Peso (%)
Costo de construcción	Costo	36.83
Calidad estructural	Beneficio	20.64
Eficiencia energética	Beneficio	20.64
Impacto social	Beneficio	10.94
Plazo de ejecución	Costo	10.94

Matriz ponderada

La matriz ponderada generó un primer ordenamiento de las alternativas aptas. Los puntajes se expresan en una escala de 0 a 10, obtenida al multiplicar por 10 la suma ponderada de los valores normalizados; esta precisión permite interpretar correctamente las magnitudes reportadas. SostenibleHabitat ocupó el primer lugar con 6.8417 puntos, seguida de EcoCasa con 6.1935 (Tabla 5). Su posición se explica por el menor costo entre las alternativas elegibles y la mayor calificación en impacto social, ventajas que compensaron su plazo de ejecución más alto y su desempeño intermedio en eficiencia energética.

Tabla 5.
Resultados de la matriz ponderada y ranking de alternativas

Alternativa	Costo (USD)	Calidad	Eficiencia	Impacto	Plazo (meses)	Puntaje /10	Ranking
SostenibleHabitat	680,000	8	7	9	14	6.8417	1
EcoCasa	750,000	9	8	7	12	6.1935	2
VerdeVivienda	820,000	7	9	8	10	4.5759	3
FuturoVerde	790,000	6	6	6	11	1.6101	4
ConstruccionSocial	650,000	5	5	5	15	No aplicable	Descartada

Resultados TOPSIS

TOPSIS produjo un ordenamiento distinto en las dos primeras posiciones (Tabla 6). EcoCasa fue priorizada con un coeficiente de cercanía de C* = 0.6579, seguida de SostenibleHabitat (C* = 0.5860). El resultado indica que EcoCasa presentó el mejor equilibrio relativo respecto de la solución ideal positiva y la solución ideal negativa, considerando simultáneamente costo, calidad estructural, eficiencia energética, impacto social y plazo de ejecución. En cambio, FuturoVerde registró el menor coeficiente de cercanía (C* = 0.1886).

Tabla 6.
Resultados de priorización mediante TOPSIS

Alternativa	D+	D−	C*	Ranking
EcoCasa	0.0277	0.0532	0.6579	1
SostenibleHabitat	0.0356	0.0504	0.5860	2
VerdeVivienda	0.0440	0.0490	0.5268	3
FuturoVerde	0.0673	0.0156	0.1886	4

Comparación de rankings

Los dos métodos coincidieron en excluir a ConstruccionSocial y en ubicar a FuturoVerde en la última posición entre las alternativas aptas (Tabla 7). La diferencia se concentró en la alternativa líder: la matriz ponderada priorizó a SostenibleHabitat, mientras que TOPSIS priorizó a EcoCasa. Esta divergencia no constituye una inconsistencia del software; expresa las diferentes lógicas de agregación empleadas. La matriz ponderada permite compensaciones lineales entre desempeños normalizados, mientras que TOPSIS valora la proximidad simultánea a la solución ideal y el alejamiento de la solución antiideal.

Tabla 7.
Comparación de rankings: matriz ponderada y TOPSIS

Posición	Matriz ponderada	TOPSIS
1	SostenibleHabitat	EcoCasa
2	EcoCasa	SostenibleHabitat
3	VerdeVivienda	VerdeVivienda
4	FuturoVerde	FuturoVerde

Análisis de sensibilidad

Se ejecutaron 25 corridas de sensibilidad mediante variaciones de −20 %, −10 %, 0 %, +10 % y +20 % en el peso de cada uno de los cinco criterios. Las cinco corridas con variación de 0 % corresponden al escenario base y, por tanto, son equivalentes entre sí. En las 25 corridas, EcoCasa conservó el primer lugar según TOPSIS, lo que evidencia estabilidad del liderazgo dentro del rango de variaciones evaluado. Sin embargo, la distancia con SostenibleHabitat fue sensible al peso del costo de construcción: al incrementar dicho peso en 20 %, SostenibleHabitat alcanzó C* = 0.6246 frente a 0.6359 de EcoCasa. La menor diferencia observada fue de 0.0113, sin que se invirtiera el orden de prioridad (Tabla 8).

Tabla 8.

Síntesis de resultados del análisis de sensibilidad TOPSIS ante variaciones en los pesos de los criterios.

Indicador de sensibilidad	Resultado
Corridas ejecutadas	25
Escenarios únicos de variación no nula	20
Corridas del escenario base (0 %)	5
Líder TOPSIS en todas las corridas	EcoCasa
Rango de C* de EcoCasa	0.6252 a 0.6912
Menor brecha EcoCasa–SostenibleHabitat	0.0113 (costo +20 %)

Síntesis de la evaluación funcional

La prueba funcional verificó la integración de la carga de datos, la validación de requisitos, la ponderación AHP, la generación de la matriz ponderada, la aplicación de TOPSIS, el análisis de sensibilidad y la exportación de resultados. La trazabilidad se mantuvo mediante el registro de alternativas, requisitos, criterios, calificaciones, pesos, resultados intermedios y rankings. Los hallazgos deben interpretarse como evidencia de funcionamiento técnico en un escenario controlado con datos sintéticos; una validación aplicada requerirá proyectos reales, presupuestos verificables, indicadores de desempeño ambiental, requisitos normativos vigentes y participación de expertos.

DISCUSIÓN

Los resultados de la evaluación funcional muestran que Análisis Multicriterio PRO articula, en una secuencia operativa única, requisitos de elegibilidad, ponderación AHP, matriz

ponderada, TOPSIS, análisis de sensibilidad y reportes trazables. Esta integración responde al planteamiento de Ding y Langston (2004), para quienes la sostenibilidad en edificación exige abordar simultáneamente dimensiones heterogéneas. En el caso analizado, costo, calidad estructural, eficiencia energética, impacto social y plazo de ejecución no se redujeron a un único atributo, sino que fueron tratados como criterios con lógicas de valoración diferenciadas.

La exclusión de ConstruccionSocial constituye un resultado central. Aunque presentó el menor costo estimado, fue descartada por incumplir el requisito de permisos. Este hallazgo refuerza la necesidad de diferenciar factibilidad y preferencia: los requisitos normativos, técnicos y financieros mínimos son condiciones habilitantes, no atributos compensables. Tal distinción amplía los enfoques de selección de proyectos sostenibles revisados por Salimian et al. (2023) y Fallahpour et al. (2020), al incorporar una etapa previa de admisibilidad que evita que una ventaja económica o de desempeño relativo legitime una alternativa inviable.

La razón de consistencia AHP obtenida (CR = 0.0030) confirma la coherencia interna de los juicios pareados configurados, en concordancia con el procedimiento propuesto por Saaty y Vargas (2012). Sin embargo, un CR bajo no valida la importancia sustantiva de los pesos ni permite generalizarlos a contextos reales. La consistencia matemática asegura compatibilidad lógica entre comparaciones, pero la legitimidad de las preferencias requiere evidencia local, participación de expertos y deliberación entre actores involucrados.

La discrepancia entre la matriz ponderada y TOPSIS constituye el principal hallazgo analítico. SostenibleHabitat lideró la matriz ponderada (6.8417/10), mientras EcoCasa fue priorizada por TOPSIS ($C^* = 0.6579$). Esta diferencia es coherente con la literatura sobre MCDM aplicada a construcción, incluida la integración AHP–TOPSIS planteada por Taylan et al. (2014), pero revela una tensión conceptual relevante: la suma ponderada admite compensaciones lineales entre criterios, mientras TOPSIS privilegia el equilibrio global frente a soluciones ideal y antiideal. Por tanto, ningún ranking debe interpretarse como una verdad automática; la elección del método expresa una postura sobre qué compensaciones son aceptables en la decisión.

El análisis de sensibilidad complementa esta interpretación. EcoCasa mantuvo el primer lugar en las 25 corridas evaluadas, aunque la brecha frente a SostenibleHabitat se redujo a 0.0113 cuando el peso del costo aumentó 20 %. Esto evidencia estabilidad dentro del rango explorado, pero no demuestra robustez universal: el resultado depende de los intervalos de variación, la estructura de los datos y las preferencias adoptadas. En línea con Banihashemi et al. (2021) y Plebankiewicz et al. (2021), la sensibilidad debe entenderse como una herramienta de transparencia sobre la dependencia del ranking respecto de las prioridades decisionales.

La contribución novedosa de esta perspectiva radica en hacer explícita la arquitectura de la decisión: primero se verifican límites no negociables; después se comparan preferencias mediante métodos con lógicas distintas; finalmente se examina la estabilidad de la prioridad. De este modo, el software no reemplaza el juicio profesional, sino que hace auditables sus supuestos y evidencia que la selección sostenible exige tanto cálculo multicriterio como justificación institucional de los criterios, los pesos y las reglas de agregación.

Conclusiones

El estudio cumplió el objetivo de diseñar y evaluar funcionalmente Análisis Multicriterio PRO como sistema de apoyo para priorizar alternativas de vivienda social sostenible. La evaluación demostró que el software integra en un flujo trazable la validación de requisitos de elegibilidad, la ponderación mediante AHP, la matriz ponderada, TOPSIS, el análisis de sensibilidad y la generación de reportes. El filtro no compensatorio excluyó a ConstruccionSocial por incumplir el requisito de permisos, pese a su menor costo estimado, confirmando que las condiciones habilitantes deben verificarse antes de comparar preferencias. Asimismo, la razón de consistencia AHP de CR = 0.0030 mostró coherencia interna en los juicios configurados para el caso demostrativo.

Los resultados también evidenciaron que la priorización depende de la regla de agregación seleccionada. SostenibleHabitat obtuvo el primer lugar mediante matriz ponderada, mientras EcoCasa fue priorizada por TOPSIS con un coeficiente de cercanía de 0.6579. Esta diferencia muestra que los métodos multicriterio no producen una verdad única, sino resultados asociados a lógicas matemáticas distintas: la matriz ponderada admite compensaciones

lineales entre criterios, mientras TOPSIS privilegia el equilibrio relativo respecto de las soluciones ideal y antiideal. La contribución del estudio consiste, por tanto, en integrar estas aproximaciones dentro de una herramienta que hace explícitos los requisitos, los pesos, los resultados intermedios y los efectos de las preferencias sobre el ranking.

El análisis de sensibilidad mostró que EcoCasa conservó el primer lugar en las 25 corridas ejecutadas, aunque su ventaja frente a SostenibleHabitat disminuyó cuando aumentó el peso asignado al costo. Este resultado aporta evidencia de estabilidad dentro de los intervalos evaluados, pero no permite afirmar una robustez universal, ya que el ranking depende de los datos, las ponderaciones y los rangos de variación definidos.

La principal limitación del estudio es el uso de datos sintéticos y un escenario controlado; por ello, los hallazgos validan el funcionamiento técnico del sistema, no la superioridad real de una alternativa constructiva.

Investigaciones futuras deberán completar el ciclo de Ciencia del Diseño mediante una evaluación de usabilidad y utilidad percibida con usuarios finales. Se propone realizar pruebas de uso basadas en tareas con técnicos, profesionales responsables de presupuestos, especialistas en evaluación de proyectos y gestores de vivienda social. Los participantes deberán configurar casos reales o semirreales, registrar alternativas y criterios, aplicar requisitos de elegibilidad, construir comparaciones AHP, interpretar los rankings y exportar reportes. La evaluación podrá combinar indicadores de efectividad —porcentaje de tareas completadas y errores—, eficiencia —tiempo requerido por tarea—, satisfacción y facilidad de uso percibidas, además de entrevistas semiestructuradas sobre comprensibilidad, trazabilidad, utilidad y confianza en los resultados. Esta validación deberá complementarse con proyectos reales, presupuestos verificables, requisitos normativos vigentes e indicadores ambientales contextualizados.

Referencias bibliográficas

Banihashemi, S. A., Khalilzadeh, M., Antucheviciene, J., & Šaparauskas, J. (2021). Trading off time–cost–quality in construction project scheduling problems with fuzzy

SWARA–TOPSIS approach. Buildings, 11(9), Article 387. https://doi.org/10.3390/buildings11090387

Ding, G., & Langston, C. (2004). Multiple criteria sustainability modelling: Case study on school buildings. International Journal of Construction Management, 4(2), 13–26. https://doi.org/10.1080/15623599.2004.10773057

Ebrahimnejad, S., Mousavi, S. M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Hashemi, H., & Vahdani, B. (2012). A novel two-phase group decision making approach for construction project selection in a fuzzy environment. Applied Mathematical Modelling, 36(9), 4197–4217. https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.050

Fallahpour, A., Wong, K. Y., Rajoo, S., Olugu, E. U., Nilashi, M., & Turskis, Z. (2020). A fuzzy decision support system for sustainable construction project selection: An integrated FPP-FIS model. Journal of Civil Engineering and Management, 26(3), 247–258. https://doi.org/10.3846/jcem.2020.12183

Hwang, C.-L., & Yoon, K. (1981). Multiple attribute decision making: Methods and applications—A state-of-the-art survey. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9

Peffers, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, S. (2007). A design science research methodology for information systems research. Journal of Management Information Systems, 24(3), 45–77. https://doi.org/10.2753/MIS0742-1222240302

Plebankiewicz, E., Zima, K., & Wieczorek, D. (2021). Modelling of time, cost and risk of construction with using fuzzy logic. Journal of Civil Engineering and Management, 27(6), 412–426. https://doi.org/10.3846/jcem.2021.15255

Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2012). Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process (2nd ed.). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6

Salimian, S., Mousavi, S. M., Tupenaite, L., & Antucheviciene, J. (2023). An integrated multi-criteria decision model to select sustainable construction projects under

intuitionistic fuzzy conditions. Buildings, 13(4), Article 848. https://doi.org/10.3390/buildings13040848

Taylan, O., Bafail, A. O., Abdulaal, R. M. S., & Kabli, M. R. (2014). Construction projects selection and risk assessment by fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS methodologies. Applied Soft Computing, 17, 105–116. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.01.003

Tsai, W.-H., Lin, S.-J., Lee, Y.-F., Chang, Y.-C., & Hsu, J.-L. (2013). Construction method selection for green building projects to improve environmental sustainability by using an MCDM approach. Journal of Environmental Planning and Management, 56(10), 1487–1510. https://doi.org/10.1080/09640568.2012.731385

Capítulo X

Ingeniería de reacciones químicas asistida por simulación aplicada a la hidrogenación selectiva de acetileno

Simulation-Assisted Chemical Reaction Engineering Applied to the Selective Hydrogenation of Acetylene

Francisco Javier Roque Rodríguez
Universidad Nacional de San Agustín
froque@unsa.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-7579-834X
Arequipa Perú

Paulino Rodolfo Zegarra Panca
Universidad Nacional de San Agustín
pzegarra1@unsa.edu.pe
https://orcid.org/0000-0002-8339-0280
Arequipa Perú

Resumen

La ingeniería de reacciones químicas enfrenta el reto de pasar de una lectura centrada únicamente en la conversión hacia una evaluación integrada de selectividad, rendimiento y ventana de operación. En este capítulo se desarrolla un estudio aplicado de reacciones consecutivas tomando como caso la hidrogenación de acetileno a etileno y su posterior sobrehidrogenación a etano. Se formuló un modelo dinámico para un reactor discontinuo de volumen constante mediante balances de materia y cinética bimolecular. El sistema generado de ecuaciones diferenciales ordinarias se resolvió con el método Runge-Kutta de cuarto orden (RK4) y se analizó los perfiles de concentración, velocidades de reacción, conversión, selectividad y rendimiento. Para un escenario base, el modelo identificó por simulación una región de máxima formación de etileno cercana a 5,70 min con 1,1787 mol de producto, mostrando que la conversión puede continuar aumentando aun cuando el producto deseado comienza a consumirse. Un análisis de sensibilidad de la constante asociada a la reacción secundaria evidenció cómo la aceleración de la sobrehidrogenación desplaza y reduce el máximo de etileno. El estudio mostró que la simulación mecanística puede convertir principios clásicos de ingeniería de reacciones en criterios cuantitativos para explorar escenarios, justificar decisiones operacionales y preparar modelos de mayor complejidad.

Palabras clave: Cinética química, Reacciones consecutivas, Simulación computacional, Reactor discontinuo, Sobrehidrogenación.

Abstract

Chemical reaction engineering faces the challenge of moving from an analysis focused only on conversion toward an integrated assessment of selectivity, yield, and operating window. This chapter develops an applied study of consecutive reactions using acetylene hydrogenation to ethylene and its subsequent over-hydrogenation to ethane as a case study. A dynamic constant-volume batch reactor model was formulated from material balances and bimolecular kinetic laws. The resulting system of ordinary differential equations was solved using the fourth-order Runge-Kutta method, and concentration profiles, reaction rates, conversion, selectivity, and yield were analyzed. For the base scenario, the model identifies a region of maximum ethylene formation near 5.70 min, with 1.1787 mol of product, showing that conversion may continue to increase even after the desired product begins to be consumed. A sensitivity analysis of the kinetic constant associated with the secondary reaction illustrates how faster over-hydrogenation shifts and reduces the ethylene maximum. The study shows that mechanistic simulation can transform classical reaction-engineering principles into quantitative criteria for exploring scenarios, supporting operational decisions, and preparing models of greater complexity.

Keywords: Chemical kinetics, Consecutive reactions, Computational simulation, Batch reactor, Over-hydrogenation

Introducción

La industria química no transforma materias primas únicamente para hacerlas desaparecer como reactivos; las transforma para obtener productos con una composición, calidad y valor determinados. Esta diferencia, aparentemente sencilla, explica por qué la conversión por sí sola no basta para juzgar el desempeño de un reactor cuando en el medio reactivo ocurren varias reacciones. En un sistema selectivo, el problema de ingeniería consiste en conducir la materia hacia la ruta de mayor interés y evitar, en la medida de lo posible, que el producto deseado continúe reaccionando. La Ingeniería de Reacciones Químicas proporciona el marco para estudiar este problema mediante tres elementos inseparables: estequiometría, cinética y balances de materia. El primero establece cómo se relacionan cuantitativamente las especies; el segundo describe la rapidez con que se producen las transformaciones; y el tercero obliga a que el modelo respete la conservación de la materia. Sobre esta base se construyen modelos capaces de describir la evolución de un reactor y de comparar condiciones de operación (Fogler, 2016; Froment et al., 2011).

El interés contemporáneo por estos fundamentos no ha disminuido con el crecimiento de la inteligencia artificial, la automatización o los gemelos digitales. Por el contrario, las nuevas herramientas han ampliado la capacidad de explorar modelos, analizar datos y optimizar procesos. McMullen y Jurica (2024) muestran cómo la experimentación rica en datos y el desarrollo de procesos asistido por máquinas pueden acelerar la optimización de reacciones, mientras que Gao (2024) revisa aplicaciones de aprendizaje automático en diseño de catalizadores, predicción cinética y condiciones de reacción utilizando simulación.

Como contexto aplicado se seleccionó la hidrogenación selectiva de acetileno debido a que este sistema posee relevancia industrial porque el acetileno debe removerse de corrientes ricas en etileno sin provocar una pérdida excesiva del propio etileno por sobrehidrogenación. Una revisión reciente identifica precisamente el compromiso entre alta actividad y alta selectividad como uno de los desafíos persistentes del proceso (Lan et al., 2025).

El propósito de este capítulo es demostrar, mediante un caso reproducible y deliberadamente simplificado, cómo un sistema de reacciones sucesivas puede convertirse en un problema de decisión. La pregunta central no es cuánto acetileno puede consumirse, sino hasta qué punto

conviene aumentar su conversión antes de que la pérdida de etileno empiece a dominar el desempeño del sistema.

Objetivo general

Desarrollar y analizar un modelo dinámico de reacciones consecutivas aplicado a la hidrogenación de acetileno, integrando balances de materia, cinética y simulación numérica para identificar una región operacional favorable respecto de la formación de etileno.

Objetivos específicos

- Formular las ecuaciones de balance y las expresiones cinéticas del sistema consecutivo.
- Resolver numéricamente el modelo mediante Runge-Kutta de cuarto orden.
- Analizar perfiles de concentración, velocidades, conversión, selectividad y rendimiento.
- Identificar el instante de máxima formación de etileno y relacionarlo con las velocidades de formación y consumo.
- Explorar la sensibilidad del producto deseado frente a cambios en la constante cinética de la reacción secundaria.

Estado del arte

Reacciones múltiples y desempeño de reactores

En una reacción única, la conversión suele ofrecer una primera medida clara del avance de transformación. En reacciones múltiples, esa lectura debe ampliarse ya que un reactivo puede desaparecer por rutas distintas y el producto de interés puede, a su vez, participar en una transformación posterior. Por ello, la selectividad y el rendimiento se vuelven variables esenciales para interpretar la distribución de productos (Fogler, 2016) y, dentro de este contexto, las reacciones consecutivas constituyen un caso particularmente ilustrativo.

En la secuencia $A \rightarrow C \rightarrow U$, la especie C es simultáneamente producto de la primera reacción y reactivo de la segunda. Su concentración puede crecer durante una primera etapa, alcanzar un máximo y disminuir posteriormente. El tiempo adquiere así un papel operativo:

prolongar la reacción puede aumentar la conversión de A y, al mismo tiempo, disminuir la cantidad recuperable de C (Levenspiel, 1999).

Hidrogenación selectiva de acetileno

La hidrogenación selectiva de acetileno se emplea en la purificación de etileno y constituye además un sistema modelo para estudiar relaciones entre estructura catalítica, adsorción y selectividad. Lan et al. (2025) señalan que las rutas no deseadas incluyen la sobrehidrogenación a etano y el acoplamiento carbono-carbono conduce a oligómeros y procesos que favorecen depósitos carbonosos. La literatura reciente no trata la selectividad como una variable secundaria ya que el diseño de sitios activos monometálicos, aleaciones, compuestos intermetálicos y sitios de átomo único busca precisamente controlar la competencia entre actividad y selectividad. Este fenómeno confirma que el desempeño del reactor no puede separarse de la distribución de productos (Lan et al., 2025).

Modelos mecanísticos, datos y digitalización

Los modelos mecanísticos conservan un papel central porque incorporan conocimiento físico y químico explícito. A partir de balances de masa y energía y leyes cinéticas permiten estimar variables que no siempre pueden medirse directamente y realizar experimentos virtuales con parámetros controlados; además, en paralelo, la ingeniería de reacciones está incorporando estrategias basadas en datos. Gao (2024) describe aplicaciones de aprendizaje automático en diseño catalítico, mecanismos, cinética y predicción de condiciones de reacción; McMullen y Jurica (2024) muestran que los flujos de trabajo asistidos por máquinas pueden acelerar la búsqueda de condiciones de proceso y, al mismo tiempo, generar conocimiento útil para caracterización y control.

Los gemelos digitales representan una extensión de esta lógica donde Mane et al. (2024) destacan su aplicación potencial en optimización, seguimiento, calidad, seguridad y evaluación de escenarios en la industria química; sin embargo, estos sistemas requieren modelos de suficiente fidelidad e integración consistente de datos. En este contexto, los balances de materia y la cinética no son elementos obsoletos: constituyen una base para modelos híbridos y representaciones digitales confiables.

Metodología

Tipo y alcance del estudio

Se desarrolló un estudio cuantitativo, aplicado y de simulación determinista usando un Script ejecutado en Jupyter Colab en Código Python cuyo propósito no fue reproducir todos los fenómenos de un reactor industrial catalítico, sino construir un caso mecanístico transparente que permitió aislar el efecto de dos reacciones consecutivas sobre la formación del producto deseado. El modelo supone reactor batch, volumen constante, mezcla ideal, temperatura constante y leyes cinéticas bimoleculares.

Sistema de reacciones

El mecanismo de reacción se representó utilizando la siguiente ruta de transformación consecutivas

$$A + B \longrightarrow C$$

$$C + B \longrightarrow U$$

En el caso aplicado, A representa acetileno, B hidrógeno, C etileno y U etano. La primera reacción se considera deseada y la segunda corresponde a la sobrehidrogenación del etileno (no deseada).

Modelo cinético

$$r_1 = k_1 C_A C_B$$

$$r_2 = k_2 C_C C_B$$

Las expresiones (1) y (2) se adoptaron como modelo cinético simplificado para ejecutar la simulación numérica y gráfica (deterministica) pero no pretenden sustituir modelos catalíticos detallados ni describir fenómenos de adsorción superficial que deberían ser incorporados para mejorar el modelo y ajustarlo a la realidad.

Balances de materia

$dC_A/dt = -r_1$

$dC_B/dt = -(r_1 + r_2)$

$dC_C/dt = r_1 - r_2$

$dC_U/dt = r_2$

La tercera ecuación diferencial concentra el comportamiento de interés descrito debido a que el etileno se incrementa mientras su velocidad de formación supera a su velocidad de consumo. En el máximo de C, la razón de cambio (derivada) se anula y se obtiene la condición $r_1 \approx r_2$.

Parametrización del escenario base (base-case)

El escenario base se definió como condición de referencia para evaluar el comportamiento dinámico del sistema de hidrogenación consecutiva y realizar posteriormente las comparaciones derivadas del análisis de sensibilidad. Los parámetros empleados se presentan en la Tabla 1 e incluyen las condiciones iniciales del reactor y las constantes cinéticas consideradas para las dos etapas de reacción. Se estableció un reactor discontinuo con un volumen constante de 10 L, inicialmente cargado con 2,0 mol de acetileno y 5,0 mol de hidrógeno. La mayor disponibilidad inicial de hidrógeno permitió representar un medio reactivo en el que este componente se encuentra en exceso respecto del acetileno.

Tabla 1.
Parámetros del escenario base (Base-cased) utilizado en la simulación

Variable	Parámetro	Unidad
Volumen del reactor	10	L
Acetileno inicial	2.0	Mol
Hidrógeno inicial	5.0	Mol
Etileno inicial	0	Mol
Etano inicial	0	Mol
k_1	0.80	L mol^{-1} min^{-1}
k_2	0.25	L mol^{-1} min^{-1}

Fuente: Elaboración propia.

La simulación consideró inicialmente ausencia de productos, por lo que las cantidades iniciales de etileno y etano fueron iguales a cero (condición inicial). Esta condición permitió seguir su formación exclusivamente como consecuencia del avance de las reacciones consideradas en el modelo.

Para representar la dinámica del sistema se utilizó las constantes cinéticas k_1=0,80 L mol^{-1} min^{-1} para la reacción de formación de etileno y k_2=0,25 L mol^{-1} min^{-1} para la reacción consecutiva de sobrehidrogenación a etano (Lan et al., 2025). La diferencia entre ambas constantes establece un escenario en el que la reacción deseada presenta inicialmente una mayor contribución cinética, aunque el etileno formado puede ser consumido progresivamente mediante la segunda reacción. A partir de las cantidades iniciales y del volumen del reactor se obtuvon concentraciones iniciales de 0,20 mol L^{-1} de acetileno y 0,50 mol L^{-1} de hidrógeno, mientras que las concentraciones iniciales de etileno y etano fueron nulas. Estas condiciones constituyeron el vector inicial utilizado para la integración numérica de los balances diferenciales de materia.

Los valores establecidos corresponden al escenario base de simulación y fueron utilizados como referencia para analizar la evolución temporal de las especies, las velocidades de reacción y los indicadores de desempeño del sistema. Asimismo, permitieron identificar la región de máxima formación de etileno y disponer de una condición de comparación para evaluar posteriormente el efecto de modificaciones en los parámetros del modelo.

3.6 Indicadores de desempeño

La evaluación de un sistema con reacciones múltiples requiere considerar indicadores que permitan analizar no solo el grado de transformación del reactivo, sino también la distribución de los productos obtenidos. En este sentido, la conversión, la selectividad y el rendimiento constituyen parámetros fundamentales para interpretar el desempeño de un reactor y establecer en qué medida el consumo de una materia prima conduce efectivamente hacia el producto de interés (Fogler, 2016; Froment et al., 2011).

La conversión del acetileno **(X_A)** se definió como la fracción de la cantidad inicial de acetileno que reaccionó durante el proceso:

$$X_A = (N_{A0} - N_A) / N_{A0}$$

donde N_{A0} representa la cantidad inicial de acetileno y N_A la cantidad presente en el reactor en un tiempo determinado. Este indicador permitió seguir el avance global de la transformación del reactivo; sin embargo, en sistemas donde ocurren reacciones consecutivas, una conversión elevada no implica necesariamente una mayor formación del producto deseado, debido a que este puede participar posteriormente en otras rutas de reacción (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999).

Para evaluar la distribución de productos se utilizó la selectividad acumulada de etileno respecto del etano ($S_{C/U}$) definida para este estudio mediante la ecuación:

$$S_{C/U} = N_C / N_U$$

donde N_C corresponde a la cantidad de etileno presente y N_U a la cantidad acumulada de etano. Esta relación permitió establecer la predominancia del producto deseado frente al producto generado por sobrehidrogenación. Valores elevados de $S_{C/U}$ representan una mayor presencia relativa de etileno, mientras que su disminución evidencia una participación creciente de la reacción consecutiva que conduce a etano. En sistemas de reacciones múltiples, el análisis de selectividad resulta especialmente importante porque permite distinguir entre el consumo global del reactivo y la formación efectiva del producto de interés (Froment et al., 2011).

De manera complementaria, se calculó el rendimiento de etileno respecto del acetileno consumido $Y_{C/A}$:

$$Y_{C/A} = N_C / (N_{A0} - N_A)$$

Este indicador expresa la cantidad de etileno que permanece en el sistema en relación con la cantidad de acetileno que ha reaccionado. Su incorporación permite valorar el aprovechamiento del reactivo desde la perspectiva del producto deseado y facilita identificar situaciones en las que el acetileno continúa consumiéndose mientras una fracción del etileno previamente formado se transforma en etano.

Los tres indicadores fueron calculados a lo largo de todo el intervalo temporal de simulación utilizando las mismas definiciones y bases de cálculo; de esta manera, la conversión permitió cuantificar el avance de la transformación del acetileno; la selectividad permitió evaluar la distribución relativa entre etileno y etano; y el rendimiento permitió relacionar la cantidad de producto deseado presente con el acetileno consumido. El análisis conjunto de estas variables proporcionó una evaluación mucho más completa del desempeño del sistema que la obtenida mediante la conversión en forma aislada.

Para evitar valores indeterminados al inicio de la simulación, la selectividad $S_{C/U}$ se evaluó únicamente cuando $N_U>0$, mientras que el rendimiento $Y_{C/A}$ se calculó una vez iniciado el consumo de acetileno, es decir, cuando $N_{A0}-N_A>0$. Este criterio permitió conservar la consistencia matemática de los indicadores durante el tratamiento computacional. Finalmente, estas definiciones se mantuvieron constantes a lo largo del análisis para evitar comparaciones ambiguas.

Simulación numérica y gráfica

Una vez establecidos los balances de materia y las expresiones cinéticas correspondientes al mecanismo de reacción conformado por las dos reacciones, se obtuvo un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias que describió la variación temporal de las concentraciones de acetileno, hidrógeno, etileno y etano. Debido al carácter acoplado y no lineal del modelo, su resolución se realizó mediante integración numérica en la simulación, lo que permitió reconstruir de manera simultánea la evolución de todas las especies presentes en el reactor.

Para este propósito se empleó el método de Runge-Kutta de cuarto orden (RK4), ampliamente utilizado en la solución numérica de problemas de valor inicial debido a su adecuada relación entre precisión, estabilidad y costo computacional (Chapra & Canale, 2015). Este método resulta particularmente apropiado para seguir la evolución temporal de sistemas descritos mediante ecuaciones diferenciales, como los balances dinámicos empleados en el modelamiento de reactores químicos (Fogler, 2016). La integración se realizó utilizando un paso temporal constante de $\Delta t=0{,}01$ min. Para cada intervalo, el algoritmo RK4 evaluó cuatro estimaciones sucesivas de la pendiente del sistema: (i) una al

inicio del intervalo, (ii) dos en posiciones intermedias; y (iii) una al final. Estas contribuciones se combinaron de forma ponderada para calcular el nuevo vector de concentraciones según:

$$y_{n+1} = y_n + 6\Delta t(K1+2K2+2K3+K4)$$

donde y_n representa el vector de concentraciones de las especies en el instante t_n ; de otro lado, y_{n+1} corresponde al estado calculado para el siguiente intervalo y Δt representa el paso de integración. Los términos K1, K2, K3 y K4 corresponden a las evaluaciones sucesivas de la pendiente utilizadas por el método para aproximar la trayectoria del sistema (Chapra & Canale, 2015). En cada paso de integración se actualizaron simultáneamente las concentraciones de las cuatro especies consideradas en el modelo:

$$y=[C_A, C_B, C_C, C_U]^T$$

De esta manera, las nuevas concentraciones obtenidas fueron utilizadas para recalcular las velocidades r_1 y r_2 y continuar la integración hasta completar el intervalo temporal establecido. El procedimiento permitió conservar la relación directa entre las expresiones cinéticas, los balances diferenciales y los perfiles temporales obtenidos posteriormente. Dentro de este contexto, es importante señalar que las cantidades K1, K2, K3 y K4 empleadas por el algoritmo RK4 no corresponden a las constantes cinéticas k_1 y k_2 definidas para las reacciones químicas. Las primeras representan pendientes numéricas calculadas durante cada intervalo de integración, mientras que las constantes cinéticas forman parte del modelo cinético utilizado para determinar las velocidades de reacción.

La simulación numérica permitió obtener una solución discreta y reproducible del modelo a lo largo del tiempo y a partir de estos resultados se determinó los indicadores de desempeño previamente definidos identificando posteriormente el instante en el que la cantidad de etileno alcanzó su valor máximo. De este modo, la integración numérica funcionó como vínculo entre la formulación matemática del sistema y el análisis ingenieril de su comportamiento.

Análisis de sensibilidad

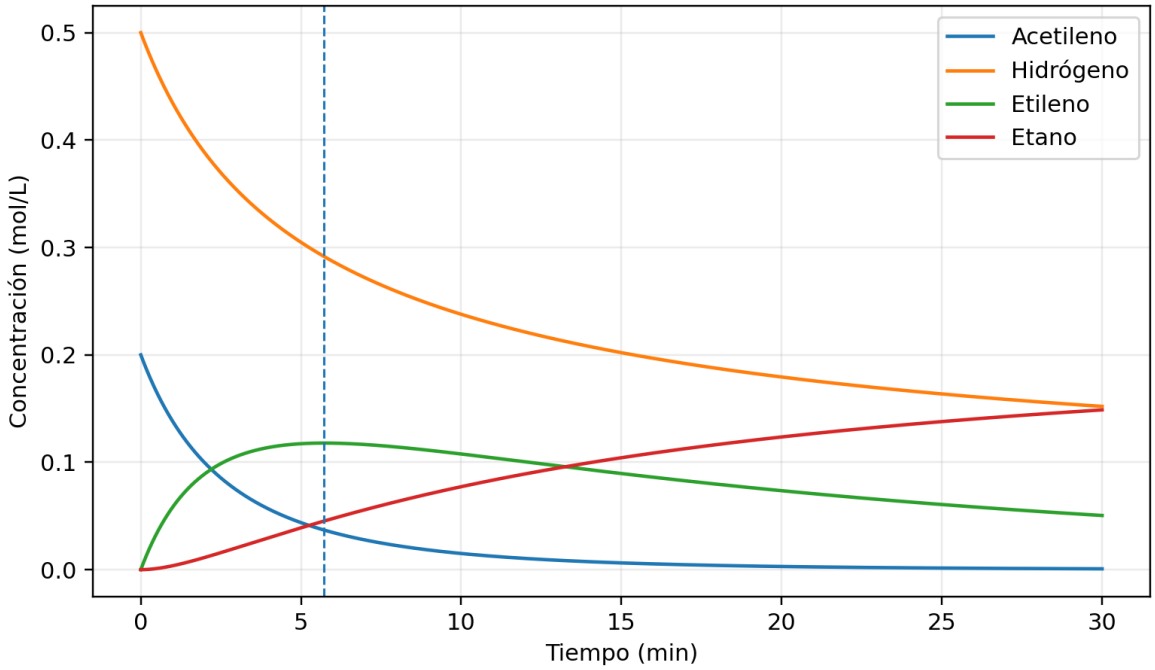
Finalmente, se exploró el efecto de la reacción secundaria modificando k_2 en tres escenarios: 0,10; 0,25 y 0,50 L mol^{-1} min^{-1}, manteniendo constantes las demás condiciones; el objetivo de esta estrategia fue observar cómo una mayor propensión a la sobrehidrogenación modifica la altura y la ubicación temporal del máximo de etileno.

Resultados

Evolución temporal de las especies

La evolución temporal de las especies permitió reconocer con claridad el comportamiento característico del sistema de reacciones consecutivas considerado tal y como se presenta en la Figura 1 donde se puede observar que las concentraciones de acetileno e hidrógeno disminuyeron progresivamente durante la simulación, aunque con comportamientos diferentes debido a su participación en el mecanismo planteado; el acetileno intervino únicamente en la primera reacción, mientras que el hidrógeno fue consumido tanto durante la formación de etileno como en su posterior transformación a etano. El comportamiento del etileno presentó una dinámica diferente y constituyó el aspecto más relevante observado en esta figura. Durante los primeros minutos de operación, su concentración aumentó como consecuencia del predominio de la reacción de hidrogenación del acetileno; sin embargo, conforme el etileno se acumuló en el reactor, también aumentó su disponibilidad para participar en la segunda reacción. Como resultado de esta competencia entre formación y consumo, el perfil de etileno alcanzó un máximo y posteriormente comenzó a disminuir; de manera simultánea, el etano mostró una acumulación progresiva, consistente con su condición de producto final de la reacción consecutiva.

Figura 1.
Perfiles temporales de concentración de acetileno, hidrógeno, etileno y etano para el escenario base en base a los resultados proporcionados por la simulación.



La línea vertical discontinua identifica el tiempo correspondiente a la máxima formación de etileno (t≈5,72 min).

La línea vertical suministrada en la Figura 1 permite identificar una región particularmente importante para el análisis del reactor. El máximo calculado correspondió aproximadamente a 1,1787 mol de etileno alcanzado alrededor de los 5,70 min de operación; en este instante todavía permanecía acetileno disponible en el sistema, por lo que la máxima formación del producto deseado ocurrió antes de alcanzar la conversión máxima posible del reactivo. Este comportamiento evidencia una característica fundamental de las reacciones consecutivas: prolongar el tiempo de reacción no garantiza un incremento continuo del producto de interés. Antes de los 5,72 min, el balance neto favoreció la acumulación de etileno; alrededor de este punto, su formación y consumo alcanzaron una condición de equilibrio dinámico; y posteriormente, la sobrehidrogenación adquirió una influencia suficiente para provocar la disminución de la cantidad de etileno presente. Desde el panorama estrictamente matemático,

este comportamiento puede interpretarse a partir del balance del producto intermedio descrito por $dC_C/dt=r_1-r_2$

Así, el máximo observado en la Figura 1 se presenta cuando la pendiente del perfil de etileno se aproxima a cero ($dC_C/dt\approx0$) por lo que, en esa región se verifica que $r_1\approx r_2$

Esto significa que la velocidad con la que se forma etileno a partir del acetileno es aproximadamente igual a la velocidad con la que el propio etileno se consume para formar etano. Antes de este punto se cumple $r_1>r_2$, favoreciendo su acumulación; después, la contribución relativa de la segunda reacción aumenta y la cantidad de etileno comienza a disminuir. Este comportamiento es consistente con la dinámica esperada de un producto intermedio en sistemas de reacciones consecutivas (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999).

Los perfiles mostrados en la Figura 1 adquieren así importancia ya que permitió identificar visualmente una ventana temporal de interés operacional, en la cual se alcanza la mayor disponibilidad del producto deseado. Este resultado demuestra que evaluar el proceso únicamente a partir del consumo de acetileno podría conducir a una interpretación incompleta, puesto que después del máximo todavía puede aumentar la conversión del reactivo mientras disminuye la cantidad de etileno recuperable. Esta relación constituye, entonces, la base para analizar posteriormente las velocidades de reacción y los indicadores de conversión, selectividad y rendimiento.

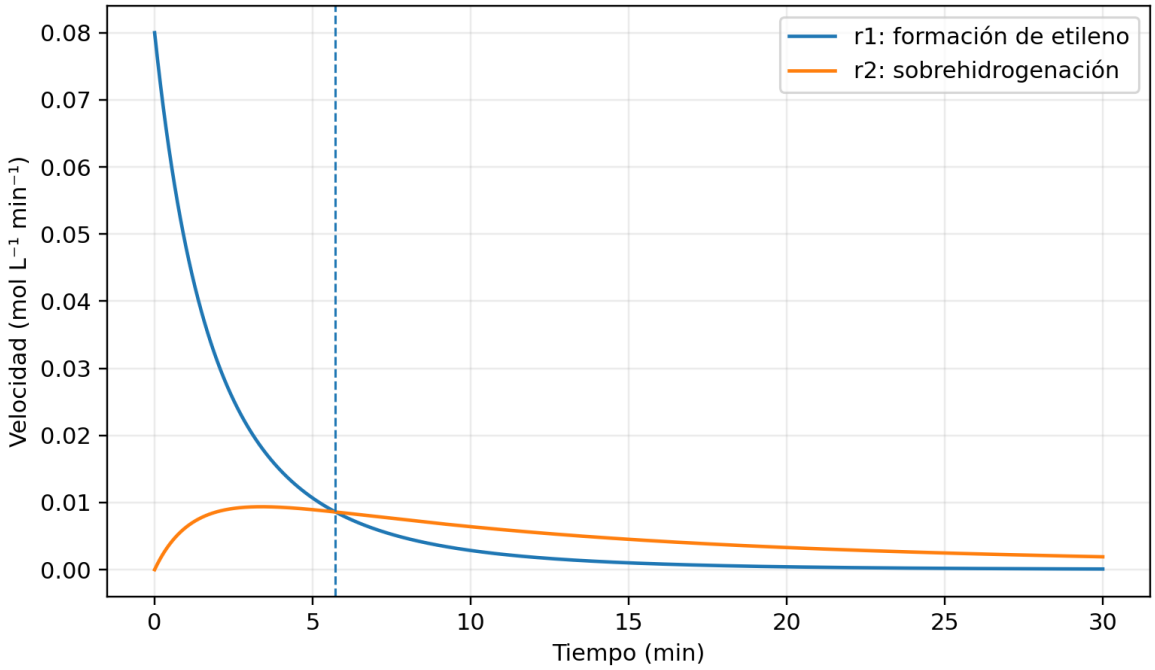
Competencia entre las velocidades de reacción

El análisis de las velocidades de reacción permitió explicar con mayor detalle el comportamiento temporal del etileno observado en la simulación. Como se muestra en la Figura 2, las velocidades r_1 y r_2 evolucionaron de manera diferente debido a los cambios en las concentraciones de los reactivos y productos durante el desarrollo de las reacciones consecutivas. Al inicio del proceso, la velocidad de la primera reacción presentó un claro predominio sobre la segunda. Esta diferencia se explica por las condiciones iniciales del escenario base donde el reactor contiene acetileno e hidrógeno, mientras que la concentración inicial de etileno es nula; en consecuencia, la reacción de formación de etileno puede desarrollarse desde el comienzo de la simulación, mientras que la segunda reacción se

encuentra inicialmente limitada por la ausencia del propio etileno, que actúa como reactivo en la etapa de sobrehidrogenación. De acuerdo, entonces, con el modelo cinético empleado la velocidad r_1 depende de las concentraciones de acetileno e hidrógeno, mientras que r_2 depende de la disponibilidad de etileno e hidrógeno; por esta razón, al inicio se cumple $r_1 > r_2$, generándose una velocidad neta positiva de formación de etileno. Este comportamiento es consistente con la dinámica característica de un producto intermedio en un sistema de reacciones consecutivas (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999).

A medida que transcurrió el tiempo, el acetileno se consume y su concentración disminuye, provocando una reducción progresiva de r_1. Paralelamente, el etileno formado comienza a acumularse en el reactor y queda disponible para participar en la segunda reacción; como consecuencia, r_2 adquiere una importancia relativa cada vez mayor. La Figura 2 permite visualizar, por tanto, la transición desde una etapa inicialmente dominada por la formación de etileno hacia otra en la que su consumo por sobrehidrogenación se vuelve progresivamente más significativo.

Figura 2.
Evolución temporal de las velocidades de formación de etileno (r_1) y de sobrehidrogenación a etano (r_2) para el escenario base determinada en la simulación.



La línea vertical discontinua identifica el tiempo correspondiente a la máxima cantidad de etileno (t≈5,72 min.)

La región más relevante de la Figura 2 se encuentra precisamente en las proximidades del máximo de etileno identificado anteriormente; por consiguiente, mientras $r_1 > r_2$, la velocidad neta de formación de etileno es positiva y este se acumula en el reactor. En cambio, cuando ambas velocidades se aproximan, la formación y el consumo de etileno tienden a compensarse. En el máximo de su perfil temporal se cumple la condición $dC_C/dt=0$; y, por tanto, $r_1=r_2$. Esta igualdad proporciona una interpretación cinética directa del máximo observado aproximadamente a los 5,72 min permitiendo asegurar que no corresponde al agotamiento del acetileno ni al cese de las reacciones, sino al instante en el que la velocidad de producción de etileno es igual a su velocidad de consumo. A partir de este punto, cuando $r_2 > r_1$, el balance neto se vuelve negativo y la cantidad de etileno comienza a disminuir, aun cuando la reacción global continúa avanzando. La comparación entre ambas velocidades permitió además comprender los resultados obtenidos para conversión y rendimiento debido a que el incremento continuo de la conversión después del máximo de etileno responde a que el acetileno continúa reaccionando; sin embargo, la creciente contribución de r_2 favorece simultáneamente la transformación del producto deseado en etano. De esta forma, la competencia cinética entre las dos etapas explica por qué una mayor conversión no conduce necesariamente a un mejor desempeño respecto de la producción de etileno. En términos de operación del reactor, este resultado demostró que la relación entre r_1 y r_2 constituye un criterio relevante para identificar una ventana temporal favorable para la recuperación del producto intermedio. El objetivo, entonces, no consiste únicamente en favorecer una velocidad elevada de consumo del acetileno, sino en mantener durante el mayor tiempo posible una condición en la que la formación de etileno predomine sobre su sobrehidrogenación. Este principio es característico del diseño y análisis de sistemas de reacciones consecutivas cuando el producto de interés corresponde a una especie intermedia (Fogler, 2016; Froment et al., 2011).

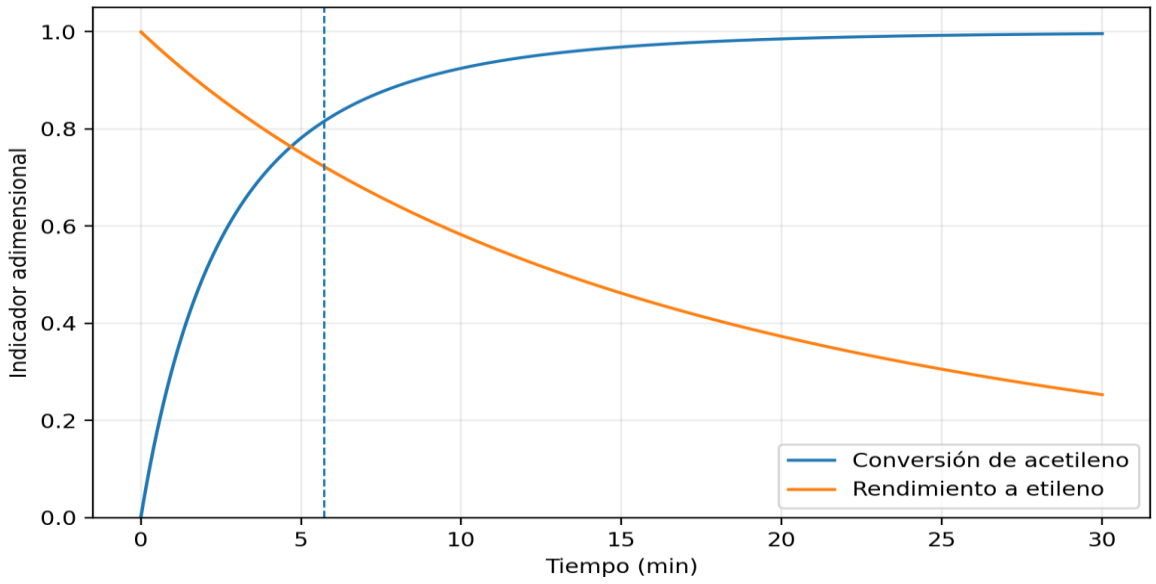
Conversión y rendimiento

La evolución de la conversión del acetileno y del rendimiento hacia etileno permitió complementar el comportamiento observado previamente en los perfiles de concentración.

Como se muestra en la Figura 3 donde ambas variables presentaron tendencias diferentes a medida que avanzó el tiempo de reacción como consecuencia directa de la competencia entre la formación de etileno y su posterior consumo mediante la reacción de sobrehidrogenación. La conversión del acetileno (X_A) aumentó de manera continua durante el intervalo analizado donde este comportamiento respondió al consumo progresivo del acetileno mediante la primera reacción y evidenció que la transformación del reactivo continuó incluso después de alcanzarse la máxima cantidad de etileno. En la región correspondiente a aproximadamente 5,72 min, identificada mediante la línea vertical discontinua, la conversión alcanzó un valor cercano a 0,8160 equivalente a aproximadamente 81,6 % del acetileno inicialmente disponible.

El rendimiento de etileno respecto del acetileno consumido ($Y_{C/A}$); en cambio, presentó una tendencia diferente que se verificó durante las primeras etapas de la reacción donde una fracción importante del acetileno transformado permaneció en el sistema como etileno. Conforme avanzó el proceso, la acumulación de este producto favoreció su participación en la segunda reacción, por lo que una proporción creciente del etileno formado comenzó a transformarse en etano. Como consecuencia, el rendimiento disminuyó progresivamente y alcanzó un valor aproximado de 0,723 en el instante correspondiente al máximo de etileno.

Figura 3.
Evolución temporal de la conversión del acetileno (X_A) y del rendimiento de etileno respecto del acetileno consumido ($Y_{C/A}$) para el escenario base descrito por la simulación.



La línea vertical discontinua señala el tiempo correspondiente a la máxima cantidad de etileno (t≈5,72 min).

La lectura conjunta de ambas curvas resulta especialmente importante ya que mientras la conversión mantuvo una trayectoria creciente, el rendimiento hacia el producto deseado presentó una evolución desfavorable a medida que adquiere mayor importancia la reacción consecutiva. Por tanto, ambos indicadores dejan de evolucionar en la misma dirección: el reactor continúa consumiendo acetileno, pero una fracción cada vez menor del material transformado permanece como etileno. Este comportamiento puede comprenderse considerando las definiciones utilizadas para ambos indicadores descrita anteriormente y donde la primera expresión únicamente cuantifica la fracción de acetileno que ha reaccionado, independientemente del destino posterior de los productos generados; en cambio, el rendimiento incorpora la cantidad de etileno que permanece en el sistema respecto del acetileno consumido. Esta diferencia explica por qué es posible obtener simultáneamente una conversión creciente y un rendimiento decreciente en un sistema de reacciones consecutivas (Fogler, 2016; Froment et al., 2011).

La región próxima a los 5,72 min adquiere, por tanto, especial interés desde el punto de vista operacional ya que en ese momento se alcanzó la máxima cantidad calculada de etileno, aproximadamente en 1,1787 mol, con una conversión cercana al 81,6 % y un rendimiento aproximado del 72,3 %. Continuar la operación después de este punto permitiría transformar una cantidad adicional de acetileno, pero también favorecer la pérdida progresiva de etileno mediante su conversión a etano.

La Figura 3 pone así de manifiesto uno de los resultados centrales de este estudio: maximizar la conversión no equivale necesariamente a maximizar el aprovechamiento del reactivo hacia el producto deseado. En sistemas de reacciones consecutivas, la evaluación del desempeño requiere considerar conjuntamente conversión, rendimiento y selectividad, debido a que cada indicador describe una dimensión diferente del comportamiento del reactor (Fogler, 2016).

Este resultado proporcionó además el vínculo con el siguiente nivel del análisis ya que mientras la Figura 3 evidencia la separación entre conversión y rendimiento, el análisis de la selectividad etileno/etano permitió determinar con mayor precisión cómo la reacción

secundaria modifica la distribución de productos y, en consecuencia, la conveniencia de prolongar el tiempo de reacción.

4.4 Indicadores en el máximo de etileno

La identificación del máximo de etileno permitió establecer un punto de referencia para integrar los principales indicadores de desempeño del sistema. A diferencia del análisis individual de los perfiles anteriores, los resultados presentados en la Tabla 2 permiten observar simultáneamente cuánto acetileno se ha transformado, qué cantidad de etileno se encuentra disponible y cuál es la relación entre el producto deseado y el producto generado por sobrehidrogenación.

Tabla 2.
Indicadores del sistema en la región de máxima formación de etileno.

Indicador	**Resultado**
Tiempo de referencia	5.72 min
Etileno máximo	1.1787 mol
Conversión de acetileno	0.8148
Selectividad C/U	2.6138
Rendimiento C/A	0.7233

Fuente: Elaboración propia.

El máximo de etileno se alcanzó aproximadamente a los 5,72 min, con una cantidad de 1,1787 mol de acuerdo con los resultados de simulación. Este instante resulta particularmente relevante porque representa el momento en que la acumulación del producto deseado deja de aumentar y como se explicó a partir de las velocidades de reacción, en esta región la velocidad de formación de etileno se aproxima a su velocidad de consumo por sobrehidrogenación; por ello, prolongar el tiempo de reacción comienza a favorecer progresivamente la formación de etano. En este punto, la conversión de acetileno fue de 0,8148**,** lo que indica que aproximadamente el 81,48 % del acetileno inicialmente alimentado había reaccionado. El resultado es importante porque demuestra que la máxima cantidad de etileno se alcanza antes de consumir completamente el reactivo. En otras palabras, llevar el sistema hacia conversiones superiores no constituye necesariamente una condición favorable cuando el producto de interés es un intermediario susceptible de continuar reaccionando.

El rendimiento alcanzó 0,7233**,** indicando que aproximadamente el 72,33 % del acetileno consumido se encontraba representado por etileno presente en el reactor, de acuerdo con la definición adoptada en este estudio. La diferencia respecto de una utilización ideal del acetileno evidencia el efecto de la reacción consecutiva: parte del etileno que se había formado previamente ya fue transformado en etano. Este resultado complementa la información proporcionada por la conversión, puesto que permite diferenciar entre *cuánto reactivo se consumió y qué proporción de ese consumo permanece asociada al producto deseado.*

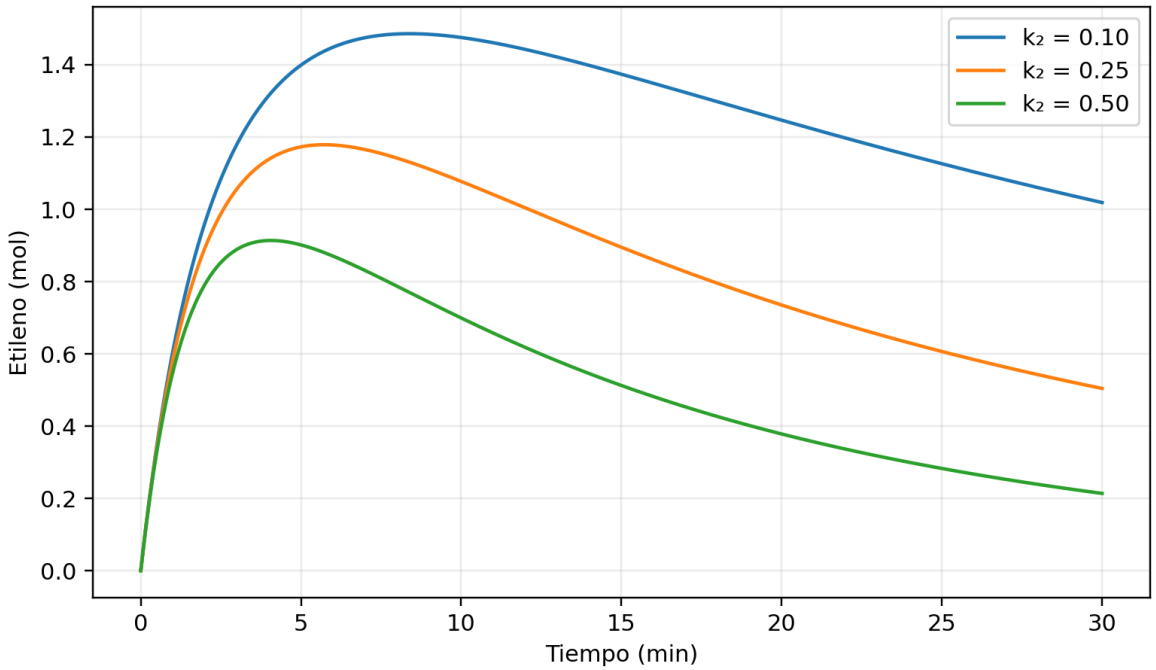
La selectividad acumulada fue de 2,6138, lo que significa que, en el punto de máxima formación de etileno, existían aproximadamente 2,61 mol de etileno por cada mol de etano acumulado, según la definición de selectividad establecida en la metodología. Este valor confirmó que el producto deseado todavía predominaba sobre el producto de sobrehidrogenación; sin embargo, la presencia de etano demuestra que la reacción secundaria ya tenía una participación apreciable en el comportamiento global del sistema. La lectura conjunta de los tres indicadores aporta una interpretación más completa que cualquiera de ellos por separado. A los 5,72 min, el sistema combina una conversión relativamente elevada (81,48 %), una predominancia del etileno frente al etano ($S_{C/U}$=2,6138) y un rendimiento hacia el producto deseado de 72,33 %. Por tanto, este punto no representa simplemente el máximo matemático de una curva, sino una condición de referencia del desempeño del reactor en la que convergen aspectos cinéticos, de transformación del reactivo y de distribución de productos.

Sensibilidad a la reacción secundaria

Una vez caracterizado el comportamiento del escenario base, se evaluó la sensibilidad del sistema frente a modificaciones en la intensidad de la reacción secundaria. Este análisis resulta especialmente relevante debido a que la segunda etapa es responsable del consumo del etileno previamente formado y, por tanto, condiciona directamente la cantidad máxima de producto deseado que puede mantenerse en el reactor. En sistemas de reacciones consecutivas, variaciones en la velocidad relativa de las etapas pueden modificar de manera importante la distribución de productos, aun cuando las condiciones iniciales de operación permanezcan constantes (Fogler, 2016; Froment et al., 2011).

Para estudiar este efecto se modificó la constante cinética k_2, asociada con la sobrehidrogenación del etileno a etano, manteniendo sin variación los demás parámetros establecidos para el escenario base; de esta manera, k_2 se utilizó como parámetro de sensibilidad para determinar cómo una mayor o menor contribución de la reacción secundaria modifica la evolución temporal y la máxima disponibilidad de etileno.

Figura 4.
Análisis de sensibilidad de la formación de etileno frente a variaciones de la constante cinética k2k_2 asociada con la reacción secundaria de sobrehidrogenación.



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados de la simulación.

Como se observa en la Figura 4, la modificación de k_2 produjo cambios apreciables en los perfiles temporales de etileno debido a que los escenarios caracterizados por valores menores de k_2 presentaron una mayor acumulación del producto deseado, principalmente porque su velocidad de consumo mediada por la segunda reacción fue menor. En estas condiciones, el etileno permaneció disponible durante un intervalo temporal más prolongado y alcanzó un máximo superior al correspondiente a escenarios con una reacción secundaria más intensa. En sentido contrario, el incremento de k_2 favoreció la transformación de etileno a etano y a medida que aumentó la importancia cinética de la segunda reacción, el máximo de etileno disminuyó y tendió a alcanzarse en tiempos más tempranos. Este desplazamiento resulta

coherente con el balance diferencial del producto intermedio ($dC_C/dt=r_1-r_2$) considerando que $r_2=k_2C_CC_B$. Para concentraciones equivalentes de etileno e hidrógeno, un incremento de k_2 produce directamente una mayor velocidad de sobrehidrogenación; en consecuencia, la condición $r_1=r_2$, asociada con el máximo de etileno, puede alcanzarse con mayor rapidez ya que a partir de ese instante, cuando el consumo del producto deseado supera su formación, su concentración comienza a disminuir. El análisis permite establecer además una diferencia importante entre formación y conservación del producto deseado. La primera reacción continúa siendo responsable de generar etileno; sin embargo, la cantidad que finalmente permanece disponible en el reactor depende también de la rapidez con la que este producto es retirado por la reacción secundaria; por esta razón, el desempeño del sistema no está determinado exclusivamente por favorecer la reacción principal, sino también por controlar la ruta consecutiva responsable de la pérdida de selectividad. Desde una perspectiva de ingeniería de reacciones, este resultado tiene una implicancia particularmente muy importante desde que la mejora del proceso no debería orientarse únicamente a incrementar la velocidad de conversión del acetileno y también resulta necesario aumentar la diferencia favorable entre las velocidades de formación y consumo del producto intermedio. En términos cinéticos, una reducción de la contribución relativa de r_2 amplía la región temporal en la que $r_1>r_2$, favoreciendo la acumulación de etileno y retrasando su transformación hacia etano. Este principio constituye uno de los fundamentos para el análisis y diseño de sistemas con reacciones múltiples en los que el producto de interés corresponde a una especie intermedia (Fogler, 2016; Levenspiel, 1999).

La sensibilidad observada frente a k_2 aporta, por tanto, información que no puede obtenerse únicamente a partir del escenario base. Mientras este último permite identificar una condición de máxima formación de etileno, el análisis de sensibilidad permite reconocer qué parámetro cinético controla en mayor medida la pérdida del producto deseado y cómo su modificación afecta la ventana operacional del sistema. Esto convierte al análisis en una herramienta útil para orientar posteriores estudios de optimización, selección de catalizadores y definición de condiciones de operación. En el contexto específico de la hidrogenación selectiva de acetileno, esta interpretación adquiere especial relevancia debido a que el desafío del proceso no consiste simplemente en transformar acetileno, sino en hacerlo evitando, en la medida de lo posible, la hidrogenación posterior del etileno hacia etano. Por esta razón, la selectividad

del sistema depende de la capacidad de favorecer cinéticamente la reacción deseada frente a la ruta de sobrehidrogenación. No obstante, los resultados de sensibilidad deben interpretarse dentro del alcance del modelo planteado ya que la variación de k_2 representa una modificación paramétrica de la cinética y permite estudiar matemáticamente la respuesta del sistema, pero no implica por sí misma que k_2 pueda modificarse de manera independiente en un reactor real. Experimentalmente, las constantes cinéticas pueden estar condicionadas por la temperatura, naturaleza y estado del catalizador, composición de la alimentación y otros fenómenos asociados con el sistema reaccionante; por esta razón, el análisis realizado debe entenderse como una herramienta introductoria para identificar tendencias y variables de interés y no como una predicción directa de una condición industrial específica. Integralmente, la Figura 4 demuestra que la reacción secundaria constituye una variable crítica para la disponibilidad del etileno por lo que, una mayor contribución de esta ruta reduce y adelanta el máximo del producto deseado, mientras que su disminución favorece la acumulación y permanencia del etileno en el sistema. Este hallazgo proporciona una base cuantitativa para plantear estrategias posteriores orientadas no solo a maximizar la conversión, sino principalmente a preservar la selectividad y el rendimiento hacia el producto de interés.

Discusión

Los resultados obtenidos en la simulación permiten observar una situación que suele perderse cuando el análisis se limita a la conversión. El acetileno puede seguir desapareciendo después del máximo de etileno; sin embargo, esa transformación adicional no implica que el proceso esté mejorando. Parte del producto de interés ya se está utilizando como reactivo de la segunda etapa y esta lectura coincide con el desafío industrial descrito por Lan et al. (2025) quienes indican que, en hidrogenación selectiva, una alta conversión debe alcanzarse sin sacrificar excesivamente la selectividad a etileno. El modelo presentado no reproduce la complejidad de un catalizador real, pero sí captura el conflicto conceptual entre formación y sobrehidrogenación que justifica el control de la selectividad. El máximo reportado de etileno no debe interpretarse como un óptimo industrial universal ya que es el óptimo del objetivo definido dentro de este modelo y bajo estas condiciones. En un sistema real podrían incorporarse restricciones de seguridad, temperatura, transferencia de masa, pureza, costo,

productividad, desactivación catalítica y consumo energético y dentro de ese contexto, el problema pasaría naturalmente de una optimización de una sola variable a una optimización multiobjetivo.

Una formulación más completa podría buscar simultáneamente alta conversión, alta selectividad y bajo costo energético. Lo cual modificaría la pregunta de ingeniería porque ya no se buscaría únicamente el mayor valor de una variable, sino una región de compromiso técnicamente defendible. La utilidad de la simulación radica en que permite ensayar ese razonamiento antes de modificar un sistema físico y el análisis de sensibilidad de k_2 muestra cómo una alteración cinética cambia la ventana de operación. La misma estrategia puede extenderse a temperatura, composición inicial, volumen, presión o parámetros catalíticos, siempre que las ecuaciones representen adecuadamente el fenómeno.

Este enfoque también ofrece un puente hacia herramientas digitales contemporáneas en el que McMullen y Jurica (2024) presentan los datos de reacción para que puedan utilizarse no solo para encontrar condiciones favorables, sino para construir conocimiento de proceso. Gao (2024) destaca que el aprendizaje automático puede apoyar la predicción de cinética, mecanismos y resultados, pero, definitivamente, en ambos casos, la interpretación química sigue siendo necesaria para definir variables, restricciones y criterios de calidad.

Los gemelos digitales amplían esta idea al conectar representaciones virtuales con información del sistema físico. Mane et al. (2024) señalan beneficios potenciales en optimización, control, seguridad y evaluación de escenarios, junto con desafíos relacionados con integración de datos y fidelidad de los modelos y desde esta perspectiva, un balance dinámico bien formulado puede verse como una pieza elemental de una arquitectura digital más amplia.

El valor formativo y aplicado del caso reside precisamente en esa continuidad donde los balances clásicos no compiten con la digitalización, pero constituyen una de las formas más claras de introducir conocimiento físico dentro de herramientas computacionales. De otro lado, la simulación deja entonces de ser una gráfica producida por código y se convierte en una representación cuantitativa de una hipótesis de proceso.

Implicaciones para ciencia, ingeniería y tecnología aplicada

El caso presentado permite articular tres niveles: (i) en ciencia, obliga a formular hipótesis sobre las rutas de reacción y su cinética; (ii) en ingeniería, transforma esas hipótesis en balances y criterios de desempeño; y (iii) en tecnología aplicada, utiliza cálculo numérico para explorar condiciones y anticipar consecuencias operacionales. Esta articulación es relevante en contextos donde la experimentación puede ser costosa o limitada, pero teniendo en cuenta que un modelo no sustituye los ensayos experimentales, pero ayuda a decidir qué escenarios merece la pena estudiar, qué variables deben medirse y qué resultados serían físicamente coherentes. Una evolución natural de este trabajo sería calibrar k_1 y k_2 con datos experimentales, incorporar dependencia con temperatura mediante Arrhenius, introducir balances de energía y comparar distintas configuraciones de reactor y, posteriormente, podrían construirse modelos sustitutos de rápida evaluación o modelos híbridos que combinen restricciones físicas con aprendizaje automático.

El criterio que debe mantenerse en todas estas extensiones es la trazabilidad donde cada resultado computacional debe poder relacionarse con una ecuación o modelo, un supuesto, un dato o una observación experimental. Esta condición es especialmente importante cuando se utilizan herramientas de inteligencia artificial, porque evita confundir capacidad predictiva con comprensión del proceso.

Limitaciones y advertencia

El estudio utiliza un modelo intencionalmente simplificado y supone volumen y temperatura constantes, mezcla ideal y cinética bimolecular. No se incorporan fenómenos de adsorción y desorción sobre el catalizador, limitaciones de transferencia de masa o calor, caída de presión, formación de oligómeros, desactivación catalítica ni un balance energético. Los valores cinéticos utilizados corresponden al escenario académico de simulación y no deben interpretarse como parámetros validados para diseño industrial. En consecuencia, los resultados permiten analizar tendencias y fundamentos de decisión, pero no dimensionar un reactor industrial.

Conclusiones

- El análisis reportado demuestra que, en un sistema de reacciones consecutivas, una mayor conversión del reactivo inicial no garantiza una mayor recuperación del producto deseado.
- El balance $dC_C/dt = r_1 - r_2$ proporciona una interpretación directa del máximo de etileno y el producto deja de acumularse cuando su velocidad de formación se iguala aproximadamente con su velocidad de consumo.
- Para el escenario base, la simulación identificó un máximo de aproximadamente 1,1787 mol de etileno alrededor de 5,72 min, con una conversión de acetileno cercana a 0,8148. Después de esta región la conversión puede seguir creciendo, pero la sobrehidrogenación deteriora el aprovechamiento del producto.
- El análisis de sensibilidad mostró que el aumento de la constante cinética de la reacción secundaria reduce la cantidad máxima de etileno y estrecha la ventana temporal favorable.
- La principal contribución metodológica consiste en integrar fundamentos clásicos y cálculo numérico dentro de una lógica de decisión. La simulación no sustituye la ingeniería, pero hace explícitas sus ecuaciones y permite explorar sus consecuencias.
- Como línea futura se propone ampliar el modelo con cinética catalítica validada, balances de energía, estimación de parámetros, optimización multiobjetivo y modelos híbridos físico-datos que puedan evolucionar hacia arquitecturas de gemelo digital.

Referencias bibliográficas

Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2015). Numerical methods for engineers (7th ed.). McGraw-Hill Education.

Fogler, H. S. (2016). Elements of chemical reaction engineering (5th ed.). Pearson.

Froment, G. F., Bischoff, K. B., & De Wilde, J. (2011). Chemical reactor analysis and design (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Gao, H. (2024). Machine learning in reaction engineering. In Artificial intelligence in manufacturing: Applications and case studies (pp. 139–166). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99135-3.00007-5

Lan, X., Chen, J. G., & Wang, T. (2025). Recent advances in thermocatalytic acetylene selective hydrogenation. Chemical Society Reviews, 54, 7654–7705. https://doi.org/10.1039/D4CS01237B

Levenspiel, O. (1999). Chemical reaction engineering (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Mane, S., Dhote, R. R., Sinha, A., & Thirumalaiswamy, R. (2024). Digital twin in the chemical industry: A review. Digital Twins and Applications, 1(2), 118–130. https://doi.org/10.1049/dgt2.12019

McMullen, J. P., & Jurica, J. A. (2024). Accelerating reaction optimization through data-rich experimentation and machine-assisted process development. Reaction Chemistry & Engineering, 9, 2160–2170. https://doi.org/10.1039/D4RE00141A

Rawlings, J. B., & Ekerdt, J. G. (2002). Chemical reactor analysis and design fundamentals. Nob Hill Publishing.

Anexo

Material Suplementario S1. Notebook reproducible del modelamiento y simulación de la hidrogenación selectiva de acetileno.

Como suplemento de la metodología y de los resultados presentados en este capítulo, se anexa el **Material Suplementario S1,** correspondiente al notebook computacional desarrollado para la implementación y resolución del modelo cinético de hidrogenación selectiva de acetileno. Este material contiene la parametrización del base-case, la integración numérica del sistema de ecuaciones diferenciales, el cálculo de las variables e indicadores de desempeño y la generación de los resultados gráficos utilizados para el análisis del sistema. El notebook permite seguir de manera secuencial la relación entre el planteamiento matemático, el procedimiento computacional y los resultados obtenidos, facilitando la **trazabilidad y reproducibilidad del estudio**. Asimismo, incorpora el análisis temporal de las especies y velocidades de reacción, la determinación de la región de máxima formación de etileno y la evaluación de sensibilidad frente a modificaciones de la reacción secundaria.

Con la finalidad de facilitar tanto la reproducción de los cálculos como la consulta de su contenido, el material se presenta en dos formatos complementarios. El archivo. ipynb conserva la estructura ejecutable del notebook y permite revisar, modificar y ejecutar nuevamente el procedimiento computacional en un entorno compatible con Jupyter. La versión .html proporciona una visualización estática del mismo contenido, incluyendo ecuaciones, código, resultados y figuras, sin requerir la ejecución del notebook para su reproducción y reforzamiento.

Archivo reproducible: Material_Suplementario_S1_Hidrogenacion_Acetileno.ipynb

Versión para visualización: Material_Suplementario_S1_Hidrogenacion_Acetileno.html

PDF

International Publication Technical Data

Title: Ciencia, Ingeniería y Tecnología Aplicada.
Publisher: Editorial Hambatu Sapiens
Authors: Escobar Cabrera, Kevin; Constenla Núñez, Jaime Aroldo; Jara Coatt, Pilar; Sáez Delgado, Fabiola; Mella-Norambuena, Javier; Correa Gutiérrez, Paula; Rodríguez Gómez, Richard; Aravena Eriz, Eduardo; Cortés Tenorio, Jorge; García Vásquez, Héctor; Álvarez Sepúlveda, Humberto; Ccorisapra Quintana, Jeferson; Vega Otazu, Edison; Porras Durand, Luis; Lopez Ibañez, Silvia Soledad; Villegas Casaverde, Medalit; Jaramillo Sangurima, Wilson Eduardo; Roque Rodríguez, Francisco Javier; Zegarra Panca, Paulino Rodolfo.
Format: PDF
Pages: 247 pág.
Size: A4 21x29.7cm
System Requirements: Adobe Acrobat Reader
Access Mode: World Wide Web
ISBN: 978-9907-805-35-2
DOI: https://doi.org/10.63862/ehs-978-9907-805-35-2



HS Editorial