



REVISTA CIENTÍFICA en Ciencias Empresariales



AUTORIDADES UNIVERSITARIAS

Dr. Pedro González Beerman

Rector a.i.

MSc. Pedro Caballero

Vicerrector Académico a.i.

MSc. Beverly Rojas

Vicerrectora de Investigación y Posgrado a.i.

Dra. Rosa Moreno

Vicerrectora Administrativa

Mgtr. Víctor Serrano

Vicerrector de Extensión

Dra. Olda Cano

Vicerrectora de Asuntos Estudiantiles

Dr. Darío Atencio

Secretario General a.i.

Facultad de Administración de Empresas y Contabilidad

Mgtr. Kilmara Castrellón

Decana

Mgtr. Elsy Miranda

Vicedecana

Dr. Erick Araúz

Director de CIDE



UNACHI-FAECO-CIDE

COMITÉ EDITORIAL

Editora en Jefe

Dra. Sheyla V. Calderón de Rodríguez

Equipo editorial interno

Dra. Nivia E. Gutiérrez

Mgtr. Licett Serracín

Equipo editorial externo

Ing. Danny Murillo (Universidad Tecnológica de Panamá)

Dra. Sucel López (Universidad de Panamá)

Dr. Víctor Martín Fiorino (Universidad Católica de Colombia)

Dra. Carina Fernández (Universidad Nacional del Chaco Austral)

FICHA TÉCNICA

Extensión: 79 páginas

Publicación continua

Idiomas aceptados: español, inglés y portugués

Evaluación por pares: doble ciego

Licencia: **Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).**

Equipo Técnico:

Dr. Daniel David Román Acosta

Mgtr. Fanny Hernández

Mgtr. Ada Estela Chávez Miranda

**Ciudad Universitaria, El Cabrero, David, Chiriquí, República de Panamá, Tel: 748-4900
Ext. 6001 | www.revistas.unachi.ac.pa**

EVALUADORES ACADÉMICOS

Evaluador/a	País
Dra. Sonia Elisabeth Ramos Medina	México
Dra. Suemi Lima Vargas	México
Dra. Florasela Fernández Victoria	España
Ing. José Rogelio Fung Corro	Panamá
Dr. Israel Jesús Calanche Aguirre	Venezuela
Dra. Lourdes Margarita Meza Ruiz	México
Dra. Marcela Elizabeth Nowak Kopach	Paraguay
Dra. Elisabeth Viviana Lucero	España
Doctoranda Belkis Chavarría	Panamá
Dr. Francisco Javier Mejía Ochoa	México
Dr. César Enrique López Arrillaga	Venezuela

La Revista **SyNerGia Empresarial** expresa su profundo agradecimiento a los evaluadores académicos que, con rigor, generosidad y compromiso, dedicaron parte de su tiempo personal a la revisión de los manuscritos considerados para este número. Su labor, muchas veces silenciosa y voluntaria, constituye un aporte esencial a la calidad editorial, al fortalecimiento de la ciencia abierta y a la construcción colectiva del conocimiento. Cada observación, recomendación y dictamen contribuye a elevar la pertinencia académica de los trabajos publicados y reafirma el valor de la evaluación por pares como práctica ética, colaborativa y fundamental para la comunicación científica.

Dra. Sheyla V. Calderón de Rodríguez

Editora en Jefe

Revista SyNerGia Empresarial

ÍNDICE

ARTÍCULOS

Páginas

- Desarrollo Gemelo Digital para diseño de componentes mecánicos manufacturados por CNC - Industria Aeroespacial Mexicana** 7-32
Autor: Jaime Roberto Castañeda Castañeda

ENSAYOS CIENTÍFICOS

- Gobernanza de datos y visualización crítica en ecosistemas de innovación dinámicos** 33-49
Autor: Miguel Ángel Guerra Guerra
- El engagement laboral y la calidad en atención al cliente como motor económico en empresas panameñas** 50-66
Autor: Ana Mari Solano Lázaro
- Ecosistemas de innovación disruptiva para la sostenibilidad, la economía circular y la inteligencia artificial** 67-83
Autor: Fernando Quirino Guerra Guerra

NOTA DE LA EDITORA

El Vol. 2, Núm. 1 (2026) de SyNerGia Empresarial representa un paso significativo en la consolidación de la revista como espacio académico de divulgación, análisis y reflexión en el campo de las ciencias empresariales. Este número reúne contribuciones orientadas al estudio de la innovación, la inteligencia artificial, la gobernanza de datos, el engagement laboral, la calidad del servicio, la manufactura avanzada y la sostenibilidad económica.

Los trabajos incluidos reflejan el interés de la revista por promover discusiones actuales vinculadas con los desafíos de las organizaciones contemporáneas, especialmente en contextos donde la tecnología, la gestión del conocimiento y la transformación productiva adquieren un papel estratégico. Desde enfoques críticos, documentales y aplicados, los manuscritos publicados aportan elementos para comprender fenómenos empresariales emergentes y fortalecer la reflexión académica regional.

Este volumen también reafirma el compromiso editorial de SyNerGia Empresarial con la calidad académica, la evaluación por pares, la transparencia del proceso editorial y la visibilidad del conocimiento en acceso abierto. La participación de evaluadores académicos de distintos países fortalece el carácter internacional de la revista y contribuye a consolidar una comunidad editorial diversa, colaborativa y comprometida con la mejora continua.

Agradecemos a los autores, evaluadores, autoridades universitarias, equipo editorial y colaboradores que han hecho posible la preparación de este número. Desde la Facultad de Administración de Empresas y Contabilidad de la Universidad Autónoma de Chiriquí, renovamos nuestro compromiso con una producción científica rigurosa, pertinente y abierta al diálogo académico nacional e internacional.

Dra. Sheyla V. Calderón de Rodríguez
Editora en Jefe
SyNerGia Empresarial

INVITACIÓN PERMANENTE A CONTRIBUCIONES ACADÉMICAS

La Revista SyNerGia Empresarial invita a docentes, investigadores, profesionales, estudiantes universitarios de nivel superior y comunidades académicas nacionales e internacionales a presentar contribuciones originales vinculadas con las ciencias empresariales, la administración, la contabilidad, la innovación, la sostenibilidad, la inteligencia artificial, la transformación digital, la gestión organizacional y áreas afines.

Como revista de acceso abierto y publicación continua, SyNerGia Empresarial promueve la circulación responsable del conocimiento, la visibilidad de la producción académica regional y el fortalecimiento de una cultura científica basada en la ética editorial, la evaluación por pares y la mejora permanente de los manuscritos.

La revista valora especialmente los trabajos que aporten análisis críticos, revisiones documentales, estudios aplicados, ensayos científicos y propuestas orientadas a comprender los desafíos contemporáneos de la gestión empresarial.

SyNerGia Empresarial reafirma su compromiso con una ciencia abierta, colaborativa y pertinente, al servicio del desarrollo académico, institucional y social.



**Desarrollo Gemelo Digital para diseño de componentes mecánicos
manufacturados por CNC - Industria Aeroespacial Mexicana**
**Digital Twin Development for design of CNC manufactured mechanical
components in the Mexican Aerospace Industry**
**Desenvolvimento de Gêmeo Digital para o Projeto de Componentes
Mecânicos Manufacturados por CNC – Indústria Aeroespacial
Mexicana**

Jaime Roberto Castañeda Castañeda

Universidad IDESUM, México

Correo de correspondencia: mtajamecastaneda@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-0822-8672>

Recibido: 21 de mayo de 2026

Aceptado: 27 de julio de 2026

Publicado: 31 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.59722/synergia.v2i1.1278>

Resumen

En la industria aeroespacial mexicana, el maquinado de componentes metalmecánicos mediante tecnologías CNC (Control Numérico Computarizado) ha emergido como un elemento central en la competitividad y capacidad de producción. El análisis del estado actual revela un aprovechamiento limitado de herramientas avanzadas de simulación y optimización, que restringe la eficiencia y precisión de la manufactura. Las prácticas predominantes dependen de simulaciones CAM (*Computer Aided Manufacturing*) orientadas a la planificación de trayectorias de corte, se omite el comportamiento dinámico real de las máquinas-herramienta y la interacción material-herramienta durante el proceso de mecanizado, provocando un desfase entre las condiciones simuladas y los resultados reales. La ausencia de gemelos digitales integrales que cierren el ciclo “Diseño, Proceso y Desempeño”, la falta de una arquitectura de gemelo digital que combine CAD (*Computer Aided Design*), simulación dinámica de corte, datos operativos de



la máquina y modelos de inteligencia artificial explicable limita la capacidad de optimización integral del componente. La optimización paramétrica principalmente se realiza de manera empírica, basándose en la experiencia del operador o ingeniero, restringiendo la escalabilidad, trazabilidad y robustez de los procesos frente a variaciones de material, geometría o condiciones de corte. En este contexto, la incorporación de maquinados CNC con capacidades avanzadas representa una oportunidad tecnológica estratégica para la industria metalmecánica mexicana. Estas capacidades permiten el desarrollo de modelos predictivos más sofisticados, alimentados por inteligencia artificial y técnicas de *machine learning*, que optimizan parámetros de corte y predicen desempeño. La integración de CAM avanzada con análisis de dinámica de corte y modelos de IA explicable facilita un diseño de proceso basado en evidencia, disminuyendo la dependencia de la experiencia empírica y elevando la eficiencia de la manufactura. La adopción de gemelos digitales completos en la fabricación CNC habilita mejora continua de productos y procesos. Esto resulta particularmente crítico en el contexto aeroespacial.

Palabras clave: aeroespacial, herramienta mecánica, manufactura, industria mexicana, gemelo digital

Abstract

In the Mexican aerospace industry, the machining of metal-mechanical components through CNC (Computer Numerical Control) technologies has emerged as a central element in competitiveness and production capability. Analysis of the current state reveals limited use of advanced simulation and optimization tools, which constrains manufacturing efficiency and precision. Predominant practices rely on CAM (Computer Aided Manufacturing) simulations focused on cut path planning, while overlooking the actual dynamic behavior of machine tools and the material-tool interaction during the machining process, creating a gap between simulated conditions and real-world results. The absence of comprehensive digital twins capable of closing the “Design, Process, and Performance” loop, along with the lack of a digital twin architecture integrating CAD (Computer Aided Design), dynamic cutting simulation, machine operational data, and explainable artificial intelligence models, limits the capability for comprehensive component optimization. Parametric optimization is primarily carried out empirically, based on the experience of the operator or engineer, which restricts the scalability, traceability, and robustness of processes when facing variations in material, geometry, or cutting conditions. In this context, the incorporation of CNC machining with advanced capabilities represents a strategic technological opportunity for the Mexican metal-mechanical industry. These capabilities enable the development of more



sophisticated predictive models powered by artificial intelligence and machine learning techniques that optimize cutting parameters and predict performance. The integration of advanced CAM with cutting dynamics analysis and explainable AI models facilitates evidence based process design, reducing dependence on empirical experience and increasing manufacturing efficiency. The adoption of comprehensive digital twins in CNC manufacturing enables continuous improvement of products and processes. This becomes particularly critical within the aerospace context.

Keywords: aerospace, digital twin, machine tool, manufacturing, Mexican industry

Resumo

Na indústria aeroespacial mexicana, a usinagem de componentes metalomecânicos por meio de tecnologias CNC (Controle Numérico Computadorizado) emergiu como um elemento central na competitividade e na capacidade de produção. A análise do estado atual revela um aproveitamento limitado de ferramentas avançadas de simulação e otimização, o que restringe a eficiência e a precisão da manufatura. As práticas predominantes dependem de simulações CAM (Computer Aided Manufacturing) orientadas ao planejamento de trajetórias de corte, enquanto o comportamento dinâmico real das máquinas-ferramenta e a interação material-ferramenta durante o processo de usinagem são omitidos, provocando uma discrepância entre as condições simuladas e os resultados reais. A ausência de gêmeos digitais integrais que fechem o ciclo “Projeto, Processo e Desempenho”, bem como a falta de uma arquitetura de gêmeo digital que combine CAD (Computer Aided Design), simulação dinâmica de corte, dados operacionais da máquina e modelos de inteligência artificial explicável, limita a capacidade de otimização integral do componente. A otimização paramétrica é realizada principalmente de forma empírica, baseada na experiência do operador ou engenheiro, restringindo a escalabilidade, a rastreabilidade e a robustez dos processos diante de variações de material, geometria ou condições de corte. Nesse contexto, a incorporação de usinagem CNC com capacidades avançadas representa uma oportunidade tecnológica estratégica para a indústria metalomecânica mexicana. Essas capacidades permitem o desenvolvimento de modelos preditivos mais sofisticados, alimentados por inteligência artificial e técnicas de machine learning, que otimizam parâmetros de corte e preveem desempenho. A integração de CAM avançado com análise da dinâmica de corte e modelos de IA explicável facilita um projeto de processo baseado em evidências, reduzindo a dependência da experiência empírica e elevando a eficiência da manufatura. A adoção de gêmeos digitais completos na fabricação CNC possibilita a melhoria contínua de produtos e processos. Isso se torna particularmente crítico no contexto aeroespacial.



Palabras-chave: aeroespacial, herramienta mecánica, manufactura, industria mexicana, gêmeo digital

Introducción

La integración de tecnologías emergentes como la Planificación de Procesos Asistida por Computadora (CAPP), el Gemelo Digital (DT) y la Manufactura Inteligente (SM) está revolucionando el proceso de mecanizado al mejorar la eficiencia, la flexibilidad y la capacidad de anticipar tendencias futuras en la manufactura (Afif y Sarhan, 2025).

Las inexactitudes geométricas en la configuración de la máquina y en las especificaciones de las piezas son una fuente importante de errores en el mecanizado CNC. Estas discrepancias han afectado durante mucho tiempo la calidad de los componentes fabricados y continúan siendo un área clave de investigación tanto en la academia como en la industria (Ahmed y Amorim, 2025).

La automatización es el proceso de crear los modelos sin usar una interfaz. Los modelos se pueden generar con un lenguaje de programación y con una API que se vincule al paquete CAD. La API Siemens NX Open se usa para la automatización, la cual registra los procedimientos con *journaling*. La API NX Open es un conjunto de rutinas que permite a los programas acceder al modelo de objetos y a los programas, interactuando con el modelo de objetos de NX. Con base en estas rutinas, se desarrollan algoritmos para automatizar la generación del modelo CAD (Anbalagan et al., 2021).

Los rápidos avances en la Inteligencia Artificial (IA) han brindado nuevas oportunidades para optimizar la tecnología de Control Numérico por Computadora (CNC), fundamental para el diseño mecánico, la manufactura y la automatización, explorando estrategias de optimización impulsadas por IA en sistemas CNC con el fin de mejorar la eficiencia del mecanizado, la calidad de la superficie, la vida útil de la herramienta y la estabilidad operativa general (Bai, 2025).

En 2013, la Fuerza Aérea de los Estados Unidos mencionó explícitamente y utilizó de manera intercambiable los conceptos de Hilo Digital (*Digital Thread*) y Gemelo Digital (*Digital Twin*), destacando que estos poseen una memoria histórica y la capacidad de aprovechar conocimientos previos y actuales para obtener conciencia del estado y pronóstico del sistema, proporcionando así, la agilidad y capacidad de adaptación necesarias para un rápido desarrollo e implementación (Barricelli et al., 2019).

El Gemelo Digital se ha convertido en un tema de investigación de frontera en los últimos años y en una importante dirección de desarrollo para la manufactura inteligente. En el



mecanizado por control numérico (CNC), un sistema de Gemelo Digital puede utilizarse como un centro inteligente de monitoreo y análisis al reflejar el proceso real de mecanizado en un entorno virtual. La simulación del mecanizado es la tecnología clave para hacer posible este tipo de aplicación (Cao et al., 2020).

Como equipo clave en la industria manufacturera, las máquinas de Control Numérico por Computadora (CNC) necesitan satisfacer las crecientes demandas de la alta automatización, inteligencia e integración. Desde su introducción en 2003, el Gemelo Digital (DT) ha tenido amplias aplicaciones en diversas áreas, como el diseño de productos, el monitoreo de procesos, el control de calidad y el diagnóstico de fallas, un Gemelo Digital crea una réplica virtual del sistema físico mediante la integración de datos en tiempo real (Cao, 2025).

El desarrollo e implementación de una solución de monitoreo en tiempo real diseñada para máquinas CNC, habilita la solución a las máquinas en el ambiente industrial. Usamos la tecnología del Gemelo Digital (DT), el sistema integra una base de datos SQL (*Structured Query Language*) con interfaces Android y NET asegurando una sincronización fluida de los datos con las máquinas, así el sistema mejora los procesos de producción. El monitoreo en tiempo real permite reflejar de inmediato los cambios operativos, mejorando el mantenimiento predictivo y reduciendo el tiempo de inactividad de las máquinas (Daraba et al., 2024).

Los gemelos digitales con una descripción basada en habilidades están encontrando cada vez más aplicaciones en la producción industrial. Sus modelos vinculan las propiedades de un producto con las capacidades de proceso disponibles, las cuales son realizadas mediante las habilidades de los recursos. Un proceso de emparejamiento permite identificar recursos capaces de cubrir las necesidades existentes, de cualquier manera, aún falta la integración con programas de Diseño Asistido por Computadora (CAD) y Manufactura Asistida por Computadora (CAM) (Dietrich et al., 2023).

Los Gemelos Digitales llegaron y cambiaron los sectores industriales, ya que crean una copia de los objetos del mundo real. Además, los Gemelos Digitales en el mecanizado, permiten observar, analizar y mejorar en tiempo real los resultados y procesos de producción, uniendo el mundo físico con el digital. Los operadores e ingenieros de la industria del mecanizado pueden utilizar Gemelos Digitales para mejorar la eficiencia operativa, reducir costos y mantener altos estándares de calidad (Dolli et al., 2024).

El proceso de manufactura híbrida combina preformas hechas con manufactura aditiva metálica y después las lleva a una estación CNC para maquinado. El proceso de manufactura

híbrida permite usar el material de manera óptima y, por ende, reducir desperdicio. El proceso de manufactura trae desafíos, los siguientes son algunos de ellos, localizar el sistema de coordenadas de trabajo, en generar trayectorias de herramienta y en mantener la estabilidad durante el fresado. En este caso, el desarrollo de un Gemelo Digital del proceso de maquinado ayuda a integrar modelos que predicen y mediciones del proceso, además de a escoger parámetros de corte que funcionan y a validar la geometría del componente a ser manufacturado (Dvorak et al., 2022).

La manufactura inteligente se ha convertido en una tendencia principal de la industria manufacturera, en el contexto de la Industria 4.0, la integración de las máquinas de fabricación físicas y sus contrapartes virtuales digitalizadas es impulsada por los conceptos y tecnologías emergentes del Gemelo Digital, con el objetivo de integrar de manera fluida el ciberespacio y el mundo físico mediante la construcción de un sistema de mapeo bidireccional, el Gemelo Digital puede mejorar significativamente la experiencia del usuario y la eficiencia de producción en la manufactura inteligente (Geng et al., 2022).

Las máquinas herramienta CNC, son los sistemas de manufactura, están integrados por componentes tales como, el husillo de velocidad, el servomotor multieje, el controlador y el proceso de mecanizado. El objetivo de las máquinas herramienta CNC es precisión y productividad en los procesos de mecanizado que responden a los factores del mismo ambiente, incluyendo el desgaste de la herramienta, las vibraciones por *chatter*, la deformación, el desgaste del husillo, el desgaste de los rodamientos, los problemas de los servomotores y el consumo de energía. Por lo tanto, el monitoreo continuo de su condición y estado es esencial para garantizar la precisión del mecanizado, la confiabilidad y la reducción de tiempos de inactividad (Hamza 2026).

Se observa que en el mecanizado con Control Numérico (NC) la trayectoria de la herramienta se define con datos dados, estos, influyen en la calidad del trabajo y en la velocidad de la producción. El sistema crea estos datos según las condiciones de corte, entonces, si los datos NC hacen que la carga de corte sea alta, la carga de corte alta acelera el desgaste de la herramienta y puede dañar la herramienta, por otro lado, si la carga de corte es baja, el tiempo de mecanizado se alarga y afecta la productividad. Los datos NC también pueden influir en la calidad de la superficie desde la perspectiva de la dinámica de corte, dependiendo de la combinación máquina, herramienta, material y herramienta de corte (Heo y Yoo, 2021).

En la fase de ingeniería de los sistemas de manufactura modernos, los métodos y las herramientas de simulación se han consolidado para enfrentar la exigencia de mayor eficiencia en el tiempo y mayor rentabilidad. Cuando se aplican esas soluciones de simulación, se crean gemelos digitales basados en modelos de simulación multidominio, los cuales, describen el comportamiento del sistema de manufactura. Durante el proceso de producción, surge un Gemelo Digital basado en datos en el contexto de Industria 4.0, impulsado por una mayor interconectividad y por nuevas tecnologías en la nube (Jaensch et al., 2018).

El Aprendizaje Automático (ML) y la Inteligencia Artificial (IA) han experimentado un aumento en su grado de aplicación asociado con la Industria 4.0. Su utilización efectiva se ha potenciado gracias a la disponibilidad de mayor capacidad computacional y a la digitalización de los procesos de producción, orientadas al desarrollo del Gemelo Digital (Jarosz y Ozel, 2021).

Por definición, un Gemelo Digital es una copia en la computadora de un producto que existe en el mundo real, esta copia guarda la información del producto y del proceso, el concepto nació en el campo de la gestión del ciclo de vida del producto. El Gemelo Digital se compone de tres elementos: un producto físico, una representación virtual de ese producto y las conexiones bidireccionales de datos que alimentan con información desde el entorno físico hacia la representación virtual, así como información y procesos desde la representación virtual hacia el entorno físico (Jones et al., 2020).

La industria manufacturera es un pilar fundamental de la economía nacional, del bienestar de la población y de la seguridad nacional. En particular, la profunda integración de la tecnología de manufactura con las tecnologías de la información y la comunicación, las tecnologías inteligentes y el conocimiento especializado relacionado con los productos están posibilitando una transformación revolucionaria en los modelos de manufactura, los métodos de producción y sus ecosistemas (Li et al., 2021).

Los sistemas de Control Numérico por Computadora (CNC) han cambiado de forma importante y consistente, son ahora herramientas clave para la manufactura moderna. Los sistemas de CNC permiten mecanizar con varios ejes y con alta precisión habilitando programar la automatización. Los avances recientes en la tecnología CNC se centran en los componentes clave del sistema, basados en interpoladores y controladores servo, técnicas de interpolación de alto orden y algoritmos avanzados de suavizado en cortes que mejoran la generación de trayectorias de herramienta y la calidad de la superficie, así como estrategias de control servo que optimizan el rendimiento de seguimiento y la respuesta dinámica (Lim et al., 2025).

El Gemelo Digital (*Digital Twin*, DT) es un concepto que forma parte de la Industria 4.0. La industria y la investigación usan el Gemelo Digital, aun así, la literatura científica no da una definición concreta de este. Las definiciones del concepto de DT en la literatura científica han cambiado, primero apareció en el campo aeroespacial, tiempo después se trasladó al dominio de la manufactura, hoy en día se estudia mucho en la Industria 4.0 y en la manufactura inteligente. El Gemelo Digital crea representaciones virtuales de los sistemas, mostrándolas a lo largo del ciclo de vida de los sistemas, de este modo, las optimizaciones y la toma de decisiones se basan en los mismos datos que se actualizan en tiempo real con el sistema físico, mediante una sincronización habilitada por sensores (Negri et al., 2017).

El procesamiento con máquinas-herramienta CNC es una parte importante del desarrollo actual de la modernización de la maquinaria. Para garantizar la precisión y la calidad estable del mecanizado por control numérico, la codificación del programa CNC debe validarse para evitar que, durante la ejecución del programa, se produzcan problemas como subcorte o colisiones. Por lo tanto, en el proceso de aplicación del mecanizado por Control Numérico, es necesario utilizar tecnología de gemelo digital para realizar simulaciones de mecanizado y de corte (Pan et al., 2020).

La arquitectura DTE (*Digital Twin Ecosystem*) integra la adquisición, el procesamiento y la sincronización de datos en tiempo real con la máquina CNC física. Nuestra arquitectura adopta y amplía la metodología utilizando dos componentes: el Componente de Adquisición, Procesamiento y Distribución de Datos (APDC) y el Componente de Representación Virtual (VRC), desarrollado utilizando la plataforma de desarrollo en tiempo real. El DTE modela con precisión el comportamiento de la máquina CNC bajo diversas condiciones de operación (Pantelidakis y Mykoniatis, 2024).

En los procesos de maquinado con máquinas-herramienta CNC, tanto los errores geométricos estáticos como los errores dinámicos influyen significativamente en la precisión final del componente mecanizado. La integración de modelos de Gemelo Digital con datos multisensoriales permite representar de manera fiel el comportamiento del sistema de manufactura y estimar en tiempo real la calidad del proceso. Este enfoque facilita el control cerrado de la precisión de maquinado y mejora la capacidad predictiva del sistema frente a desviaciones durante la operación (Sa et al., 2024).

Los Gemelos Digitales, como parte de la Industria 4.0, son fundamentales para los procesos avanzados de manufactura inteligente, incluido el mecanizado. Los sistemas de



sensores en la manufactura inteligente permiten el seguimiento en tiempo real de todos los cambios en el proceso de mecanizado, así como la simulación del comportamiento de un objeto en el mundo real. Además, pueden intervenir y corregir cualquier defecto que pueda surgir durante el proceso de mecanizado (Silva et al., 2025).

El Gemelo Digital de una tarea de mecanizado CNC puede optimizar el proceso, además ayuda tanto en la etapa de planificación como en la etapa de mecanizado. La calidad de un producto maquinado depende de la precisión y del acabado superficial al final de la etapa de mecanizado, que permite la simulación, predicción y optimización de los indicadores clave de desempeño (en este caso, el acabado superficial) durante la etapa de planificación del proceso y la etapa de mecanizado, utilizando datos de mecanizado históricos y en tiempo real, respectivamente (Vishnu et al., 2020).

El Gemelo Digital (*Digital Twin*) ha recibido una atención creciente, ya que ofrece una herramienta habilitadora para hacer realidad una manufactura impulsada digitalmente y habilitada por la nube. Dadas las dinámicas no lineales y la incertidumbre involucradas durante el proceso de degradación de la maquinaria, el diseño adecuado y la capacidad de adaptación de un modelo de Gemelo Digital continúan siendo un desafío (Wang et al., 2019).

El futuro del mecanizado se encuentra en la máquina herramienta totalmente autónoma, es necesario desarrollar nuevas tecnologías que puedan predecir, detectar y tomar decisiones inteligentes de manera independiente. Los Gemelos Digitales son un componente de este camino y ya están teniendo un impacto significativo en las industrias manufactureras, a pesar de ello, la implementación de Gemelos Digitales en el mecanizado ha sido lenta debido a la carga computacional que implica la simulación de las fuerzas de corte en línea (Ward et al., 2021).

El modelo de Gemelo Digital (DT) de una Máquina Herramienta de Control Numérico por Computadora (CNCMT) es un portador de datos complejos, acoplados y variables en el tiempo de la CNCMT, que teóricamente puede proporcionar un modelo de alta fidelidad y variable en el tiempo, sin embargo, todavía existen muchas dificultades en su proceso de implementación. El problema clave es cómo actualizar el modelo de DT teniendo en cuenta la atenuación del rendimiento y su validación (Wei et al., 2020).

El Mecanizado de Ultra Precisión (UPM) es un tipo de tecnología de procesamiento de alta exactitud desarrollada para satisfacer los requisitos de manufactura de productos de vanguardia de alta gama, incluyendo reactores de energía nuclear, circuitos integrados de gran



escala, láseres y aeronaves. El fenómeno de asimetría de información está ampliamente presente en el diseño y control del mecanizado de ultra precisión (Wu et al., 2021).

La precisión de una máquina, de un equipo o de un sistema se va degradando con el tiempo, cuando llega a un punto importante, suelen aparecer las fallas o el mal funcionamiento. En el sector militar, en el sector aeroespacial y en otros sectores, una falla inesperada de los componentes de transmisión puede generar las pérdidas económicas, puede generar los daños al medio ambiente y puede generar la pérdida de vidas humanas, este hecho puede producir consecuencias catastróficas.

Si es posible detectar condiciones anormales a tiempo, con base en los datos de monitoreo y en los resultados de simulaciones predictivas durante las etapas iniciales de degradación del desempeño y utilizar esta información como fundamento para el mantenimiento del sistema, se podrá garantizar la eficiencia, seguridad y confiabilidad (Yang et al., 2022).

En la era industrial, el equipo de producción funciona como una máquina madre esencial, en la industria manufacturera global, los componentes como computadoras portátiles, teléfonos móviles y piezas automotrices buscan todo un diseño estético.

La industria de máquinas herramienta de Taiwán desempeña un papel significativo a nivel mundial, frente a un entorno de mercado en constante cambio, el desarrollo y la ventaja competitiva de las máquinas CNC son temas cruciales para los fabricantes (Yao et al., 2024).

La gestión efectiva de la deformación durante el fresado de una pieza de paredes delgadas mejorará significativamente su calidad, lo cual, sin embargo, sigue siendo difícil de alcanzar debido a la falta de un método de percepción, optimización y control de deformación en tiempo real, para cubrir esta brecha, se propone un nuevo método de control óptimo en línea de la deformación durante el fresado de piezas de paredes delgadas, incorporando Gemelos Digitales en el proceso de fresado de estas piezas (Zhang et al., 2022).

El concepto de Gemelo Digital ha sido aceptado por un número cada vez mayor de investigadores y empresas, se han reportado numerosas aplicaciones de los sistemas de Gemelos Digitales, como el monitoreo del estado de aviones y la fábrica inteligente, además es una medida importante para lograr la manufactura inteligente y la Industria 4.0, así el avance de los sistemas DT en el entorno manufacturero se torna evidente (Zhao et al., 2019).

En comparación con las máquinas CNC tradicionales, el fresado con robots presenta las ventajas de bajo costo, alta flexibilidad y gran adaptabilidad, ofreciendo una nueva solución para el mecanizado de superficies complejas, una limitante identificada es, que la planificación de la

trayectoria de mecanizado de robots en el mundo real es consumidora de tiempo y conlleva riesgos de seguridad, al mismo tiempo, lograr un monitoreo con visualización 3D efectivo durante el proceso de fresado también representa un problema altamente desafiante (Zhu et al., 2023).

La deformación por manufactura hace que las piezas sean defectuosas, que se desperdicie materia prima, al igual que tiempo de mecanizado, lo cual, reduce la eficiencia del proceso. Actualmente, el tiempo de desarrollo de la fabricación se ha reducido por las mejoras en los sistemas CAD/CAM, aun así, en la fase de prueba de mecanizado, los operadores cambian la forma de sujetar la pieza y los ajustes de la máquina, con lo cual mejoran las trayectorias de las herramientas en cada prueba para lograr la calidad que necesita la producción masiva (Zhu et al., 2021).

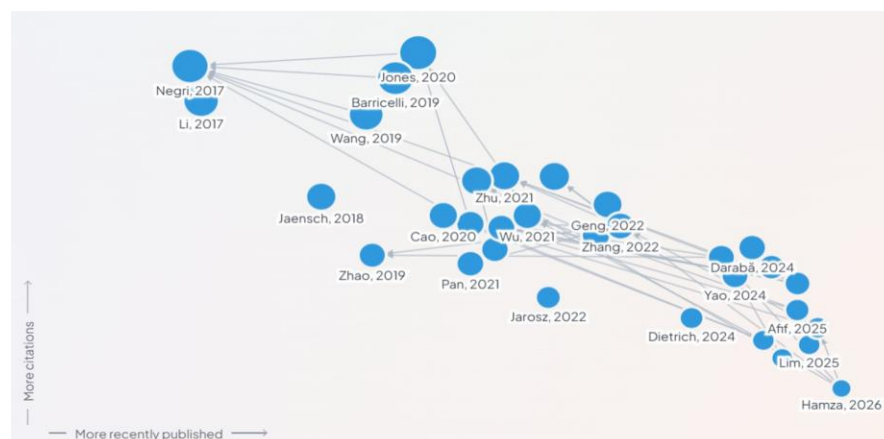
Método de búsqueda y selección (transparencia)

Este manuscrito se lleva a cabo mediante la utilización de ResearchRabbit y Zotero, las cuales son fuentes solidas de investigación y facilitadoras de gestión de información, apoyando la recolección de datos filtrando por palabras clave: sostenibilidad, economía circular, integración económica; Fecha de publicación: años 2016 - 2026; Cuartil de publicación: artículos publicados en el Q1; Acceso abierto y Journal H-Index 500-1500.

Basado en los datos recabados, se cubre el objetivo de identificar la necesidad y las ventajas de la creación, fortalecimiento e implementación en tiempo y forma de esta herramienta o conjunto de ellas, conocidas como gemelos digitales. La conexión entre los manuscritos se muestra en la figura 1.

Figura 1

Relación entre los manuscritos seleccionados con el tema de gemelos digitales



Nota. Elaboración con datos obtenidos mediante *ResearchRabbit*.

Desarrollo - Síntesis temática

La evolución tecnológica en los procesos de manufactura ha redefinido el papel del mecanizado CNC (Control Numérico Computarizado) dentro de los sistemas productivos contemporáneos. Lo que anteriormente se concebía como una operación mecánica y relativamente aislada, ha transitado hacia esquemas de operación altamente interconectados, la integración de capacidades digitales, control avanzado y gestión de datos ha ampliado el alcance funcional de estas plataformas de mecanizado.

Por eso, el mecanizado CNC forma hoy parte de los entornos de manufactura complejos y se apoya en las plataformas de mecanizado. La evolución de la manufactura hacia la industria 4.0 ha cambiado el mecanizado CNC que antes era un proceso mecánico aislado a formar parte de un sistema ciberfísico integrado (Ahmed y Amorim, 2025).

El uso de los Gemelos Digitales (*digital twins*) mejora la calidad, predice los errores geométricos y automatiza las cadenas de herramientas con modelos que combinan habilidades, impulsando la evolución de la manufactura avanzada (Ahmed y Amorim, 2025; Dietrich et al., 2023; Vishnu et al., 2020). Actualmente está comprobado cómo la innovación colectiva y el manejo ético de los datos definen la competitividad regional y el aprendizaje organizacional a partir del error (Dvorak et al., 2022; Pan et al., 2020).

En la fabricación, la innovación ya no se queda en mejorar una máquina, sino que esta mejora, forma parte de un conjunto de procesos que trabajan en combinación.

Las plataformas CAD/CAM conectan sistemas que hacen que las operaciones se coordinen, en este contexto, las decisiones no hacen los sistemas independientes, entonces, el especialista sigue tomando decisiones, el planificador de procesos y el operador de máquina continúan dentro del ciclo de control y retroalimentación por ciclos la información de los Gemelos Digitales.

También la visión de la manufactura que combina las diversas habilidades involucradas en esta tecnología dice que la innovación nace al organizar los servicios digitales en la cadena de valor, con esa lógica la ciencia de materiales, la cinemática de la máquina, las herramientas y los algoritmos de aprendizaje automático, trabajan en conjunto para que la producción de los componentes personalizados y complejos sea más eficiente.

La innovación en la manufactura es entonces ahora un trabajo en equipo, el cual se organiza con los modelos de Producto, Proceso y Recurso (PPR), estos modelos organizan la manufactura, los servicios de diseño asistido por computadora (CAD) y los servicios de

fabricación asistida por computadora (CAM), todos ellos se integran bajo arquitecturas que permiten acceso necesario para esta interacción (Dietrich et al., 2023).

En la figura 2 se muestra el ciclo PPR con las principales variables que lo componen.

Figura 2

El ciclo PPR – Producto, Proceso y Recurso



Nota. Elaboración de la ilustración mediante *Notebook LM*.

La colaboración ocurre entre los sistemas de software y el medio ambiente del mundo real, mantiene al ser humano en el hilo, entonces el planificador de procesos y el operador de la máquina toman decisiones, usando la retroalimentación del Gemelo Digital (Vishnu et al., 2020).

El enfoque de manufactura basada en habilidades combinadas muestra que la innovación aparece cuando la empresa tiene la capacidad de orquestar los diferentes servicios tecnológicos dentro de la cadena de valor unificada (Dietrich et al., 2023).

En este contexto, la innovación en conjunto obliga al conocimiento de los materiales, al conocimiento de las cinemáticas de las máquinas y al conocimiento de los algoritmos de aprendizaje automático a unirse, con el objetivo común de producir piezas a medida de manera rápida, efectiva y constante (Dietrich et al., 2023; Vishnu et al., 2020).



En los ecosistemas y en la competitividad regional, el sector de la máquina-herramienta ha cambiado, se observa, que el consumo subió de 60 mil millones de dólares en 2019 a 110 mil millones de dólares en 2024. El consumo muestra un giro hacia mercados como América del Norte, los ecosistemas que cambian se sostienen con el uso de tecnologías de ultra precisión, estas tecnologías permiten a las industrias del país competir en sectores de valor como el aeroespacial, la óptica y los semiconductores (Ahmed & Amorim, 2025).

En los entornos de manufactura avanzada, la competitividad industrial no depende solo de la incorporación de la maquinaria de vanguardia. La competitividad también depende de la implementación del software que compensa los errores, el software mejora la precisión del proceso, prolonga la vida operativa de los equipos existentes y dirige un mejor factor de costo-beneficio, procurando y manteniendo una alta calidad en los productos. El software ayuda a ahorrar dinero y a reducir los tiempos muertos, la vida operativa de los equipos se alarga cuando el software controla los fallos y al mismo tiempo, la unión de las infraestructuras de computación en la nube permite crear las arquitecturas de producción que pueden adaptarse a las necesidades de la industria. Las plantas regionales pueden responder más rápido a los escenarios de demanda los cuales son altamente dinámicos y cambian rápidamente.

Sin embargo, el desarrollo de gemelos digitales con modelos de aprendizaje automático aun enfrenta problemas altamente relevantes en cuanto a la calidad, la consistencia y la representatividad del dato que se usa para entrenar. El desarrollo necesita datos de calidad, entonces la validación de las fuentes es clave, esta validación combina el registro de mecanizado con el dato de operación en tiempo real, dando lugar así a la fuente de la verdad que ayuda a mantener la trazabilidad y la confiabilidad del conocimiento digital durante el ciclo de vida del producto.

La competitividad no depende solo de adquirir hardware caro, también depende de la capacidad de aplicar estrategias de compensación de errores con software, integrar las estrategias de compensación de errores, lo que conduce a que el equipo presente una mayor vida útil (Ahmed & Amorim, 2025).

La integración de la nube y del borde permite que las plantas de fabricación de la región sean más ágiles y que así, se adapten de mejor forma a la volatilidad del mercado (Dietrich et al., 2023).

La construcción de los modelos de datos para los Gemelos Digitales necesita cuidado y mantenimiento, si esto se hace de forma deficiente, los modelos basados en el aprendizaje

automático (ML), pueden enfrentar problemas de integridad y de representatividad de la información (Ahmed & Amorim, 2025; Vishnu et al., 2020).

El cribado de fuentes es vital; por ejemplo, el uso de datos históricos de mecanizado debe complementarse con datos en tiempo real para evitar modelos sesgados que no consideren el desgaste de la herramienta (Vishnu et al., 2020).

La ética en los datos también está vinculada a la gestión de una *Single Source of Truth* (SSOT), su correcta gestión, asegura que la trazabilidad del producto no se altere durante su ciclo de vida (Dietrich et al., 2023).

En los sistemas CNC, la incorporación de los modelos de predicción basados en el aprendizaje automático se ha vuelto una forma de identificar a buen tiempo las desviaciones en la forma y de optimizar la precisión de la pieza durante el proceso de manufactura, con el análisis de los datos de mecanizado, con las variables de proceso y con la información técnica que proviene de los sensores, los modelos identifican los patrones que están ligados a los errores que se repiten y a los errores que aparecen al azar en la cinemática de la máquina-herramienta. Los modelos ayudan a mejorar la calidad, la integración de los algoritmos de aprendizaje supervisado y de las técnicas de regresión permite crear los modelos que estiman las desviaciones de forma en tiempo casi sin demoras, los esquemas de compensación ajustan la trayectoria de la herramienta y los parámetros de control usando los modelos y los algoritmos.

Desde el punto de vista de la ingeniería de manufactura, el enfoque cambia la forma de corregir errores y lo convierte en un problema de inferencia con datos, entonces la calidad del modelo depende mucho de que el conjunto de entrenamiento represente bien el proceso, por esto, la incorporación de datos de operación en línea permite que los modelos que predicen se actualicen constantemente, los modelos de predicción capturan los efectos del desgaste de la herramienta y las especificaciones de las máquinas, con la sinergia entre la analítica de datos y el control de procesos es un paso para crear arquitecturas de manufactura que usan los Gemelos Digitales y que funcionan en formato de datos, los desarrollos entonces, hacen que la estabilidad del proceso de mecanizado mejore, que el desperdicio se reduzca y que la producción de los componentes de alta precisión alcance tolerancias más cerradas.

Los modelos predictivos requieren conjuntos de datos con una cobertura más completa de todos los parámetros que influyen en la calidad superficial, esto es un punto crítico identificado actualmente (Vishnu et al., 2020).



El uso del protocolo ligero MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*) permite transferir datos grandes desde los sensores, el manejo claro de este protocolo evita fallos de procesamiento por datos incorrectos, con la validación de los datos como obligación ética se evitan accidentes de procesamiento que pueden dañar al equipo y al personal (Pan et al., 2020).

La visualización en los gemelos digitales ha evolucionado de ser una simple representación gráfica a una herramienta de diagnóstico que permite aprender del error antes de que este ocurra físicamente, el análisis crítico de los errores geométricos (como los errores de posición, rectitud y rotación) a través de mapas de estabilidad y Funciones de Respuesta de Frecuencia (FRF) transforma el fallo potencial en una oportunidad de ajuste proactivo (Ahmed & Amorim, 2025; Dvorak et al., 2022).

La visualización muestra las desviaciones superficiales entre el escaneo de la pieza final y el modelo CAD (*Cad Aided Design*) original con esta visualización se cierra el ciclo de aprendizaje (Dvorak et al., 2022). Este proceso de aprendizaje continuo hace que el modelo de datos sea más fuerte con el tiempo, reduciendo la incertidumbre cuando aparecen nuevas condiciones de mecanizado (Vishnu et al., 2020).

Las simulaciones de corte en tiempo real muestran el proceso dentro de “carcasas de máquinas transparentes” virtuales, además son capaces de identificar colisiones y problemas de subcorte (Pan et al., 2020).

Tenemos la necesidad de crear gemelos digitales con datos que permiten predecir la rugosidad superficial (R_a) y compensar los errores cinemáticos (Ahmed & Amorim, 2025; Vishnu et al., 2020). Los modelos ofrecen soluciones usando registros temporales confiables, algunos usan escaneo de luz estructurada con esos métodos los modelos pueden alinear los sistemas de coordenadas en la manufactura híbrida (Dvorak et al., 2022).

Se presenta la *Asset Administration Shell* como el estándar que permite la interoperabilidad de los modelos y los equipos (Dietrich et al., 2023).

En la práctica industrial actual, muchos modelos de compensación de errores en máquinas CNC han sido desarrollados con un alto grado de especialización, ajustándose a configuraciones cinemáticas particulares, condiciones operativas específicas e incluso a un equipo individual dentro de una planta. Si bien estos enfoques permiten obtener mejoras locales significativas en la precisión geométrica, su aplicabilidad resulta altamente limitada si se pretende transferir el conocimiento hacia otras máquinas, plataformas o entornos productivos. Esta fragmentación metodológica dificulta la escalabilidad de las estrategias de compensación y limita

que los procesos de mecanizado generen el conocimiento al ritmo deseado, aun así, los procesos de mecanizado estandarizan el conocimiento y se facilita el uso del conocimiento en los procesos de manufactura.

Desde la investigación en manufactura se necesita pasar a modelos que se puedan aplicar a más casos. Los modelos deben mostrar cómo se relacionan la cinemática de la máquina-herramienta, las condiciones de proceso y los errores geométricos, esta integración de aprendizaje automático y de modelado híbrido físico-estadístico permite encontrar patrones que aparecen entre arquitecturas de máquinas.

Bajo este paradigma, los modelos no solo describen el comportamiento del equipo, también pueden adaptarse usando técnicas de transferencia de aprendizaje o recalibración paso a paso, por lo tanto, la evolución hacia marcos de compensación que busquen alcanzar un mayor número de beneficiarios, son la clave para mejorar la interoperabilidad entre sistemas reduciendo el tiempo de puesta en marcha y fortaleciendo la adopción de las estrategias de fabricación que usan datos en los entornos de la industria.

Los modelos de compensación son muy específicos para una configuración de máquina, y por eso los modelos de compensación no se pueden aplicar en todas partes, su implementación en el hardware para compensación en tiempo real sigue costando mucho y presenta problemas de compatibilidad (Ahmed & Amorim, 2025).

La calidad del conjunto de datos inicial es muy importante ya que, si las condiciones cambian respecto al entrenamiento, los resultados pueden tener errores críticos (Vishnu et al., 2020).

Necesitamos crear los modelos de error que funcionen en los diferentes tipos de máquinas usando la inteligencia artificial transferible. La intención es integrar los sensores cuánticos para medir con alta precisión y mejorar los algoritmos de suavizado de las trayectorias (Ahmed & Amorim, 2025).

Al final, se sugiere que se priorice la estandarización internacional de los submodelos de los Gemelos Digitales y de sus submodelos, así facilitar la colaboración global (Dietrich et al., 2023).

Los gemelos digitales son la base de la manufactura, la capacidad de convertir el error detectado en visualizaciones permite pasar de la reacción a la optimización (Ahmed & Amorim, 2025; Pan et al., 2020).

Fomentar la innovación colectiva y asegurar el cribado ético de datos ayuda a las regiones, ya que habilitan a mejorar de manera contundente su competitividad en el mercado global (Ahmed & Amorim, 2025; Dietrich et al., 2023).

Vacíos, tendencias y agenda futura

La transición del mecanizado CNC a los esquemas de la Industria 4.0 cambia el entorno de la industria de la aviación y del espacio en regiones como Querétaro y en Chihuahua. En esas regiones la manufactura de precisión es un punto clave para el desarrollo de la economía.

Desde esa visión la incorporación de los gemelos de datos (*digital twins*) no es solo una actualización de tecnología, sino un cambio de paradigma.

El cambio lleva del taller que solo responde al sistema que combina la cibernética y lo de la física, al sistema que predice, compensa y aprende todo el tiempo.

Los hallazgos muestran que la innovación ya no depende de mejorar una sola máquina-herramienta. La innovación depende de la integración por medio de los modelos de Producto, Proceso y Recurso (PPR).

En el trabajo profesional, el CAD/CAM, los sensores en tiempo real, los modelos cinemáticos y los algoritmos de aprendizaje automático se combinan. La persona que ha trabajado durante décadas ajustando los parámetros de corte, corrigiendo las desviaciones geométricas y compensando el desgaste de las herramientas con la experiencia práctica, encuentran en el gemelo digital una herramienta práctica para traducir formalmente la matemática del conocimiento tácito, traduciéndolo a datos y ecuaciones.

La predicción de la rugosidad de la superficie (R_a), el mapeo de errores de posición o rectitud con Funciones de Respuesta en Frecuencia (FRF) y la visualización de comparación entre escaneo 3D y modelo CAD permiten cerrar el ciclo de retroalimentación con detalle que antes no se podía lograr.

Los hallazgos aplican directamente la optimización de tolerancias de la industria de la aviación y el espacio aplicando la reducción de desperdicio y la validación de datos sin necesidad de pruebas físicas antes de la ejecución real.

En la competitividad regional, las implicaciones afectan la estrategia, Querétaro y Chihuahua han creado clústeres aeroespaciales con las cadenas de suministro conectadas, aun así, el factor que diferencia a los competidores ya no está solo en la capacidad instalada ni en la compra de los centros de maquinado multi ejes, entran en juego ahora, factores como la



compensación de errores con el software y la gestión de datos, estos pueden alargar la vida útil del equipo y pueden subir su desempeño a niveles de ultra precisión sin inversiones muy altas.

En un entorno donde los contratos aeroespaciales exigen trazabilidad total y cumplimiento estricto de la normativa, estos contratos necesitan la implementación de una única fuente de verdad y la interoperabilidad con los estándares como la *Asset Administration Shell* aumenta la confianza en la cadena de valor de la región, estos estándares habilitan que las regiones se conviertan en maquiladoras, a su vez, en los nodos de ingeniería que ofrecen la manufactura y la certificación a nivel global.

Además, la integración nube-borde da a las plantas regionales la agilidad que necesitan para enfrentar la volatilidad del mercado internacional, ajustar los modelos predictivos cuando aparecen nuevas aleaciones de materiales o herramientas, cuando cambian los diseños o cuando hay variaciones en lotes pequeños.

Esa capacidad es importante en un sector donde la producción es de bajo volumen y la complejidad es mucha.

Desde el piso de producción, los operarios ven que hay que pasar de hacer ajustes correctivos después del proceso a usar estrategias proactivas que se basan en simulación y en análisis de datos en tiempo real. Los operarios reducen los tiempos muertos y disminuyen los riesgos de colisión o de subcorte.

El análisis trata de la ética y del cribado de los datos es crucial en la manufactura aeroespacial, si el equipo entrena el modelo con datos que están incompletos o que están sesgados pueden generarse compensaciones equivocadas, lo que puede tener un valor alto económicamente o peor aún pueden ser altamente peligrosas.

El equipo valida técnicamente los datos que vienen de los sensores, usa de forma clara los protocolos como MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), cubriendo todos los parámetros que influyen en la calidad superficial. Las prácticas técnicas son también requisitos éticos para la competitividad regional, así pues, se debe establecer la gobernanza de datos y la cultura de validación en las Universidades, en los Centros de Investigación y en las Empresas del clúster.

Los aprendizajes pueden pasar a sectores como el automotriz, los dispositivos médicos y la energía. Los equipos replican la lógica de la innovación en grupo, la estandarización de los submodelos en formato de datos y el aprendizaje de la organización basado en el error en las industrias donde la precisión y la trazabilidad son requisitos.

En la figura 3 se ilustra el funcionamiento esperado de un gemelo digital, junto con sus elementos principales.

Figura 3

Integración de gemelos digitales en el ecosistema de producción



Nota. Elaboración de la ilustración mediante *Notebook LM*.

El principio es: convertir el error en conocimiento con estructura usando visualización y modelos de predicción, entonces por medio de los Gemelos Digitales, se mejora cada proceso y también unen los sistemas de cada región. Los Gemelos Digitales hacen que los sistemas de cada región compitan en los mercados del mundo con la inteligencia de fabricación y la colaboración de tecnología.

Conclusiones

La evolución del mecanizado CNC hacia los entornos ciberfísicos ha demostrado que los Gemelos Digitales son hoy el eje que conecta la manufactura. Los Gemelos Digitales aportan más que la simulación del proceso, integran los datos, los modelos de la física y los algoritmos de aprendizaje automático para transformar el error en una fuente de conocimiento, además convierten el error en una fuente de conocimiento, esta transición significa cambiar de una lógica



correctiva a una arquitectura predictiva, así los equipos usan variables tales como la compensación de errores geométricos, la predicción de rugosidad superficial y la validación virtual de trayectorias a manera de prácticas sistemáticas y ya no como ajustes empíricos aislados.

El enfoque Producto, Proceso y Recurso (PPR) consolida la innovación colectiva como un marco que integra la innovación. La manufactura basada en habilidades muestra que la competitividad ya no depende solo de lo confiable que sea la máquina-herramienta, ahora depende también, de la capacidad para organizar los servicios digitales para que trabajen juntos, entonces la incorporación de estándares como la *Asset Administration Shell* refuerza la interoperabilidad y sienta las bases para crear los ecosistemas industriales de colaboración, en este contexto, el operador y el planificador de procesos tienen un papel dentro del *human in the loop*, validando los modelos, a su vez, los robustecen con criterio y experiencia real.

Otro aporte importante es formalizar el aprendizaje de la organización a partir del error, la visualización mediante simulaciones en tiempo real, mapas de estabilidad y análisis de respuesta convierte desviaciones de forma y vibración en datos para mejorar continuamente. El enfoque reduce la incertidumbre cuando se trabaja con nuevas condiciones de mecanizado y ayuda a fortalecer paso a paso los modelos de predicción, así, el Gemelo Digital ya no es un espejo estático del proceso, más bien se vuelve un sistema que se adapta y cambia con cada iteración productiva.

El proceso de cribado y creación de bases de datos es una parte importante de esta arquitectura. La calidad, la representatividad y la trazabilidad de los datos hacen que el modelo sea confiable, entonces, depende mucho de los conjuntos de entrenamiento y muestra que un modelo predictivo es tan fuerte como la diversidad y la precisión de los datos que lo alimentan. Integrar los datos históricos con las mediciones en tiempo real y validar las señales de los sensores mejora la exactitud del algoritmo previene fallos operativos y reduce los riesgos físicos, además la ética en la gestión de los datos, sobre todo al consolidar una única fuente de verdad, es un requisito técnico y organizacional que no se puede evitar.

Existen limitaciones que guían la investigación futura, los modelos de compensación están especializados para configuraciones de máquina y la especialización limita la escalabilidad. Necesitamos modelos de error con inteligencia artificial que se pueda transferir, modelos que puedan adaptarse a topologías sin perder la precisión, entonces, reforzamos la integración de los



sensores de ultra precisión y desarrollamos algoritmos de suavizado de las trayectorias para reducir las excitaciones en los entornos de alta velocidad.

Otra línea estratégica está en la estandarización internacional de los submodelos de los Gemelos Digitales. Si no hay marcos normativos comunes y sólidos, la colaboración global y la interoperabilidad seguirán siendo parciales. Paralelamente a la convergencia entre la infraestructura de la nube y el borde de datos, los protocolos ligeros de comunicación demandan investigación en la ciberseguridad industrial, es necesario investigar la resiliencia de los datos para garantizar la continuidad operativa en los sistemas conectados.

El mensaje es claro: la transformación digital en la manufactura no es solo comprar tecnología, es gobernar el conocimiento, cuando la empresa compra equipos y tecnologías sin unirlos con una arquitectura de datos y sin validar con procesos éticos, crea sistemas frágiles y modelos poco confiables, entonces puede perderse la ventaja competitiva sostenible, la cual llega solo a las organizaciones que son capaces de integrar precisión técnica, interoperabilidad digital y aprendizaje continuo, esta situación solo puede ser posible cuando la tecnología, los datos y el criterio humano están en equilibrio, así se define el alcance de la manufactura inteligente.

Declaración de conflicto de intereses y financiación

El artículo *Desarrollo Gemelo Digital para diseño de componentes mecánicos manufacturados por CNC - Industria Aeroespacial Mexicana* no presenta conflictos de intereses con ningún patrocinador o agencia con interés en los resultados del proyecto.

Declaración sobre el uso de herramientas de inteligencia artificial

La creación de este manuscrito se apoya en herramientas de IA tales como, Research Rabbit, Zotero, Chat GPT y Notebook LM.

Referencias

- Afif, M. F. y Sarhan, A. A. D. (2025). *Computer-aided process planning, digital twin, and smart manufacturing: Interconnections and integration in CNC machining processes*. International Journal of Production Research, 63(24), 9593–9632.
<https://doi.org/10.1080/00207543.2025.2521717>



- Ahmed, Y. S. y Amorim, F. L. (2025). *Advances in computer numerical control geometric error compensation: Integrating AI and on-machine technologies for ultra-precision manufacturing*. Machines, 13(2), 140. <https://doi.org/10.3390/machines13020140>
- Anbalagan, A., Shivakrishna, B. y Srikanth, K. S. (2021). *A digital twin study for immediate design/redesign of impellers and blades: Part 1: CAD modelling and tool path simulation*. Materials Today: Proceedings, 46(17), 8209–8217. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.209>
- Bai, Z. (2025). *Enhancing mechanical design, manufacturing, and automation through AI-based computer numerical control (CNC) optimization*. Revista Gestão & Tecnologia, 25(2), 74–89. <https://doi.org/10.20397/2177-6652/2025.v25i2.3164>
- Barricelli, B. R., Casiraghi, E., & Fogli, D. (2019). *A survey on digital twin: Definitions, characteristics, applications, and design implications*. IEEE Access, 7, 167653–167671. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2953499>
- Cao, X., Zhao, G. y Xiao, W. (2020). *Digital twin-oriented real-time cutting simulation for intelligent computer numerical control machining*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 236(1–2), 5–15. <https://doi.org/10.1177/0954405420937869>
- Cao, Y. (2025). *Multisensor data fusion-driven digital twins in computer numerical control machining: A review*. Machines, 13(10), 921. <https://doi.org/10.3390/machines13100921>
- Daraba, D., Pop, F. y Daraba, C. (2024). *Digital twin used in real-time monitoring of operations performed on CNC technological equipment*. Applied Sciences, 14(22), 10088. <https://doi.org/10.3390/app142210088>
- Dietrich, D., Neubauer, M., Lechler, A. y Verl, A. (2023). *Automated manufacturing toolchain using skill-based digital twins*. Procedia CIRP, 128, 923–928. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.06.045>
- Dolli, V., Jally, S.V., Rawal, Y., Madhusudhana, H. K., Satish, G. J. y Lakkundi, A. R. (2024). *A review on tool condition monitoring in CNC turning process using digital twin technology*. AIP conference proceedings. <https://doi.org/10.1063/5.0291701>
- Dvorak, J., Cornelius, A., Corson, G., Zameroski, R., Jacobs, L., Penney, J. y Schmitz, T. (2022). *A machining digital twin for hybrid manufacturing*. Manufacturing Letters, 33, 786–793. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2022.07.097>
- Geng, R., Li, M., Hu, Z., Han, Z. y Zheng, R. (2022). *Digital twin in smart manufacturing: Remote control and virtual machining using VR and AR technologies*. Structural and Multidisciplinary Optimization, 65(11), Article 321. <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03426-3>



- Hamza, M. F. (2026). *Cloud, Edge, and Digital Twin Architectures for Condition Monitoring of Computer Numerical Control Machine Tools: A Systematic Review*. Information, 17, 153. <https://doi.org/10.3390/info17020153>
- Heo, E. y Yoo, N. (2021). *Numerical control machine optimization technologies through analysis of machining history data using digital twin*. Applied Sciences, 11(7), 3259. <https://doi.org/10.3390/app11073259>
- Jaensch, F., Csiszar, A., Scheifele, C. y Verl, A. (2018). *Digital twins of manufacturing systems as a base for machine learning*. In 2018 25th International Conference on Mechatronics and Machine Vision in Practice (M2VIP) (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/M2VIP.2018.8600844>
- Jarosz, K. y Ozel, T. (2021). *Machine learning approaches towards digital twin development for machining systems*. International Journal of Mechatronics and Manufacturing Systems, 15(2–3), 127–148. <https://doi.org/10.1504/IJMMS.2022.124922>
- Jones, D., Snider, C., Nassehi, A., Yon, J., & Hicks, B. (2020). *Characterising the Digital Twin: A systematic literature review*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 29, 36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>
- Li, B., Hou, B., Yu, W., Lu, X., & Yang, C. (2021). *Applications of artificial intelligence in intelligent manufacturing: a review*. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 18(1), 86–96. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601885>
- Lim, J.-M., Song, W., Lee, J.-S., Park, J.-M., Shin, H.-R., Oh, I., Hwang, S.-H., Jeong, S., Kang, S., Lee, C.-Y. y Min, B.-K. (2025). *Recent advances in CNC technology: Toward autonomous and sustainable manufacturing*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 26(9), 2311–2344. <https://doi.org/10.1007/s12541-025-01334-2>
- Negri, E., Fumagalli, L., & Macchi, M. (2017). *A review of the roles of Digital Twin in CPS-based production systems*. Procedia Manufacturing, 11, 939–948. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.198>
- Pan, L., Guo, X., Luan, Y. y Wang, H. (2020). *Design and realization of cutting simulation function of digital twin system of CNC machine tool*. Procedia Computer Science, 183, 261–266. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.02.057>
- Pantelidakis, M. y Mykoniatis, K. (2024). *Extending the digital twin ecosystem: A real-time digital twin of a LinuxCNC-controlled subtractive manufacturing machine*. Journal of Manufacturing Systems, 74, 1057–1066. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.05.012>
- Sa, G., Sun, J., Hou, M., Zhengyang, J., Liu, Z., Mao, H., Huang, K., He, L. y Tan, J. (2024). *A digital twin synchronous evolution method of CNC machine tools associated with dynamic*

- and static errors*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 134(5–6), 2753–2763. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14244-W>
- Silva, L. R. R., Pimenov, D. Y., Silva, R. B., Ercetin, A. y Giasin, K. (2025). *Review of applications of digital twins and Industry 4.0 for machining*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 9(7), 211. <https://doi.org/10.3390/jmmp9070211>
- Vishnu, V. S., Varghese, K. G. y Gurumoorthy, B. (2020). *A data-driven digital twin of CNC machining processes for predicting surface roughness*. Procedia CIRP, 104, 1065–1070. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.11.179>
- Wang, J., Ye, L., Gao, R.X., Li, C., & Zhang, L. (2019). *Digital Twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing*. International Journal of Production Research, 57, 3920–3934. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1552032>
- Ward, R., Sun, C., Dominguez-Caballero, J., Ojo, S., Ayvar-Soberanis, S., Curtis, D. y Ozturk, E. (2021). *Machining digital twin using real-time model-based simulations and lookahead function for closed loop machining control*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 117(11–12), 3615–3629. <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07867-W>
- Wei, Y., Hu, T., Zhou, T., Ye, Y. y Luo, W. (2020). *Consistency retention method for CNC machine tool digital twin model*. Journal of Manufacturing Systems, 58, 313–322. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.002>
- Wu, L., Leng, J. y Ju, B.-F. (2021). *Digital twins-based smart design and control of ultra-precision machining: A review*. Symmetry, 13(9), 1717. <https://doi.org/10.3390/sym13091717>
- Yang, X., Ran, Y., Zhang, G., Wang, H., Mu, Z., & Zhi, S. (2022). *A digital twin-driven hybrid approach for the prediction of performance degradation in transmission unit of CNC machine tool*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 73, 102230. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2021.102230>
- Yao, K.-C., Chen, D.-C., Pan, C.-H. y Lin, C.-L. (2024). *The development trends of computer numerical control (CNC) machine tool technology*. Mathematics, 12(13), 1923. <https://doi.org/10.3390/math12131923>
- Zhang, C., Zhou, G., Xu, Q., Wei, Z., Chong, H., y Wang, Z. (2022). *A digital twin defined autonomous milling process towards the online optimal control of milling deformation for thin-walled parts*. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 124(7–8), 2847–2861. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-10667-5>
- Zhao, G., Cao, X., Xiao, W., Zhu, Y. y Cheng, K. (2019). *Digital twin for NC machining using complete process information expressed by STEP-NC standard*. En Proceedings of the



4th International Conference on Automation, Control and Robotics Engineering (CACRE 2019) (pp. 1–6). ACM. <https://doi.org/10.1145/3351917.3351979>

Zhu, Z., Lin, Z., Huang, J., Li, Z. y He, B. (2023). A digital twin-based machining motion simulation and visualization monitoring system for milling robot. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127(9-10), 4387–4399. <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11827-X>

Zhu, Z., Xi, X., Xu, X., & Cai, Y. (2021). *Digital Twin-driven machining process for thin-walled part manufacturing*. *Journal of Manufacturing Systems*, 59, 453–466. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2021.03.015>



Gobernanza de datos y visualización crítica en ecosistemas de innovación dinámicos

Data governance and critical visualization in dynamic innovation ecosystems

Governança de dados e visualização crítica em ecossistemas de inovação dinâmicos

Miguel Ángel Guerra Guerra

Universidad IDESUM, México

Correo de correspondencia: 2020miguelguerra@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1640-4651>

Recibido: 04 de abril 2026

Aceptado: 29 de julio 2026

Publicado: 31 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.59722/synergia.v2i1.1275>

Resumen

Se analiza la relación entre ecosistemas de innovación, gobernanza de datos y visualización crítica para explicar por qué la innovación empresarial en contextos dinámicos suele fallar menos por falta de tecnología que por debilidades de coordinación, interpretación compartida y confianza entre actores. Se parte de una brecha específica: aunque la literatura sobre ecosistemas ha avanzado en el estudio de interdependencias, roles, plataformas y mecanismos de orquestación, con frecuencia trata los datos como un insumo técnico relativamente estable, sin problematizar suficientemente cómo su calidad, trazabilidad, selección y representación visual influyen en la asignación de recursos, la lectura de riesgos y el aprendizaje colectivo. A partir de una revisión argumentativa de aportes sobre ecosistemas, complejidad, aprendizaje organizacional, gobernanza de datos, ética y gestión del riesgo algorítmico, se propone la noción



de “sentido confiable” como capacidad ecosistémica. Esta capacidad implica construir acuerdos explícitos sobre definiciones, linaje, criterios de calidad, supuestos de análisis y formas de visualizar la incertidumbre. Se sostiene que, en regiones y cadenas de suministro reguladas, la competitividad no depende únicamente de incorporar más herramientas digitales, sino de generar evidencia compartida, verificable y auditada o evidencia susceptible de debate y auditoría entre organizaciones con intereses distintos. En consecuencia, se plantea que la gobernanza de datos debe entenderse como una arquitectura de coordinación y no solo como cumplimiento documental. También se argumenta que tableros, modelos y visualizaciones no son medios neutrales de comunicación, pues ordenan prioridades, legitiman decisiones y pueden amplificar sesgos cuando ocultan límites o supuestos. Se concluye que la ética de datos, la gobernanza interorganizacional y la alfabetización visual deben asumirse como infraestructura estratégica para coordinar innovación multiempresa.

Palabras clave: alfabetización visual, calidad y linaje de datos, coordinación entre actores, gestión del riesgo algorítmico, interdependencias tecnológicas, orquestación del ecosistema.

Abstract

The relationship between innovation ecosystems, data governance, and critical visualization is analyzed to explain why business innovation in dynamic contexts often fails less because of a lack of technology than because of weaknesses in coordination, shared interpretation, and trust among actors. The analysis begins from a specific gap: although the literature on ecosystems has advanced in the study of interdependencies, roles, platforms, and orchestration mechanisms, it often treats data as a relatively stable technical input, without sufficiently problematizing how its quality, traceability, selection, and visual representation influence resource allocation, risk interpretation, and collective learning. Based on an argumentative review of contributions on ecosystems, complexity, organizational learning, data governance, ethics, and algorithmic risk management, the notion of “reliable sensemaking” is proposed as an ecosystem capability. This capability involves building explicit agreements on definitions, lineage, quality criteria, analytical assumptions, and ways of visualizing uncertainty. It is argued that, in regulated regions and supply chains, competitiveness does not depend only on incorporating more digital tools, but on producing shared, contestable, and auditable evidence among organizations with different interests. Consequently, data governance is presented as a coordination architecture rather than merely as documentary compliance. It is also argued that dashboards, models, and visualizations are not neutral means of communication, since they organize priorities, legitimize decisions, and



may amplify biases when they hide limits or assumptions. It is concluded that data ethics, interorganizational governance, and visual literacy should be understood as strategic infrastructure for coordinating multi-firm innovation.

Keywords: algorithmic risk management, coordination among actors, data quality and lineage, ecosystem orchestration, technological interdependencies, visual literacy.

Resumo

Analisa-se a relação entre ecossistemas de inovação, governança de dados e visualização crítica para explicar por que a inovação empresarial em contextos dinâmicos costuma falhar menos por falta de tecnologia do que por fragilidades de coordenação, interpretação compartilhada e confiança entre os atores. Parte-se de uma lacuna específica: embora a literatura sobre ecossistemas tenha avançado no estudo de interdependências, papéis, plataformas e mecanismos de orquestração, frequentemente trata os dados como um insumo técnico relativamente estável, sem problematizar suficientemente como sua qualidade, rastreabilidade, seleção e representação visual influenciam a alocação de recursos, a leitura de riscos e a aprendizagem coletiva. A partir de uma revisão argumentativa de contribuições sobre ecossistemas, complexidade, aprendizagem organizacional, governança de dados, ética e gestão do risco algorítmico, propõe-se a noção de “sentido confiável” como capacidade ecossistêmica. Essa capacidade implica construir acordos explícitos sobre definições, linhagem, critérios de qualidade, pressupostos de análise e formas de visualizar a incerteza. Sustenta-se que, em regiões e cadeias de suprimento reguladas, a competitividade não depende apenas da incorporação de mais ferramentas digitais, mas da produção de evidências compartilhadas, debatíveis e auditáveis entre organizações com interesses distintos. Em consequência, a governança de dados é apresentada como uma arquitetura de coordenação, e não apenas como conformidade documental. Argumenta-se também que painéis, modelos e visualizações não são meios neutros de comunicação, pois organizam prioridades, legitimam decisões e podem ampliar vieses quando ocultam limites ou pressupostos. Conclui-se que, a ética de dados, a governança interorganizacional e a alfabetização visual devem ser assumidas como infraestrutura estratégica para coordenar a inovação multiempresarial.

Palavras-chave: alfabetização visual, coordenação entre atores, gestão do risco algorítmico, interdependências tecnológicas, orquestração do ecossistema, qualidade e linhagem de dados.



Introducción

En los ecosistemas de innovación, el reto ya no consiste solamente en reunir universidades, empresas, proveedores, startups y organismos públicos alrededor de una agenda común. El problema central aparece cuando esos actores deben decidir con base en información producida por sistemas, reglas e intereses distintos. En sectores con alta interdependencia tecnológica y regulatoria, la innovación deja de ser un esfuerzo aislado dentro de una organización y se convierte en un proceso de coordinación entre complementos, estándares, plataformas y capacidades distribuidas (Adner, 2017; Jacobides et al., 2018).

Esta condición ayuda a explicar una paradoja frecuente: algunas regiones cuentan con talento, infraestructura, grandes empresas y proveedores especializados, pero aun así permanecen atrapadas en mejoras incrementales; otras, con menos recursos visibles, logran articular soluciones nuevas con mayor rapidez. La diferencia no depende únicamente de la cantidad de actores disponibles, sino de la calidad de las conexiones, reglas y decisiones que los vinculan. Al entender los ecosistemas como sistemas adaptativos complejos, se reconoce que pequeñas fallas de coordinación pueden escalar y afectar el desempeño regional, mientras que acuerdos simples, pero compartidos, pueden acelerar el aprendizaje colectivo (Holland, 1992; Porter, 1998; Stam, 2015).

Desde esta perspectiva, se identifica una brecha específica en la literatura. Los estudios sobre ecosistemas han avanzado en la descripción de roles, complementariedades y mecanismos de orquestación; sin embargo, integran de manera limitada la gobernanza de datos, la ética y la visualización crítica como condiciones necesarias para coordinar decisiones entre organizaciones. En ecosistemas dinámicos, los datos se convierten en infraestructura de coordinación cuando permiten comparar, priorizar, anticipar riesgos y justificar decisiones. Pero también pueden convertirse en una fuente de distorsión cuando sus definiciones, linaje, criterios de calidad o formas de representación visual no son compartidos por los actores que los utilizan (Khatri y Brown, 2010; Nambisan et al., 2019).

La tesis que sostiene este manuscrito es que la innovación empresarial en ecosistemas dinámicos requiere desarrollar una capacidad ecosistémica de “construcción compartida de sentido confiable”. Esta capacidad se entiende como la posibilidad de producir evidencia compartida, debatible y auditable mediante acuerdos explícitos sobre datos, riesgo y visualización. Para desarrollar esta postura, se toma como referente la competitividad de corredores de manufactura avanzada y aeroespacial en Norteamérica, donde la coordinación



multiempresa, el cumplimiento regulatorio y la digitalización de la cadena de suministro convierten la gestión de datos en un factor estratégico. En este contexto, gobernar datos no significa solo administrar información, sino construir las condiciones mínimas para que distintas organizaciones puedan interpretar problemas, aprender y decidir con confianza.

Innovación como proceso colectivo y arquitectura de interdependencias

La innovación abierta y el modelo de triple hélice permiten comprender por qué las organizaciones ya no innovan únicamente desde sus propios límites. Cuando la complejidad tecnológica aumenta y los mercados cambian con rapidez, las capacidades internas resultan insuficientes para sostener por sí solas nuevos productos, servicios o modelos de negocio (Chesbrough, 2003; Etzkowitz y Leydesdorff, 2000). La literatura de ecosistemas amplía esta discusión al mostrar que el desempeño innovador depende de la alineación entre actores complementarios, actividades interdependientes y condiciones de adopción. Desde esta perspectiva, el ecosistema no se reduce a una red de colaboración, sino que funciona como una estructura de dependencias donde pueden aparecer cuellos de botella, riesgos de co-innovación y fallas de adopción (Adner, 2017; Adner y Kapoor, 2010).

Esta lectura corrige una idea todavía frecuente en la gestión empresarial: asumir que innovar consiste principalmente en financiar investigación, comprar tecnología o administrar proyectos internos. En un ecosistema, esos elementos importan, pero no bastan. La dificultad central consiste en coordinar tiempos, expectativas, incentivos y criterios de éxito entre actores que no necesariamente comparten las mismas prioridades.

Por ello, la competencia y la cooperación conviven de manera permanente, y algunos actores adquieren un papel estabilizador al definir reglas, estándares o plataformas que permiten ordenar la participación de los demás (Lansiti y Levien, 2004; Moore, 1993).

En la práctica, esa coordinación se expresa mediante interfaces de programación, estándares técnicos, plataformas digitales, métricas compartidas, auditorías, certificaciones y programas de desarrollo de proveedores. Sin embargo, estos mecanismos no son neutrales. Al definir qué se mide, quién valida la información y qué evidencia se considera suficiente, también distribuyen poder e influyen en la dirección de la innovación.

Por ello, la estrategia de ecosistema no solo implica decidir con quién colaborar, sino bajo qué reglas se produce, interpreta y utiliza la evidencia colectiva (Jacobides et al., 2018). En los ecosistemas digitales, esta tensión se vuelve más visible porque las reglas de plataforma y la arquitectura de datos condicionan simultáneamente la colaboración, la competencia y la captura



de valor (Gawer y Cusumano, 2014; Jacobides et al., 2019; Jacobides et al., 2024; Parker et al., 2016).

Ecosistemas dinámicos, complejidad y competitividad regional

Cuando un ecosistema se entiende como sistema adaptativo complejo, el desempeño regional deja de explicarse como la suma de capacidades individuales. Lo relevante es la forma en que esas capacidades interactúa, se retroalimentan y se ajustan frente a cambios tecnológicos, regulatorios o de mercado.

En este tipo de sistemas, pequeñas fallas de coordinación pueden escalar y producir retrasos, duplicidad de esfuerzos o decisiones contradictorias; del mismo modo, acuerdos relativamente simples sobre estándar, información y responsabilidades pueden multiplicar la velocidad de aprendizaje colectivo (Holland, 1992).

Esta lógica permite matizar la discusión sobre clústeres y ecosistemas emprendedores. La concentración de empresas, proveedores, talento e instituciones puede elevar la productividad y favorecer la innovación, pero solo cuando existen mecanismos que reducen los costos de coordinación y permiten convertir la proximidad en aprendizaje efectivo (Porter, 1998). De lo contrario, una región puede tener actores relevantes y aun así carecer de una dinámica innovadora robusta.

Las políticas públicas también enfrentan ese riesgo cuando se limitan a reunir “ingredientes” del ecosistema sin identificar relaciones causales, cuellos de botella y capacidades de adaptación (Isenberg, 2011; Stam, 2015). Por ello, la resiliencia ecosistémica depende tanto de los recursos disponibles como de la calidad de las interacciones entre emprendedores, empresas, instituciones y mercados (Roundy et al., 2017).

La digitalización intensifica esta dinámica porque acelera la circulación de información, pero también aumenta la dependencia de plataformas, modelos y datos. Las capacidades digitales reducen ciertas fricciones de coordinación, aunque al mismo tiempo pueden amplificar errores cuando los actores interpretan la información con definiciones distintas o cuando los modelos ocultan supuestos relevantes. Por esta razón, la infraestructura digital no debe entenderse solo como soporte tecnológico, sino como una arquitectura de interdependencia que puede fortalecer o debilitar la competitividad regional (Autio et al., 2018; Nambisan et al., 2019).



Ética y cribado de fuentes en la construcción de los datos

Si los datos funcionan como infraestructura de coordinación, entonces su construcción debe tratarse como una decisión institucional y no solo como una actividad técnica.

La gobernanza de datos define quién puede acceder, modificar, validar, estandarizar y resolver disputas sobre la información disponible (Khatri y Brown, 2010). Sin estos acuerdos, los actores de un ecosistema pueden operar con verdades locales incompatibles: cada organización mide con criterios propios, interpreta los resultados desde sus incentivos y toma decisiones con evidencia que no necesariamente es comparable. Además, la calidad de los datos no se limita a la exactitud; incluye completitud, consistencia, oportunidad y relevancia para quienes los utilizan (Wang y Strong, 1996).

El problema ético aparece porque los datos no son una materia prima neutral. Se producen dentro de procesos históricos, reglas organizacionales, sistemas de captura y relaciones de poder. Por ello, pueden reproducir sesgos, aunque no exista intención explícita de discriminar (D'Ignazio y Klein, 2020; O'Neil, 2016). Los sistemas basados en macrodatos pueden generar efectos desiguales cuando utilizan variables sustitutas, correlaciones débiles o criterios de decisión difíciles de auditar (Barocas y Selbst, 2016).

Esto es relevante para ecosistemas empresariales donde la inteligencia artificial comienza a influir en decisiones de contratación, asignación de recursos, gestión de proveedores, mantenimiento predictivo o control de calidad (Selbst et al., 2019). En esos casos, la autoridad aparente de los datos puede cerrar debates que en realidad debería permanecer abiertos a revisión (Boyd y Crawford, 2012).

Frente a ese riesgo, los marcos normativos y estándar recientes ofrecen un lenguaje común para ordenar responsabilidades entre actores. El NIST AI RMF 1.0 propone funciones para gestionar riesgos de IA durante el ciclo de vida de los sistemas, con énfasis en gobernanza, confiabilidad y responsabilidad (*National Institute of Standards and Technology* [NIST], 2023). ISO/IEC 42001 establece requisitos para sistemas de gestión de IA, mientras que ISO/IEC 23894 ofrece orientación específica sobre gestión de riesgos en inteligencia artificial (*International Organization for Standardization* [ISO], 2023a, 2023b).

A nivel regulatorio, el Reglamento (UE) 2024/1689 introduce obligaciones diferenciadas según el nivel de riesgo y refuerza la importancia de documentación, transparencia y control humano (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2024).



Desde una perspectiva de ética de datos, cumplir con normas no es suficiente. También se requiere justificar cómo se recolectan, transforman, seleccionan y usan los datos, considerando daños previsibles, derechos, justicia y consecuencias organizacionales (Floridi y Taddeo, 2016).

Esto exige una cadena de custodia de la evidencia: identificar fuentes, criterios de selección, transformaciones, supuestos, responsables y límites de interpretación.

Esta cadena no busca burocratizar la innovación, sino permitir que distintos actores puedan auditar, debatir y corregir la evidencia sin romper la colaboración.

Visualización crítica: del error al aprendizaje

En los ecosistemas dinámicos, buena parte de la coordinación ocurre mediante recursos visuales: tableros de información, mapas de riesgo, reportes de desempeño, simulaciones y narrativas de resultados. Estas visualizaciones no solo comunican información; ordenan prioridades, resaltan ciertos problemas y dejan otros en segundo plano. Por ello, una gráfica técnicamente correcta puede inducir decisiones equivocadas si usa escalas engañosas, combina métrica no comparables, omite incertidumbre o presenta correlaciones como si fueran relaciones causales (Cairo, 2019).

La visualización implica decisiones de abstracción y diseño que deben alinearse con la tarea, los datos y la percepción de quienes tomarán decisiones (Munzner, 2014). En la misma línea, la integridad de la representación visual resulta indispensable para evitar que la forma de presentar la información distorsione su interpretación (Tufte, 2001).

El riesgo no se limita a producir una mala gráfica. El riesgo mayor consiste en generar una mala dinámica de decisión. Cuando un tablero simplifica demasiado el desempeño de un ecosistema, los actores pueden optimizar métricas locales y deteriorar el valor sistémico. Por ejemplo, una organización puede mejorar su indicador interno de entrega, costo o calidad, mientras transfiere retrasos, riesgos o incertidumbre a otro actor de la red.

En este punto, la visualización crítica se conecta con el aprendizaje organizacional: para que el error genere aprendizaje y no solo defensa, los actores necesitan condiciones de seguridad psicológica, capacidad de cuestionar supuestos y disposición para reconocer fallas controladas como fuente de información (Argyris y Schön, 1978; Edmondson, 1999; Sitkin, 1992).

Por tanto, la visualización crítica debe diseñarse para abrir conversaciones y no para cerrarlas prematuramente. Esto implica mostrar incertidumbre, documentar supuestos, distinguir



entre correlación y causalidad, y revisar periódicamente los tableros de información que se usan para asignar recursos entre socios.

En un ecosistema, los errores rara vez permanecen dentro de una sola firma; se propagan mediante decisiones de compra, diseño, calidad, producción, logística o inversión.

Convertir el error en aprendizaje requiere que la visualización permita discutir causas, límites y relaciones de costo-beneficio, en lugar de imponer una autoridad visual que oculte los desacuerdos relevantes.

Como se resume en la tabla 1, los principales mecanismos de coordinación del ecosistema concentran riesgos relacionados con datos, inteligencia artificial y visualización, así como mitigaciones orientadas a fortalecer la gobernanza, la trazabilidad y el aprendizaje colectivo. La figura 1 sintetiza la relación entre autores, conceptos y mecanismos de coordinación.

Tabla 1

Mecanismos de coordinación y riesgos asociados a datos, IA y visualización en ecosistemas dinámicos

Mecanismo de coordinación	Riesgo típico (datos/IA)	Sesgo/ruido por visualización	Mitigación propuesta
APIs / intercambio de datos entre socios	Datos incompletos, definiciones distintas, fallas de trazabilidad	Tableros de información que mezclan métricas no comparables y generan falsas tendencias	Diccionario de datos compartido, linaje, validaciones y SLAs; gobernanza (Khatri y Brown, 2010; Wang y Strong, 1996).
Plataformas y estándares comunes	Dependencia excesiva del orquestador, asimetrías de poder	Indicadores diseñados para “contar la historia” del líder, no del sistema	Reglas de transparencia, auditorías y diseño de <i>KPIs</i> multi-actor (Adner, 2017; Jacobides et al., 2018; Gawer y Cusumano, 2014).
IA para pronóstico / detección de anomalías	Sesgos por datos históricos, <i>drift</i> y sobre confianza	Visualizaciones que ocultan incertidumbre y márgenes de error	Gestión de riesgos con NIST AI RMF y pruebas de robustez; mostrar intervalos y supuestos (NIST, 2023; Barocas y Selbst, 2016).



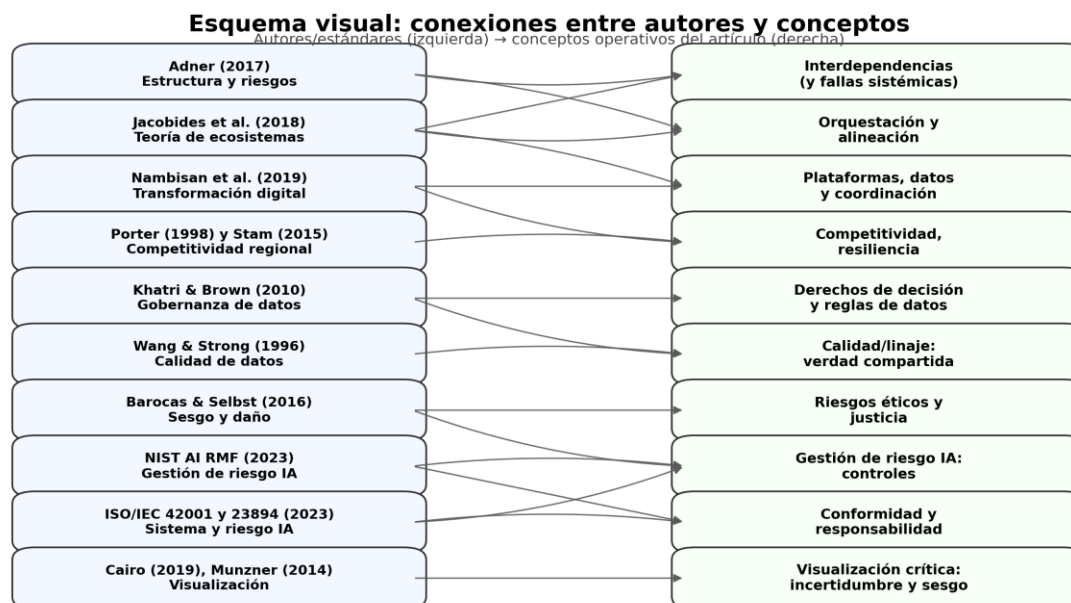
Mecanismo de coordinación	Riesgo típico (datos/IA)	Sesgo/ruido por visualización	Mitigación propuesta
Gemelos digitales / simulación ecosistémica	Modelos mal calibrados, supuestos invisibles	Gráficas persuasivas que aparentan causalidad	Revisión de supuestos, trazabilidad de modelos y documentación; cultura de “pequeñas pérdidas” para aprender (Sitkin, 1992; Cairo, 2019).

Nota. La tabla resume mecanismos de coordinación y sugiere mitigaciones asociadas a gobernanza de datos, gestión de riesgos y diseño de visualizaciones.

Como transición entre la fundamentación teórica y la aplicación del argumento, se presentan dos esquemas visuales, la figura 2 organiza el mapa conceptual de la innovación empresarial en ecosistemas dinámicos.

Figura 1

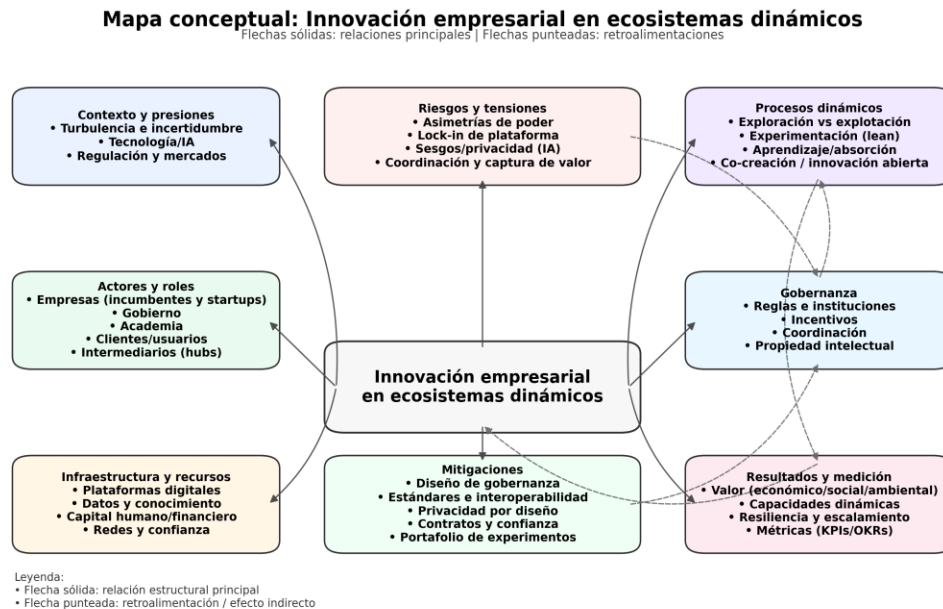
Conexiones entre autores y conceptos clave del artículo



Nota. El esquema enlaza fuentes teóricas y normativas con los conceptos operativos utilizados en el artículo.

Figura 2

Mapa conceptual de innovación empresarial en ecosistemas dinámicos



Nota. Flechas sólidas representan relaciones estructurales principales; flechas punteadas indican retroalimentaciones (dinámica adaptativa) entre procesos, gobernanza y resultados.

Discusión

En corredores de manufactura avanzada y aeroespacial, la coordinación ecosistémica no ocurre en abstracto; se expresa en programas de desarrollo de proveedores, certificaciones, auditorías, transferencia de información técnica, gestión de cambios, control de calidad, mantenimiento predictivo y decisiones de inversión en capacidades productivas. En estos contextos, una falla en la definición de una métrica, en el linaje de un dato o en la interpretación de un tablero puede afectar no solo a una empresa, sino a varias organizaciones conectadas por requisitos técnicos, tiempos de entrega y obligaciones regulatorias. Por ello, la propuesta de “sentido confiable” adquiere una utilidad práctica: toda decisión multiempresa basada en datos debe acompañarse de acuerdos explícitos sobre definiciones, trazabilidad, criterios de calidad, supuestos de análisis y formas de representar la incertidumbre.

La implicación principal es que la digitalización, por sí sola, no garantiza competitividad regional. Una región puede invertir en plataformas, sensores, modelos predictivos o sistemas de



inteligencia artificial y aun así tomar decisiones frágiles si los actores no comparten el mismo significado de los datos.

En una cadena regulada, conceptos como defecto, desviación, riesgo, causa raíz, evidencia objetiva, alerta predictiva o cumplimiento no pueden interpretarse de manera aislada por cada organización. Si cada actor mide distinto, visualiza distinto y decide distinto, la tecnología acelera la circulación de información, pero no necesariamente mejora la coordinación.

En términos de implementación, se sugieren tres capas complementarias. La primera es la gestión de las interdependencias: mapear actividades críticas, identificar dependencias entre actores, definir derechos de decisión y establecer incentivos que favorezcan la alineación, siguiendo la lógica estructural del ecosistema (Adner, 2017). La segunda es un sistema de gestión de IA y riesgo: adoptar prácticas compatibles con NIST AI RMF e ISO/IEC 42001 para armonizar controles, documentación, responsabilidad y revisión de modelos entre socios (NIST, 2023; ISO, 2023a). La tercera es un marco de visualización crítica: revisar periódicamente los tableros de información, exigir que las gráficas relevantes incluyan supuestos y márgenes de incertidumbre, y formar a los líderes en alfabetización visual para evitar decisiones basadas en aparente certeza.

Estas capas también pueden reforzarse mediante políticas de infraestructura y demanda. La compra pública de innovación, por ejemplo, puede exigir estándares de trazabilidad, transparencia y gestión responsable de datos como condición de participación, dinamizando el ecosistema sin imponer una solución tecnológica única (Banco Interamericano de Desarrollo [BID], 2024; Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2021).

Del mismo modo, los organismos internacionales han señalado que los ecosistemas de IA e innovación requieren colaboración multiactor y gobernanza responsable para escalar su impacto (World Economic Forum [WEF], 2024, 2025). La política pública, por tanto, no debería limitarse a financiar tecnología, sino crear condiciones para que la evidencia producida por distintos actores sea comparable, auditable y útil para la toma de decisiones colectivas.

Los aprendizajes son transferibles a otros sectores intensivos en datos, como salud, energía o ciudades inteligentes. La diferencia está en el tipo de daño que puede producir una mala coordinación: en manufactura puede traducirse en costos, incumplimientos, desperdicio o riesgos de seguridad; en salud, en inequidad clínica o errores de priorización; en ciudades, en vigilancia, exclusión o decisiones públicas poco transparentes. En todos los casos, el punto crítico es el mismo: cuando los datos cruzan instituciones, el riesgo también se vuelve sistémico.



Por ello, la confianza no debe entenderse como una condición previa del ecosistema, sino como un resultado que se construye mediante datos bien gobernados, visualizaciones honestas y mecanismos de revisión compartida.

Conclusiones

El aporte central de este ensayo consiste en reposicionar la ética de datos y la visualización crítica como capacidades estratégicas para la innovación en ecosistemas dinámicos (Teece, 2007). La literatura sobre ecosistemas ha explicado la importancia de alinear complementariedades, roles y mecanismos de orquestación; sin embargo, con frecuencia presupone que la evidencia circula entre actores sin fricciones relevantes. Este ensayo sostiene lo contrario: en ecosistemas donde varias organizaciones dependen de información compartida, la fricción principal no es solo técnica, sino interpretativa. La pregunta decisiva no es únicamente que datos existen, sino qué datos se reconocen como evidencia válida, quién define sus criterios de calidad y cómo se representan visualmente para tomar decisiones.

El proceso de cribado y construcción de los datos deja una lección crítica: los datos no llegan “puros” al proceso de decisión. Se producen mediante elecciones sobre que medir, con que instrumentos, bajo que definiciones, con que incentivos y para que propósito. Por ello, reducir la gobernanza de datos a cumplimiento documental resulta insuficiente. En ecosistemas dinámicos, la gobernanza de los datos implica gestionar la coordinación, la confianza, las relaciones de poder y el aprendizaje colectivo. Del mismo modo, las visualizaciones no deben entenderse como recursos secundarios de comunicación, sino como recursos que pueden favorecer o limitar el debate, revelar incertidumbre o esconderla, y facilitar el aprendizaje colectivo o reforzar sesgos de sobre confianza.

Como líneas futuras de investigación, se proponen tres rutas. Primero, desarrollar y validar un modelo de madurez de gobernanza de datos a nivel ecosistema, no solo organizacional, y relacionarlo con indicadores de innovación, resiliencia y desempeño regional. Segundo, estudiar cómo los estándares de inteligencia artificial, como NIST AI RMF e ISO/IEC 42001, se traducen en acuerdos contractuales, rutinas operativas y responsabilidades compartidas entre organizaciones. Tercero, analizar de manera empírica cómo prácticas de visualización crítica, mostrar incertidumbre, documentar supuestos y auditar tableros de información, modifican la dinámica de aprendizaje y reducen decisiones basadas en falsa certeza. En síntesis, la ventaja competitiva regional en la era digital dependerá menos de



declarar que se usa inteligencia artificial y más de construir evidencia confiable, debatible y compartida.

Declaración de conflicto de intereses y financiación

No existe compromiso, entrega de este documento a otra instancia o conflicto de intereses. Tampoco existe financiación.

Declaración sobre el uso de herramientas (incl. IA) (si aplica)

Las herramientas utilizadas DeepL en Word de Microsoft, Consensus, Mendeley, Editor en Word. Propósito de las herramientas: traductores automáticos, búsqueda de información y almacenamiento, editor de gramática en Word y NotebookLM para discutir con las fuentes.

Referencias

- Adner, R. (2017). Ecosystem as structure: An actionable construct for strategy. *Journal of Management*, 43(1), 39–58. <https://doi.org/10.1177/0149206316678451>
- Adner, R., y Kapoor, R. (2010). Value creation in innovation ecosystems: How the structure of technological interdependence affects firm performance in new technology generations. *Strategic Management Journal*, 31(3), 306–333. <https://doi.org/10.1002/smj.821>
- Argyris, C., y Schön, D. A. (1978). *Organizational learning: A theory of action perspective*. Addison-Wesley.
- Autio, E., Nambisan, S., Thomas, L. D. W., y Wright, M. (2018). Digital affordances, spatial affordances, and the genesis of entrepreneurial ecosystems. *Strategic Entrepreneurship Journal*, 12(1), 72–95. <https://doi.org/10.1002/sej.1266>
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2024, 16 de septiembre). Dinamizando los ecosistemas de innovación en América Latina mediante la compra pública de innovación (Proyecto RG-T4547). <https://www.iadb.org/es/proyecto/RG-T4547>
- Barocas, S., y Selbst, A. D. (2016). Big data's disparate impact. *California Law Review*, 104(3), 671–732.
- boyd, d., y Crawford, K. (2012). Critical questions for big data. *Information, Communication and Society*, 15(5), 662–679. <https://doi.org/10.1080/1369118X.2012.678878>



- Cairo, A. (2019). *How charts lie: Getting smarter about visual information*. W. W. Norton & Company.
- Chesbrough, H. W. (2003). *Open innovation: The new imperative for creating and profiting from technology*. Harvard Business School Press.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2021, 5 de abril). Datos y hechos sobre la transformación digital: Informe sobre los principales indicadores de adopción de tecnologías digitales en el marco de la Agenda Digital para América Latina y el Caribe (LC/TS.2021/20). <https://www.cepal.org/es/publicaciones/46766-datos-hechos-la-transformacion-digital-informe-principales-indicadores-adopcion>
- D'Ignazio, C., y Klein, L. F. (2020). *Data feminism*. MIT Press.
- Edmondson, A. C. (1999). Psychological safety and learning behavior in work teams. *Administrative Science Quarterly*, 44(2), 350–383. <https://doi.org/10.2307/2666999>
- Etzkowitz, H., y Leydesdorff, L. (2000). The dynamics of innovation: From national systems and “Mode 2” to a triple helix of university–industry–government relations. *Research Policy*, 29(2), 109–123. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(99\)00055-4](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(99)00055-4)
- Floridi, L., y Taddeo, M. (2016). What is data ethics? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 374(2083), 20160360. <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0360>
- Gawer, A., y Cusumano, M. A. (2014). Industry platforms and ecosystem innovation. *Journal of Product Innovation Management*, 31(3), 417–433. <https://doi.org/10.1111/jpim.12105>
- Holland, J. H. (1992). Complex adaptive systems. *Daedalus*, 121(1), 17–30.
- Iansiti, M., y Levien, R. (2004). *The keystone advantage: What the new dynamics of business ecosystems mean for strategy, innovation, and sustainability*. Harvard Business School Press.
- International Organization for Standardization. (2023a). *ISO/IEC 42001:2023 Artificial intelligence management system (Standard)*.
- International Organization for Standardization. (2023b). *ISO/IEC 23894:2023 Artificial intelligence: Guidance on risk management (Standard)*.
- Isenberg, D. J. (2011). *The entrepreneurship ecosystem strategy as a new paradigm for economic policy: Principles for cultivating entrepreneurship*. Institute of International and European Affairs.
- Jacobides, M. G., Cennamo, C., y Gawer, A. (2018). Towards a theory of ecosystems. *Strategic Management Journal*, 39(8), 2255–2276. <https://doi.org/10.1002/smj.2904>



- Jacobides, M. G., Sundararajan, A., y Van Alstyne, M. (2019, 25 de marzo). Platforms and ecosystems: Enabling the digital economy (Briefing paper). World Economic Forum. <https://www.weforum.org/publications/platforms-and-ecosystems-enabling-the-digital-economy/>
- Jacobides, M. G., Li, X., y Tae, C. J. (2024). Externalities and complementarities in platforms and ecosystems. *Research Policy*, 53(3), 104944. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2023.104944>
- Khatri, V., y Brown, C. V. (2010). Designing data governance. *Communications of the ACM*, 53(1), 148–152. <https://doi.org/10.1145/1629175.1629210>
- Moore, J. F. (1993). Predators and prey: A new ecology of competition. *Harvard Business Review*, 71(3), 75–86.
- Munzner, T. (2014). *Visualization analysis and design*. CRC Press.
- Nambisan, S., Wright, M., y Feldman, M. (2019). The digital transformation of innovation and entrepreneurship: Progress, challenges and key themes. *Research Policy*, 48(8), 103773. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2019.03.018>
- National Institute of Standards and Technology. (2023). Artificial intelligence risk management framework (AI RMF 1.0) (NIST AI 100-1). <https://doi.org/10.6028/NIST.AI.100-1>
- OECD. (2019). Recommendation of the Council on Artificial Intelligence (OECD/LEGAL/0449). Recuperado el 3 de marzo de 2026, de <https://legalinstruments.oecd.org/en/instruments/OECD-LEGAL-0449>
- O'Neil, C. (2016). *Weapons of math destruction: How big data increases inequality and threatens democracy*. Crown.
- Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea. (2024). Reglamento (UE) 2024/1689 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 13 de junio de 2024, por el que se establecen normas armonizadas en materia de inteligencia artificial (Artificial Intelligence Act). *Diario Oficial de la Unión Europea*. <https://eurlex.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj?locale=es>
- Parker, G. G., Van Alstyne, M. W., y Choudary, S. P. (2016). *Platform revolution: How networked markets are transforming the economy and how to make them work for you*. W. W. Norton & Company.
- Porter, M. E. (1998). Clusters and the new economics of competition. *Harvard Business Review*, 76(6), 77–90.



- Roundy, P. T., Brockman, B. K., y Bradshaw, M. (2017). The resilience of entrepreneurial ecosystems. *Journal of Business Venturing Insights*, 8, 99–104. <https://doi.org/10.1016/j.jbvi.2017.08.002>
- Selbst, A. D., Boyd, D., Friedler, S. A., Venkatasubramanian, S., y Vertesi, J. (2019). Fairness and abstraction in sociotechnical systems. In *Proceedings of the Conference on Fairness, Accountability, and Transparency* (pp. 59–68). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3287560.3287598>
- Sitkin, S. B. (1992). Learning through failure: The strategy of small losses. *Research in Organizational Behavior*, 14, 231–266.
- Stam, E. (2015). Entrepreneurial ecosystems and regional policy: A sympathetic critique. *European Planning Studies*, 23(9), 1759–1769. <https://doi.org/10.1080/09654313.2015.1061484>
- Teece, D. J. (2007). Explicating dynamic capabilities: The nature and micro foundations of (sustainable) enterprise performance. *Strategic Management Journal*, 28(13), 1319–1350. <https://doi.org/10.1002/smj.640>
- Tufte, E. R. (2001). *The visual display of quantitative information* (2nd ed.). Graphics Press.
- Wang, R. Y., y Strong, D. M. (1996). Beyond accuracy: What data quality means to data consumers. *Journal of Management Information Systems*, 12(4), 5–33.
- World Economic Forum. (2024, 23 de September). AI for Impact: Strengthening AI ecosystems for social innovation. <https://www.weforum.org/publications/ai-for-impact-strengthening-ai-ecosystems-for-social-innovation/>
- World Economic Forum. (2025, 21 de October). Innovation ecosystems: A toolkit of principles and best practice. <https://www.weforum.org/publications/innovation-ecosystems-a-toolkit-of-principles-and-best-practice/>



Engagement laboral y calidad en atención al cliente como motor económico en empresas panameñas

Employee engagement and quality in customer service as an economic driver in Panamanian companies

Engajamento no trabalho e qualidade no atendimento ao cliente como motor econômico em empresas panamenhas

Ana Marí Solano Lázaró

Universidad Autónoma de Chiriquí, Panamá

Correo de correspondencia ana.solano@unachi.ac.pa

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-3585-5698>

Recibido: 08 de junio de 2026

Aceptado: 29 de julio de 2026

Publicado: 31 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.59722/synergia.v2i1.1283>

Resumen

Actualmente en el mercado hay una alta oferta de servicios y productos, hecho que pone a las empresas no solo a captar clientes ofreciendo siempre un valor añadido que lo destaque de su competencia, sino también ver qué estrategias aplican para fidelizar a sus clientes y garantizar la sostenibilidad. Las empresas después de la pandemia del COVID tratan de optimizar al máximo sus recursos y reducir sus costos operacionales con el fin de tener mejores resultados, sin embargo, muchas veces pueden pasar por alto el *engagement* laboral o compromiso laboral de los colaboradores y el impacto negativo que puede llegar a tener la baja fidelización de estos en la calidad del servicio convirtiendo esto en un problema organizacional. En Panamá existe un vacío de información en la literatura que impide contextualizar adecuadamente el impacto del *engagement* laboral en la atención al cliente. El objetivo de este manuscrito es realizar una revisión bibliográfica correspondiente a la siguiente pregunta ¿Cómo se relaciona el *engagement* laboral con la calidad de atención al



cliente? El método de búsqueda utilizado para este trabajo fue el uso de palabras claves seleccionadas del tesoro de la UNESCO, aplicando distintas configuraciones de búsquedas booleanas empleadas y así delimitar los resultados en las bases de datos más sólidas para las ciencias administrativas como los son Dialnet, SciELO, entre otras. El estudio concluye que el *engagement* laboral deja de ser una variable únicamente psicológica para convertirse en un activo económico estratégico. La calidad del servicio puede llegar a ser ese motor económico, que le permitan a la empresa la sostenibilidad en el tiempo asegurando la lealtad del cliente y maximizando la rentabilidad en mercados del sector de servicios que son altamente competitivos.

Palabras clave: calidad de la atención al cliente, cultura de trabajo, *engagement* laboral, productividad laboral, sostenibilidad económica.

Abstract

Currently, the market presents a high supply of services and products, which challenges companies not only to attract customers by consistently offering added value that differentiates them from their competitors, but also to identify strategies to foster customer loyalty and ensure sustainability. In the post-COVID-19 pandemic context, companies seek to optimize their resources to the fullest extent and reduce operational costs in order to achieve better results; however, they often overlook employee engagement or employee commitment and the negative impact that low employee loyalty can have on service quality, turning this situation into an organizational problem.

In Panama, there is a gap in the literature that prevents an adequate contextualization of the impact of employee engagement on customer service. The objective of this manuscript is to conduct a literature review addressing the following research question: How is employee engagement related to the quality of customer service?

The search method used for this study involved the use of keywords selected from the UNESCO thesaurus, applying different Boolean search configurations to delimit results in the most robust databases for administrative sciences, such as Dialnet and SciELO, among others. The study concludes that employee engagement ceases to be merely a psychological variable and becomes a strategic economic asset. Service quality can become the economic engine that allows a company to be sustainable over time, ensuring customer loyalty and maximizing profitability in highly competitive service sector markets.

Keywords: economic sustainability, employee engagement, labor productivity, quality of customer service, work culture.



Resumo

Atualmente, o mercado apresenta uma elevada oferta de serviços e produtos, o que impõe às empresas não apenas o desafio de captar clientes por meio da oferta contínua de valor agregado que as diferencie da concorrência, mas também de identificar estratégias para fidelizar seus clientes e garantir a sustentabilidade. No período pós-pandemia da COVID-19, as empresas buscam otimizar ao máximo seus recursos e reduzir os custos operacionais com o objetivo de alcançar melhores resultados; no entanto, muitas vezes acabam negligenciando o engajamento laboral ou o comprometimento dos colaboradores e o impacto negativo que a baixa fidelização destes pode provocar na qualidade do serviço, transformando-se em um problema organizacional.

No Panamá, observa-se uma lacuna na literatura que dificulta a adequada contextualização do impacto do engajamento laboral no atendimento ao cliente. O objetivo deste manuscrito é realizar uma revisão bibliográfica correspondente à seguinte pergunta: como o engajamento laboral se relaciona com a qualidade do atendimento ao cliente?

O método de busca utilizado neste estudo baseou-se no uso de palavras-chave selecionadas a partir do Tesouro da UNESCO, aplicando diferentes configurações de buscas booleanas para delimitar os resultados nas bases de dados mais consolidadas das ciências administrativas, como Dialnet, SciELO, entre outras. O estudo conclui que o engajamento laboral deixa de ser apenas uma variável psicológica para se tornar um ativo econômico estratégico. qualidade do serviço pode se tornar o motor econômico que permite a uma empresa ser sustentável ao longo do tempo, garantindo a fidelização do cliente e maximizando a rentabilidade em mercados altamente competitivos do setor de serviços.

Palavras-chave: cultura de trabalho, sustentabilidade econômica, qualidade do atendimento ao cliente, produtividade do trabalho, engajamento laboral.

Introducción

La República de Panamá cuenta con una ubicación geográfica estratégica, su impulso económico se ha inclinado al área de servicios logísticos, financieros y comerciales para la región. La economía de Panamá se ha desempeñado como una de las economías más competitivas a nivel regional (Miranda et al., 2023). Este nivel competitivo exige a las empresas elevar sus estándares de servicio y diferenciarse no solo por el precio o infraestructura, sino por la experiencia integral que ofrecen al cliente. En este sentido, el bienestar psicológico de los colaboradores, expresado a través de los altos niveles de



engagement laboral, se convierte en un activo intangible fundamental para sostener una atención al cliente eficiente, empática y orientada a la excelencia.

La relevancia académica que tiene el *engagement* organizacional en la atención del cliente se vincula al bienestar psicológico que tienen los colaboradores en su día a día, traduciéndose en la sostenibilidad económica y como consecuencia esto se transforma en una ventaja competitiva para las empresas (Cordero-Guzmán et al., 2022).

En términos prácticos, un colaborador con altos niveles de *engagement* tiende a mostrar mayor energía, dedicación y persistencia, lo que favorece conductas de servicio esenciales: comunicación efectiva, capacidad de respuesta, empatía consistencia, en el trato y resolución de problemas, todas ellas determinantes de la experiencia del cliente.

La justificación, para abordar este tema se fundamenta en el contexto actual de alta competitividad y transformación constante de los mercados, las empresas se enfrentan al desafío de garantizar su sostenibilidad económica sin descuidar el bienestar de su capital humano ni la calidad de la atención ofrecida a sus clientes.

En este escenario, el *engagement* laboral ha sido abordado por la literatura como un factor clave para mejorar la productividad, reducir la rotación del personal y prevenir el desgaste profesional. Sin embargo, aún persiste una brecha académica respecto a la forma en que dicho *engagement* trasciende el plano interno de las organizaciones y se convierte en un catalizador directo en la atención al cliente, actuando como un verdadero motor económico para las empresas.

Es por ello por lo que, esta revisión bibliográfica tiene la intención responder a la siguiente pregunta ¿Cómo se relaciona el *engagement* laboral con la calidad de atención al cliente?

Según, Estrella-Paz (2024) concluye que, para incrementar la satisfacción en la atención del cliente, se requiere optimizar la capacidad de respuesta y mejorar la comunicación interna del personal, para mantener la competitividad de las empresas en un mercado cada vez más severo.

En líneas generales, la fidelidad tanto del cliente como del colaborador exige cada día más que se tengan en consideración la atención al detalle en factores administrativos y esto se traduce en fomentar la lealtad que tienen los consumidores ya sea que recomienden a otros clientes o vuelvan adquirir nuevamente el servicio o producto (Macas et al., 2024).

Así mismo, cuando las empresas invierten en el *engagement* de sus colaboradores, no solo previenen el desgaste laboral, sino que generan un efecto multiplicador que se refleja



en interacciones de mayor calidad con los clientes, fortaleciendo la lealtad, la recomendación y la recompra de productos o servicios (Alabi et al., 2024).

De esta manera, la fidelidad del cliente y la del colaborador se retroalimentan, consolidando un círculo virtuoso de creación de valor.

La dinámica macroeconómica de Panamá, según el Banco Mundial (2026), en un reporte realizado, reportan que el PIB de Panamá creció 2.9% en el 2025. Estas cifras reflejan un desempeño que, aun en un entorno desafiante, mantienen el peso de las actividades de servicios y su papel en la resiliencia económica nacional.

A su vez, en el reporte del Banco Mundial menciona que las proyecciones apuntan a un crecimiento hacia el 4% en 2025-2027, impulsada precisamente por servicios y construcción, lo que refuerza la importancia de fortalecer capacidades organizacionales que tengan un impacto en la productividad y la atención al cliente.

En consecuencia, centramos la interrelación sistémica entre el bienestar del capital humano enfocado en el *engagement* laboral y el impacto que éste tiene en la atención al cliente como determinantes críticos de la sostenibilidad económica en las empresas (Gustafsson et al., 2024).

Este enfoque resulta pertinente porque, en un entorno donde la economía se apoya mayoritariamente en servicios, la excelencia en atención al cliente se convierte en un motor económico: influye en la recompra, la recomendación, la eficiencia operativa y la diferenciación estratégica.

Desde esta perspectiva, se argumenta que gestionar el *engagement* no es únicamente una política de recursos humanos sino una estrategia empresarial que conecta bienestar, desempeño y experiencia del cliente brindando sostenibilidad económica.

Métodos de selección de la literatura

Para García-Peñalvo (2022), las revisiones bibliográficas tienen un rol trascendental en los avances de la ciencia ya que permiten revisar en una investigación rubros como: comparación, base de la evidencia, autores, trazabilidad, resultados y fiabilidad. Esto ayuda a que no ocurra el riesgo de investigaciones repetidas y tener bases sólidas para la producción académica de un tema a investigar.

Al existir un amplio número de estudios acerca de servicio al cliente, nos enfocamos en identificar las principales teorías que su incidencia provoca un impacto en nuestra otra variable dependiente que es el *engagement* organizacional.

Hemos aplicado la revisión a partir de abril 2026, en los idiomas inglés y español con los siguientes criterios de búsqueda entre los años 2022-2026. Utilizando las palabras claves



seleccionadas del tesoro de la UNESCO y aplicando distintas configuraciones de búsquedas booleanas. En esta metodología, se enfocó en la búsqueda de diferentes investigaciones en los temas centrales servicio al cliente y *engagement* laboral, y, su impacto en el motor económico de la organización. Como criterio de exclusión se descartó cualquier artículo que no estuviera en idioma español o inglés.

Combinando las palabras clave [“cultura de trabajo” AND “productividad laboral”], [Allintitle “engagement” AND “productividad”], [“Desafíos y Oportunidades” + Allintitle “engamenent”] y [Allintitle “compromiso” AND “economía de la empresa”] incluyendo artículos del 2022 a la fecha. Limitando resultados y filtrando con información relevante.

Las búsquedas de productos científicos de relevancia y confiables que se revisaron para este manuscrito fueron 57, utilizando las bases de datos más sólidas para las ciencias administrativas como los son Research Rabbit, Google Académico, Dialnet, SciELO, Redalyc, entre otras. Se aplicó un primer filtro de depuración en que se seleccionaron tanto artículos científicos y a su vez que contaran con DOI o ISSN, esto nos redujo la cantidad de manuscritos a 41.

Empleamos Mendeley como administrador de las referencias bibliográficas, y para garantizar la calidad de los recursos nos hemos asegurado los autores de los artículos cuenten con un ORCID para identificar los trabajos previos de los investigadores.

Una vez que integramos los distintos artículos científicos en Mendeley, lo clasificamos en dos categorías: *engagement* laboral y servicio al cliente.

Luego de contar con estas categorizaciones se procedió a depurar los recursos seleccionados buscando la relación de los estudios con nuestra pregunta de investigación, revisando los resúmenes, marcos teóricos, resultados concluyentes y la mención de las variables. Esta fase de sintetización nos llevó a la cantidad final de 34 artículos, finalmente se desarrolló la fase de análisis con la bibliografía destacada.

Desarrollo

El *engagement* laboral como activo económico: su impacto en la excelencia de la atención al cliente y, en consecuencia, en la sostenibilidad de las empresas. En 1935, el economista británico Allan Frisher argumentó que el progreso económico sufría una transición desde la agricultura, posteriormente la industria hacia el sector terciario (Xuchong, 2025).

Según (Morales et al., 2023) la industria de los servicios, específicamente hotelería y el sector turismo a nivel mundial representan un 10% del producto interno bruto a nivel



mundial (PIB), el impacto económico es significativo ya que genera uno de cada once empleos.

A inicios del Siglo XX, Frederick Taylor introdujo un sistema en donde el colaborador era percibido como un ser racional cuya única motivación era el salario, intercambiado por tareas repetitivas realizadas. Bajo esa premisa en esos tiempos, las empresas creían que si el colaborador respondía a incentivos económicos se podría producir más con el mejor costo (Cordero-Guzmán, 2022).

Posteriormente, entre 1930-1960 Elton Mayo demuestra cómo influyen los factores psicológicos y sociológicos en la productividad laboral, en esos momentos se reconoció al colaborador como un ser social, el cual necesita reconocimiento y también atención para aumentar su rendimiento (Essien y , Lawrence, 2025).

En el 2009 los autores Robbins y Judge infirieron que hay ciertos factores que influyen en la satisfacción del colaborador como los son: el tener un empleo que desafía la capacidad psicológica del colaborador, colegas que los apoyen su día a día y recompensas equitativas (García-Matínez et al., 2022).

Para (Yerdaw & Berhanu, 2026), descubrieron que el engagement laboral va a depender de las características del trabajo, entre ellas la autonomía, la variedad y tareas con desafiantes y con sentido.

En Panamá, para el sector salud se estudió los factores motivacionales de los colaboradores y otros factores del desempeño y la satisfacción de estos, se concluyó que la motivación es un fenómeno multidimensional, que se encuentra en un estado frágil por factores intrínsecos entre ellos el sentido de propósito y agotamiento físico-emocional (Escobar, 2026). En este estudio Escobar, también llega a la conclusión que la motivación laboral no puede verse únicamente desde incentivos económicos sino también hay que tener una visión integral del bienestar psicológico.

Calidad del servicio y fidelización como resultados medibles (SERVQUAL, NPS, Cadena Servicio-Utilidad), y su vínculo con rentabilidad y sostenibilidad. Las preferencias del consumidor más allá del precio, es decir, que cuando hay un cliente satisfecho esto, se transforma en el incremento de la sostenibilidad de cualquier negocio.

En este sentido, el agregar valor al cliente puede convertirse en una ventaja competitiva para las empresas y va muy ligado al servicio brindado.

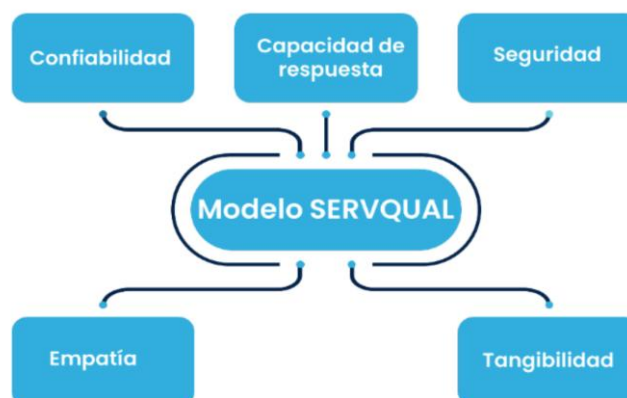
Con el fin de definir la calidad del servicio en 1985, se desarrolla el modelo ServQual que busca medir el servicio de calidad mediante cinco dimensiones: elementos tangibles, fiabilidad, capacidad de respuesta, seguridad y empatía (Cálix Hernández, 2025).



Como se observa en la figura 1, que corresponde a una adaptación del modelo SERVQUAL.

Figura 1

Expectativas y percepciones de los clientes en cinco dimensiones de calidad de servicio del modelo ServQual.



Nota: Tomado *Análisis bibliométrico del servicio al cliente en la intención de compra*, por Cáliz Hernández (2025). *Región Científica*, Vol. 4 Núm. 1.

Con el modelo ServQual, se puede conceptualizar y medir el nivel de satisfacción del cliente y puede complementarse con otras herramientas del ciclo del servicio (Morales-Morales et al., 2023).

Existen algunos métodos para optimizar la capacidad de respuestas, estas son:

- Redes de Petri: Se utiliza para detectar los cuellos de botella en las variables de los flujos de trabajo, cuando se frenan los tiempos del servicio esperado (Latorre-Biel et al., 2022).
- Estructuras Flexibles: En el entorno global en que vivimos, muchas veces las situaciones suelen cambiar con gran rapidez y es por ello por lo que las empresas necesitan adaptarse a los cambios externos y con ello deben implementar en los procesos organizacionales estructuras más flexibles y dinámicas siempre anteponiendo la calidad en el desempeño en sus entornos laborales (Solís-Burbano et al., 2023).
- Capacitación en habilidades blandas: El desarrollo de habilidades blandas como la comunicación y trabajo en equipo, mejora el clima laboral y la calidad del servicio brindado, estas habilidades se pueden perfeccionar a través de programas de



capacitación implementados por el departamento de recursos humanos (Baraglia, 2025).

La Psicología Organizacional Positiva se basa principalmente en el capital humano y en el estudio de sus estados psicológicos positivos relacionados en el entorno laboral (Paliga et al., 2022). Según estos autores el *engagement* surge como respuesta opuesta al síndrome de *burnout* o agotamiento extremo, el cual disminuye la productividad y la calidad del servicio prestado. El *engagement* laboral es la vinculación psicológica en el entorno laboral y la capacidad de afrontar satisfactoriamente las demandas en el trabajo por parte del colaborador (Suárez-Amaya et al., 2024).

Para (Aviles-Peralta, 2024), menciona que la cultura organizacional se manifiesta en el uso de herramientas organizacionales como el salario emocional (balance de vida, cultura de trabajo y beneficios psicológicos).

En otra investigación, que se realizó para una empresa de consumo de alimentos en Panamá con el fin de determinar si la satisfacción o el bienestar pudieran estar relacionadas como factores motivacionales en el desempeño, la investigación estuvo constituida por una población de 180 colaboradores con una muestra de 63 personas. En esta misma investigación, se encontró que los colaboradores realizan su trabajo de forma responsable, sin embargo, muchas veces esto suele de forma mecánica, sin que estén factores motivacionales involucrados a pesar de que la empresa los capacita. La empresa, les ofrece los recursos necesarios para un buen servicio al cliente, se observa que la falta de motivación y poco sentido de pertenencia hace que los colaboradores busquen otras oportunidades fuera de la empresa (Álvarez, 2022).

La mejora de la cultura de trabajo se puede establecer mediante estrategias de salario emocional y estas conducen a: mayor compromiso de los colaboradores y mejor calidad de servicio ofrecido, esto lo detalla (Cordero-Guzmán et al. 2022).

La relación entre la dinámica económica y la sostenibilidad empresarial se fundamenta en un modelo sistémico donde se entrelazan el bienestar del capital humano y la calidad en el servicio donde actúan como los principales motores de la rentabilidad y pertenencia en el mercado de las empresas (Jan-Emmanuel et al., 2023). La atención al cliente representa la supervivencia empresarial de la empresa ya que sin la satisfacción al cliente la trayectoria empresarial sería muy corta. Para (Flores-Bautista et al., 2023), mantener a clientes habituales es más rentable que la adquisición de nuevos clientes, debido a que cuando una empresa intenta mercadear sus servicios o productos los costos de mercadeo no siempre se traduce en retorno de la inversión.



Con el fin de evaluar la sostenibilidad empresarial, las organizaciones miden el grado de fidelización de sus clientes mediante una métrica llamada *Net Promoter Score* (NPS), según (Hernández et al., 2026) es utilizada en diversas industrias para reflejar el nivel de recomendación o lealtad del cliente. Para Morales-Albán et al. (2026), el NPS se puede integrar con el ServQual para conceder una evaluación completa de la experiencia del usuario y sus datos permiten ver la fidelización del cliente a largo plazo y la tasa de retención, con estos datos se impactan la dinámica económica de la empresa.

A mayor *engagement* laboral y compromiso con la sostenibilidad empresarial es posible alcanzar el éxito económico de la empresa, es decir el compromiso laboral contribuye directamente a los resultados financieros de las empresas y ello puede ser esencial para mantener una ventaja competitiva en el mercado para las organizaciones. En el mercado tiende a haber productos y servicios similares muchas veces estos pueden estar en la misma avenida, la calidad del servicio puede ser la herramienta más eficaz para diferenciarse con los competidores (Ramírez Lerma et al., 2025).

El *engagement* laboral, influye en los niveles de productividad, índices de rotación y ausentismo, hay algunos factores motivadores para el colaborador como lo son los relacionados a las tareas de su cargo y con los reconocimientos y logros, entre otros (Sinisterra et al., 2024). La dinámica económica actual de las empresas las obliga a buscar la sostenibilidad económica a través de estrategias organizacionales centradas en la experiencia del cliente y el *engagement* laboral del colaborador.

La experiencia del cliente se ve reflejada en la lealtad del mismo y como resultado se evidencia en su decisión de volver adquirir el servicio. El resultado de esta lealtad está asociado a aspectos del servicio brindado tales como: la calidad del servicio brindado, la interacción que obtuvo, precio justo y una atmósfera confortable (Rukaiyah et al., 2026).

La lealtad de cliente está asociada a la satisfacción al cliente, en 1997 nace la teoría de la Cadena Servicio-Utilidad creada por Heskett y Schlesinger, la misma estudia la relación que existe entre el cliente y el colaborador (Iyer et al., 2026). En esta teoría se muestra una cadena económica clara que se resume con el siguiente proceso: calidad interna → empleados satisfechos → mejor atención al cliente → cliente satisfechos → clientes leales → mayor rentabilidad (Astari & Pagalung, 2023).

Vacíos, tendencias y agenda futura

Entre los aportes revisados se cuenta con modelos para medir la calidad del servicio brindado por parte de los colaboradores ellos son el modelo ServQual para destacar las brechas entre la percepción y las expectativas del cliente de la calidad del servicio brindado



(Mohedano, 2023). El otro de los modelos es *Net Promoter Score (NPS)*, es un indicador que mide la satisfacción del cliente-usuario y ayuda a identificar la experiencia tanto de consumo (De Masi et al., 2023).

Al comparar distintas posturas teóricas podemos mencionar que el enfoque mecanicista-racional del Taylorismo, con el enfoque de la psicología positiva permite inferir que la postura histórica del trabajador se motiva exclusivamente por el salario económico. Los rendimientos laborales se miden por tiempo de producción de tareas repetitivas bajo regímenes disciplinarios severos y sin mencionar las necesidades psicológicas del individuo (Aviles-Peralta, 2024).

Al revisar la teoría de la psicología positiva de Elton Mayo y Kurt Lewin, con un enfoque más humanista destacando el rol que tienen las relaciones interpersonales, los sentimientos y la dinámica de los equipos de trabajo en la productividad laboral. En esta misma línea de la psicología organizacional positiva, se prioriza al *engagement* sobre la fatiga laboral crónica o síndrome de *burnout*, el *engagement* se define como el estado mental positivo relacionado con el trabajo y está caracterizado por la dedicación, los niveles de energía y concentración en su lugar de trabajo. Las tendencias identifican la transición de modelos mecanicistas hacia enfoque humanistas y sistémicos del trabajo. En cuanto al *engagement* laboral, hay un vacío detectando en la escasez de estudios a nivel regional que conectan esta variable con el salario emocional.

Existen convergencias académicas en torno a la calidad del servicio, tanto como diferenciador económico, como por su impacto en la retención en el cliente. Así mismo, se observa una coincidencia teórica en que la cultura organizacional, funciona como variable estructural que potencia o inhibe el *engagement*. La competencia de los servicios ofrecidos en el mercado son una realidad en muchas áreas y con el fin de contar con una ventaja competitiva sostenible se puede utilizar la calidad del servicio como una herramienta eficaz para lograr ese diferenciador económico (Ramírez, et al., 2025). El impacto que tiene la retención del cliente se lleva a cabo mediante estrategias de fidelización y éstas garantizan que haya una relación duradera con el cliente, esta relación duradera se ve vinculada con la calidad del servicio brindado por las empresas y ello logra aumentar la rentabilidad de las organizaciones (Macas-Zambrano et al., 2022).

La revisión bibliográfica evidencia divergencias significativas entre dos perspectivas principales: operativo y el enfoque psicológico. Por un lado, algunos planteamientos se centran en optimizar los recursos mediante la capacidad instalada o los tiempos de producción. Por otro lado, hay otros que se enfocan exclusivamente en los bienes afectivo-



cognitivo del capital humano como motor de cambio (Cordero-Guzmán et al., 2022). A su vez, otros estudios priorizan factores internos como, por ejemplo, bienestar psicológico y en otros, destacan factores relacionales como lo son liderazgo y cultura laboral.

Panamá presenta un perfil productivo claramente orientado al sector de servicios, lo que incrementa la relevancia estratégica de la experiencia del cliente y del desempeño del personal de primera línea. En este entorno, después de consultar distintas fuentes bibliográficas la calidad del servicio no depende únicamente de procesos operacionales, sino del estado psicológico positivo del colaborador donde el *engagement* se asoció con el desempeño, productividad y competitividad organizacional. Encontramos limitación recurrente en la bibliografía, donde se encuentra una baja integración de la variable de *engagement* laboral en los modelos de calidad de servicio. Nos pudimos percatar que existen estudios del impacto del servicio al cliente orientado tanto a la fidelización y satisfacción al cliente, sin embargo no se identificó ninguna investigación analizando la variable de *engagement* laboral.

Es imperativo destacar que se ha encontrado en el área de la salud más estudios relacionados con el *engagement* y la experiencia de la atención al usuario o cliente final. Esto fortalece la respuesta a nuestra pregunta de investigación donde se puede integrar el *engagement* laboral y la calidad de atención al cliente como motores conjuntos de la sostenibilidad empresarial, especialmente relevante en economías basadas en servicio como la panameña.

Por tanto, en Panamá donde el peso económico de los servicios es dominante, el *engagement* se vuelve un factor crítico para sostener interacciones consistentes, empáticas y orientadas a la excelencia, especialmente en empresas cuyo valor se entrega en el momento de atender al cliente.

La contribución de esta revisión literaria infiere que hay una posible correlación entre el *engagement* laboral y el servicio al cliente, estos datos son de utilidad para que se puedan aplicar los instrumentos recomendados en esta investigación y validarlos en algún sector de Panamá.

Conclusiones

El *engagement* laboral se puede convertir en un pilar fundamental para la productividad organizacional y esto aplica para distintos tipos de comercio del sector servicio, a su vez el *engagement* puede ser la vía que contrarreste el síndrome crónico de agotamiento, el cual puede causar un mal servicio al cliente. Las empresas se ven obligadas a brindar esa



experiencia del cliente para diferenciarse de la competencia y una de las herramientas más importantes para garantizar esa calidad de servicio es implementar programas de capacitación que impacte positivamente en el desarrollo de las habilidades blandas del colaborador. Capacitando a sus colaboradores, fomenten un clima organizacional con un mejor estado psicológico positivo de los mismos, y paso seguido lograr que su pasión por su trabajo se vea reflejado en un mejor rendimiento de la productividad laboral llegando a cumplir con sus metas y resultados financieros de las empresas.

Estos resultados de rentabilidad en las empresas también pueden verse influenciado mediante la fidelización del cliente que muchas veces vuelve a recurrir al mismo servicio por la calidad del servicio que obtiene por parte de los colaboradores de la empresa y esto aplica para productos o servicios. Este comportamiento del consumidor, a largo plazo es una estrategia financiera con alta efectividad ya que permite que bajen los costos empleados para captar nuevos clientes y que el efecto de marketing de boca a boca sea la herramienta más efectiva de venta.

En las últimas décadas, hemos visto una transformación de cómo el capital humano ha pasado de valorar más el salario emocional reemplazando a únicamente esforzarse hacer un trabajo impulsado por el salario monetario. Esto ha permitido la transición a modelos más humanistas en donde se valoran factores como el bienestar psicológico, el balance de vida y la cultura laboral.

Esta revisión bibliográfica, nos lleva a la conclusión que el *engagement* laboral deja de ser una variable únicamente psicológica para convertirse en un activo económico estratégico para las organizaciones. La calidad del servicio puede llegar a ser ese motor económico, que le permitan a la empresa la sostenibilidad en el tiempo asegurando la lealtad del cliente y maximizando la rentabilidad en mercados del sector de servicios que son altamente competitivos.

Finalmente, si el turismo en Panamá continúa expandiéndose y aumentando el volumen de interacciones de servicio, resulta imprescindible fortalecer el vínculo *engagement* y la atención al cliente, ya que se vuelve aún más relevante para sostener competitividad, reputación y crecimiento del sector. En este sentido, se les recomienda a las empresas realizar una evaluación organizacional anualmente, con el fin de identificar cómo está el nivel de *engagement* del colaborador en el entorno de trabajo e implementar capacitaciones continuas al personal que los motive a mejorar en su área de trabajo y por ende dar un mejor nivel de calidad del servicio.



Declaración de conflicto de intereses y financiación

Declaro no tener conflicto de intereses. Tampoco existe financiación.

Declaración sobre uso de herramientas de Inteligencia Artificial

Se ha utilizado la herramienta NobookLM de la compañía Google para la estructura del artículo. La herramienta Research Rabbit, Google Académico, Dialnet, SciELO, Redalyc, entre otras, para búsqueda de fuentes. Se utilizó la herramienta Scribbr para normativa APA a través de los DOI.

Referencias

- Alabi, O. A., Ajayi, F. A., Udeh, C. A., & Efunniyi, C. P. (2024). *Data-driven employee engagement: A pathway to superior customer service*. *World Journal of Advanced Research And Reviews*, 23(3), 923-933. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.3.2733>
- Álvarez, N. (2022). *La Felicidad como factor motivacional en el desempeño de los trabajadores en una compañía de consumo de alimentos en Panamá*. *Revista Científica Orbis Cognitiona*, 6(2), 33-50. Recuperado de: https://revistas.up.ac.pa/index.php/orbis_cognita/article/view/3116
- Astari, A. T., & Pagalung, G. (2023). *Employee Satisfaction: Service Profit Chain Approach in Tourism Destination*. *Advances in economics, business and management research/Advances in Economics, Business and Management Research* (pp. 594-602). https://doi.org/10.2991/978-94-6463-146-3_56
- Aviles-Peralta, Y. (2024). *Salario Emocional: más allá de la compensación tradición*. *Región Científica*. 2024, 3(1), 2024191. <https://doi.org/10.58763/rc2024191>
- Banco Mundial. (2026). *Poverty and Economic Policy Global Departments*. Emissions data sourced from CAIT and OECD. *Macro Poverty Outlook*, 1-2.
- Baraglia, A. O. (2025). *Empatía en el ámbito administrativo de salud: Capacitación en habilidades blandas y su impacto en la experiencia del paciente*. *Revista Del Hospital Italiano De Buenos Aires*, 45(3), e0000393. <https://doi.org/10.51987/Rev.Hosp.Ital.B.Aires.vi.393>
- Cáliz Hernández, A. E. (2025). *Análisis bibliométrico del servicio al cliente en la intención de compra*. *Región Científica*, 4 (1), 2025376. <https://doi.org/10.58763/rc2025376>



- Cordero-Guzmán, D., Beltrán-Tenorio, N., & Bermeo-Pazmiño, V. (2022). Cultura organizacional y salario emocional. *Revista Venezolana de Gerencia*, 27(7), 132–149. <https://doi.org/10.52080/rvgluz.27.7.10>
- De Masi, N., Rochina, E., Schpilberg, M., Puga, M., & Garfi, L. (2023). NPS (Net Promoter Score). *Métrica de la experiencia del cliente. Construcción y análisis del indicador de una cobertura médica privada. Revista del Hospital Italiano de Buenos Aires*, vol.43, núm.1, 7-11. <https://doi.org/10.51987/revhospitalbares.v43i1.259>
- Escobar, O. C. (2026). Revisión sistémica de motivación laboral: colaboradores del sector salud en Ciudad Panamá. *Revista Global Negotium*, 9(1), 5-19. <https://doi.org/10.53485/rqn.v9i1.699>
- Essien, B. S. P., & Lawrence, E. U. P. (2025). *Unlocking productivity: lessons from Elton Mayo's philadelphia spinning mill experiment for effective worker motivation. Interdisciplinary Research Journal of Management and Social Sciences, SADI Journal*, vol. 12, núm. 3, pp. 62–73. <https://doi.org/10.5281/zenodo.16737072>
- Estrella-Paz, M. B. . (2024). *Calidad del servicio y satisfacción del cliente en la empresa. Revista Multidisciplinaria Perspectivas Investigativas*, 4 (especial 2), 34–43. <https://doi.org/10.62574/rmpi.v4iespecial2.225>
- Flores-Bautista, P. A., Jimenez-DeLucio, J., Rojo-Cisneros, S. J., & Sánchez-Ayala, J. A. (2023). *Comprendiendo la fidelización de clientes: elementos clave, estadísticas y clasificaciones. XIKUA Boletín Científico de la Escuela Superior de Tlahuelilpan*, 11(22), 18-24. <https://doi.org/10.29057/xikua.v11i22.10650>
- García-Martínez, E., García Álvarez, A., & Suárez Jiménez, R. (2022). *Influencia de la satisfacción laboral en la productividad. Publicaciones E Investigación*, 16(2). <https://doi.org/10.22490/25394088.6213>
- García-Peñalvo F.(2022). *Desarrollo de estados de la cuestión robustos: Revisiones Sistemáticas de Literatura. Education In The Knowledge Society*, vol. 23, e28600. <https://doi.org/10.14201/eks.28600>
- Gustafsson, A., Caruelle, D., & Bowen, D. (2024). *Customer experience (CX), employee experience (EX) and human experience (HX): introductions, interactions and interdisciplinary implications. Journal Of Service Management*, 35(3), 333-356. <https://doi.org/10.1108/josm-02-2024-0072>
- Hernández, B., Leal, O., & Álvarez, N. (2026). *Medición de la experiencia de atención del paciente mediante cuestionario net promoter score en Clínica Nieves Clínica Vascular*



- de Casanare. *Revista Científica y Académica, Ibero Ciencias*, 5(1), 3130-3142. <https://doi.org/10.63371/ic.v5.n1.a818>
- Iyer, R., Malik, A., Thite, M., & De, S. (2026). *Revisiting the Service-Profit Chain: A Conceptual Integration of Employee Experience and Engagement for the Contemporary Workforce*. *Australasian Marketing Journal (AMJ)*. <https://doi.org/10.1177/14413582261442610>
- Jan-Emmanuel, D. N., Kaats, M., & Ward, G. (2023). *Workplace wellbeing and firm performance*. *Oxford University Research Archive (ORA) (University Of Oxford)*. <https://doi.org/10.5287/ora-bpkbjayvk>
- Latorre-Biel, J., Jimenez, E., Martínez-Cámara, E., & Pérez de la Parte, M.M. (2022). *Redes de Petri aplicadas a la simulación del comportamiento de consumidores en escenarios concurrenciosos*. *XLIII Jornadas de Automática*, 537-543. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497498418.0537>
- Macas, A., González, E., González, D., & Toapanta, E. (2024). *Análisis de los Factores que Influyen en la Fidelidad del Consumidor*. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, vol. 8, núm. 1, 3134-3146. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i1.9644
- Macas-Zambrano, J., Rodriguez-Garcia, A., & Luzuriaga-Guerrero, K. (2022). *Estrategias de fidelización de clientes aplicadas a una institución financiera de la Ciudad de Machala*. *593 Digital Publisher CEIT*, vol. 7, núm. 6-1, 60-81. <https://doi.org/10.33386/593dp.2022.6-1.1433>
- Miranda, P., Tack, N. & De Gracia, A. (2023). *Competitividad de Panamá en el período 2013-2018 para la atracción de inversión extranjera directa*. *Revista EKTENOS*, vol. 1, 27-44. ISSN: L2710-7485, ISSN impreso: 2410-8928
- Mohedano, E., Echeverría, O., Martínez, M., & Lezama León, M., (2023). *Modelo SERVQUAL para medir la calidad en el servicio en operadores logísticos*. *Revista CEA*, vol. 9, núm. 19, e2234. <https://doi.org/10.22430/24223182.2234>
- Morales-Albán, R., López-Salazar, J., & Ramírez-Jiménez, S. (2026). *Modelos SERVQUAL y NPS como herramientas integradas para la evaluación de la calidad del servicio y la fidelización del cliente en el sector energético ecuatoriano*. *Revista Científica INGENIAR: Ingeniería, Tecnología E Investigación*, vol. 9, núm.17, 141-155. <https://doi.org/10.46296/ig.v9i17.0326>
- Morales-Morales, J. J., González-Rosales, V. M., & Arango-Ramírez, P. M. (2023). *Análisis de validez de contenido y constructo para un instrumento que mide la calidad en el*



- servicio y satisfacción del cliente en el sector hotelero. Contaduría y Administración*, 68(2), 132–155. <https://doi.org/10.22201/fca.24488410e.2023.4522>
- Paliga, M., Kozusznik, B., Pollak, A., & Sanecka, E. (2022). *The relationships of psychological capital and influence regulation with job satisfaction and job performance. PLoS ONE*, 17(8), e0272412. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0272412>
- Ramírez Lerma, J., Montalvo, L., Llamas, B., Jara, J., & Martínez, M. (2025). Servicio a clientes como ventaja competitiva. Caso: Restaurante D'Calos. *CISA*, vol. 7, núm. 2. <https://doi.org/10.58299/cisa.v7i2.118>
- Rukaiyah, S., Sultan, S., & Rosanti, N. (2026). *Price, Atmosphere, and Service Quality on Customer Loyalty. Jurnal Manajemen Bisnis*, 13(1), 418-434. <https://doi.org/10.33096/jmb.v13i1.1622>
- Sinisterra, L., Peñalver, J., & Salanova, M. (2024). *Connecting the organizational incomes and outcomes: a systematic review of the relationship between talent management, employee engagement, and turnover intention. Frontiers In Psychology*, 15, 1439127. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1439127>
- Solís-Burbano, N. A., Romero-Fernández, A. J., & Guevara-Murgueytio, R. F. (2023). *Estructura organizacional flexible y la calidad en el desempeño de los procesos. Ingenium Et Potentia*, 5(1), 1195–1209. ISSN-e 2665-0304
- Suárez-Amaya, W. M., Cancino, E. A. G., Ramírez, B. J. G., & Corrotea, M. I. M. (2024). *Engagement laboral en organizaciones empresariales. Mapeo sistemático de la literatura. Suma de Negocios*, 15(33), 156. <https://doi.org/10.14349/sumneg/2024.v15.n33.a8>
- Yerdaw, B. A., & Berhanu, K. Z. (2026). *Factors influencing employee engagement. Discover Psychology*, 6(1). <https://doi.org/10.1007/s44202-026-00624-8>
- Xuchong, Y. (2025) *The economic development and the emergence of the quaternary sector: New evidence of Japan. New Applied Studies in Management, Economics & Accounting, DOAJ: Directory of Open Access Journals*, vol. 8, 1-12. <https://doi.org/10.22034/nasmea.2025.203932>



Ecosistemas de innovación disruptiva para la sostenibilidad, la economía circular y la inteligencia artificial

Disruptive innovation ecosystems for sustainability, the circular economy, and artificial intelligence

Ecosystemas de inovação disruptiva para a sustentabilidade, a economia circular e a inteligência artificial

Fernando Quirino Guerra Guerra

Universidad IDESUM, México

ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-7654-7326>

Correo de correspondencia: fernando.guerra@idesum.edu.mx

Recibido: 03 de mayo de 2026

Aceptado: 30 de julio de 2026

Publicado: 31 de julio de 2026

DOI: <https://doi.org/10.59722/synergia.v2i1.1276>

Resumen

El presente estudio examina las tensiones estructurales que dificultan la integración de la sostenibilidad y la economía circular en los ecosistemas de innovación contemporáneos, con especial énfasis en América Latina. Para ello, se realizó un análisis crítico de literatura especializada publicada entre 2020 y 2025, complementado con un ejercicio de mapeo bibliométrico mediante *Connected Papers* y *Gephi*, y organizado en Zotero bajo criterios de actualidad, revisión por pares y pertinencia temática. Los resultados identifican tres grandes barreras para avanzar hacia modelos circulares: En primer lugar, aparecen restricciones normativas, financieras, culturales y tecnológicas que operan de forma sistémica. En segundo lugar, remite al papel ambivalente de la inteligencia artificial como habilitador de capacidades de



coordinación, innovación y toma de decisiones, y simultáneamente como generador de riesgos asociados a sesgos algorítmicos, concentración de poder y captura de gobernanza. Finalmente, persiste la insuficiencia de los mecanismos de gobernanza colaborativa para articular actores heterogéneos en entornos institucionales fragmentados. En conjunto, los resultados sugieren que el incremento de la producción académica no se traduce automáticamente en avances tangibles en circularidad, como lo refleja la disminución del índice global de circularidad en los últimos años. Por ello, superar estas tensiones exige ecosistemas de innovación capaces de integrar gobernanza multinivel, financiamiento mixto con esquemas de riesgo compartido y métricas de impacto verificables. En este contexto, la inteligencia artificial puede potenciar dichas capacidades, solo sí, su adopción se alinea con marcos éticos explícitos, transparencia y estructuras institucionales que garanticen una distribución equitativa de beneficios.

Palabras clave: economía circular, ecosistemas de innovación, gobernanza colaborativa, inteligencia artificial, sostenibilidad.

Abstract

This study examines the structural tensions that hinder the effective integration of sustainability and the circular economy within contemporary innovation ecosystems, with particular emphasis on Latin America. To this end, a critical analysis was conducted of specialized literature published between 2020 and 2025, complemented by bibliometric mapping using Connected Papers and Gephi, and managed in Zotero according to criteria of recency, peer review, and thematic relevance. The results identify three major barriers to advancing toward circular models. First, there are normative, financial, cultural, and technological constraints that operate in a systemic way. Second, artificial intelligence plays an ambivalent role: it can enhance coordination, innovation, and decision-making capacities, while simultaneously generating risks associated with algorithmic bias, power concentration, and governance capture. Finally, collaborative governance mechanisms remain insufficient to articulate heterogeneous actors within fragmented institutional settings. Overall, the findings suggest that the growth in academic production does not automatically translate into tangible progress in circularity, as reflected in the decline of the global circularity index in recent years. For this reason, overcoming these tensions requires innovation ecosystems capable of integrating multilevel governance, blended financing with risk-sharing schemes, and verifiable impact metrics. In this context, artificial intelligence can enhance these capacities only if its adoption is aligned with explicit ethical frameworks, transparency, and institutional structures that ensure an equitable distribution of benefits.



Keywords: circular economy, innovation ecosystems, collaborative governance, artificial intelligence, sustainability

Resumo

Este estudo examina as tensões estruturais que dificultam a integração efetiva da sustentabilidade e da economia circular nos ecossistemas contemporâneos de inovação, com especial ênfase na América Latina. Para isso, foi realizada uma análise crítica da literatura especializada publicada entre 2020 e 2025, complementada por um exercício de mapeamento bibliométrico por meio do Connected Papers e do Gephi, e organizada no Zotero segundo critérios de atualidade, revisão por pares e pertinência temática. Os resultados identificam três grandes barreiras para avançar em direção a modelos circulares. Em primeiro lugar, observam-se restrições normativas, financeiras, culturais e tecnológicas que operam de forma sistêmica. Em segundo lugar, a inteligência artificial assume um papel ambivalente: pode fortalecer capacidades de coordenação, inovação e tomada de decisão, ao mesmo tempo em que gera riscos associados a vieses algorítmicos, concentração de poder e captura da governança. Por fim, persiste a insuficiência dos mecanismos de governança colaborativa para articular atores heterogêneos em contextos institucionais fragmentados. Em conjunto, os resultados sugerem que o aumento da produção acadêmica não se traduz automaticamente em avanços tangíveis em circularidade, como reflete a diminuição do índice global de circularidade nos últimos anos. Por isso, superar essas tensões exige ecossistemas de inovação capazes de integrar governança multinível, financiamento misto com esquemas de compartilhamento de risco e métricas de impacto verificáveis. Nesse contexto, a inteligência artificial pode potencializar essas capacidades somente se sua adoção estiver alinhada com marcos éticos explícitos, transparência e estruturas institucionais que garantam uma distribuição equitativa dos benefícios.

Palavras-chave: economia circular, ecossistemas de inovação, governança colaborativa, inteligência artificial, sustentabilidade.

Introducción

La capacidad de una economía regional para competir en el escenario global depende, cada vez más, de la calidad sus ecosistemas de innovación. Granstrand y Holgersson (2020) señalan que estos ecosistemas se distinguen de los clústeres tradicionales por la interacción dinámica entre empresas, universidades, gobiernos y usuarios, así como la creación compartida



de valor. Sin embargo, la transición hacia modelos de innovación sostenibles sigue enfrentando limitaciones estructurales que la literatura no ha resuelto del todo.

La evidencia es contundente en este punto: el índice de circularidad global descendió del 9.1% en 2017 al 6.9% en 2024, lo que indica que el progreso material hacia ecosistemas circulares es marcadamente insuficiente a pesar del volumen creciente de producción académica sobre el tema (Aryee et al., 2025).

Esta paradoja abundante producción teórica frente a escasa implementación práctica constituye la brecha de conocimiento central que motiva el presente ensayo. La revisión sistemática de la literatura fue apoyada con análisis de redes bibliométricas en Connected Papers y Gephi, y el ordenamiento de referencias fue gestionado en Zotero, aplicando criterios de actualidad (2020–2025), revisión por pares y pertinencia temática.

La revisión bibliográfica que fundamenta este ensayo se desarrolló siguiendo un protocolo explícito de búsqueda, cribado y organización, cuyos parámetros se sintetizan en la tabla 1.

Tabla 1

Protocolo de búsqueda y selección bibliográfica

Fase	Descripción	Herramienta/ Criterio	Resultado
<i>Identificación</i>	Búsqueda inicial en bases de datos	Scopus, Google Scholar, Springer Nature	45 referencias
<i>Cribado</i>	Aplicación de criterios de inclusión	Actualidad 2020–2025, revisión por pares, pertinencia temática	26 fuentes primarias
<i>Análisis de redes</i>	Mapeo bibliométrico	<i>Connected Papers</i> , <i>Gephi</i>	Identificación de núcleos conceptuales
<i>Organización</i>	Gestión y verificación de citas	<i>Zotero</i>	Lista de referencias definitiva

Nota. El corpus inicial de 45 referencias fue reducido a 26 fuentes primarias mediante criterios de actualidad (2020-2025), revisión por pares y pertinencia temática, con apoyo de *Connected Papers*, *Gephi* y *Zotero*.



Metodología

La búsqueda documental se realizó en bases de datos como Scopus, Google Scholar (Lab), Springer y Nature. Inicialmente se identificaron 45 referencias relacionadas con ecosistemas de innovación, sostenibilidad, economía circular e inteligencia artificial. Posteriormente se aplicaron criterios de actualidad (2020 a 2025), revisión por pares y pertinencia temática, obteniéndose un corpus documental de 26 fuentes primarias. El análisis de relaciones conceptuales se apoyó en las herramientas Connected Papers y Gephi, mientras que la organización y verificación de referencias se realizó con el gestor Zotero.

Argumento. La idea central de este ensayo es que la competitividad regional sostenible depende de la construcción ética y colaborativa de ecosistemas de innovación. Integrando simultáneamente la lógica circular, la habilitación tecnológica por IA y mecanismos robustos de gobernanza multinivel.

Estructura del ensayo. Para desarrollar este argumento, el texto se estructura en cuatro secciones de desarrollo: innovación como proceso colectivo; ecosistemas dinámicos y barreras estructurales; IA como motor y fuente de riesgos; y cribado de fuentes y construcción ética del conocimiento.

Desarrollo

1. La innovación como proceso colectivo

La idea de innovación centrada en el esfuerzo individual de la empresa ha ido perdiendo fuerza frente a una visión más sistémica.

Hoy se reconoce que la innovación es un proceso colectivo, sostenido por la interacción entre actores complementarios y, en algunos casos, también sustitutos. Granstrand y Holgersson (2020) muestran que los ecosistemas de innovación generan dinámicas emergentes que ningún actor produciría por sí solo.

En la misma línea, la inteligencia artificial añade una dimensión que merece un cuidadoso análisis. Secundo et al. (2025) plantean el ecosistema de innovación de IA como un nuevo paradigma organizacional, en el cual las plataformas de IA fortalecen la colaboración, la gestión del conocimiento y la creación de valor más allá de los límites tradicionales de las empresas. Aun así, este potencial genera riesgos éticos y de gobernanza. Si no se atienden, pueden profundizar las asimetrías existentes entre regiones y sectores.

Esta mirada tiene consecuencias importantes. La innovación no se gestiona como una secuencia lineal, sino como una articulación de relaciones, capacidades y objetivos compartidos.

Bauld y Minifie (2025) observaron esta dinámica en ecosistemas de África, Europa y Estados Unidos, y encontraron que una mayor densidad de conexiones entre gobierno, empresa, academia y sociedad civil se asocia con una adopción más alta de prácticas circulares.

En América Latina, una de las limitaciones más persistentes es la débil conexión entre los actores del ecosistema. Las universidades deberían funcionar como nodos de generación y transferencia de conocimiento (Pedroza-Zapata y Silva-Flores, 2020), pero con frecuencia permanecen poco vinculadas al sector productivo. Esa separación no es solo estructural, también es epistémica, porque faltan lenguajes y métricas compartidas para coordinar esfuerzos en torno a la sostenibilidad.

Los ecosistemas de innovación no solo se entienden como estructuras de interacción entre actores económicos y tecnológicos, sino también como mecanismos que favorecen la sostenibilidad mediante la generación de capacidades colaborativas orientadas a la creación de valor económico, social y ambiental (Abreu, 2021).

La figura 1 presenta la arquitectura propuesta del ecosistema de innovación dinámico, con actores de la quintuple hélice y las barreras estructurales que limitan su desarrollo; universidad, gobierno, industria, sociedad civil, medio ambiente e IA/tecnología y las seis categorías de barreras estructurales que inhiben la plena realización del potencial circular del ecosistema. El anillo punteado representa la gobernanza multinivel que articula estos elementos en interacción permanente.

Figura 1

Ecosistema de innovación dinámico: actores, mecanismos de gobernanza colaborativa



Nota. Basado en Granstrand y Holgersson (2020); Secundo et al. (2025); Alka et al. (2024).

La quintuple hélice ha sido aplicada recientemente en contextos de ecosistemas circulares emprendedores (Borrero y Yousafzai, 2024) y en la gestión de eco innovación industrial (Shkarupeta y Babkin, 2024), confirmando su utilidad analítica más allá del marco teórico original propuesto por Carayannis et al. (2012).

Suchek et al. (2021) sostienen que la transición hacia la economía circular exige cambios profundos en los modelos de negocio, donde la innovación juega un papel estratégico al redefinir la creación de valor desde perspectivas económicas, sociales y ambientales.

2. Ecosistemas dinámicos, sostenibilidad y economía circular

La integración de la economía circular en los ecosistemas de innovación ha sido promovida como condición necesaria para la sostenibilidad competitiva. Sin embargo, la revisión de la literatura reciente muestra que las barreras para lograrla son múltiples, interdependientes y frecuentemente subestimadas en los marcos de política pública.

Estas barreras se articulan en cuatro dimensiones principales que se refuerzan mutuamente, formando un sistema de restricciones cuya superación exige intervenciones coordinadas y no fragmentadas.

En primer lugar, las barreras normativas y de gobernanza son un obstáculo estructural de gran peso. Los marcos regulatorios presentan incompatibilidades entre escalas local, nacional y supranacional, lo que genera vacíos normativos difíciles de resolver de manera aislada. La ausencia de incentivos alineados representa la barrera más frecuentemente citada por los actores del sector privado al adoptar prácticas circulares (Aryee et al., 2025; Zighan, 2025).

En segundo lugar, las barreras financieras operan a través de la elevada inversión inicial requerida y la aversión al riesgo de los mecanismos convencionales de financiamiento, que penalizan los horizontes de retorno largo plazo característicos de los modelos circulares (Zighan, 2025; Gallego-Schmid et al., 2024). El financiamiento mixto público-privado con riesgo compartido emerge como la modalidad más prometedora para superar esta restricción.

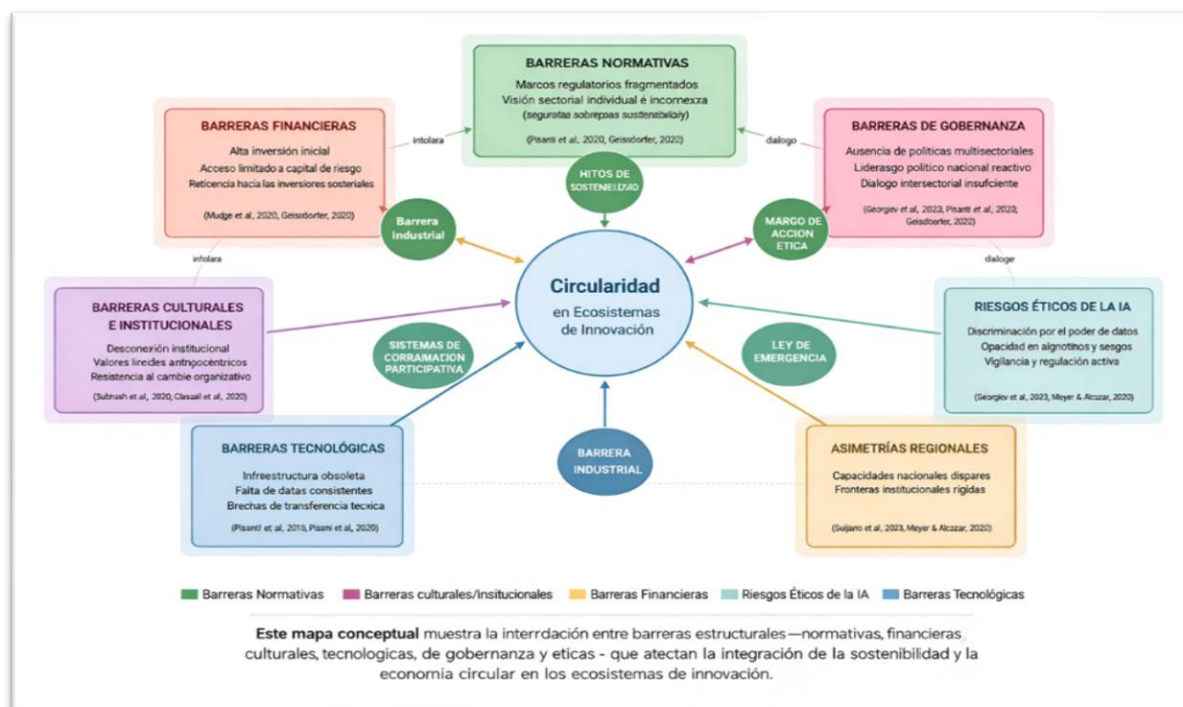
En tercer lugar, las barreras culturales e institucionales son frecuentemente subestimadas en favor de explicaciones tecnológicas o financieras. La ausencia de marcos de política que conecten los programas circulares con estrategias participativas y comunitarias limita la escalabilidad y la legitimidad social de las iniciativas (Ceddia et al., 2024).

En la figura 2, se representa el mapa de barreras estructurales interconectadas, mostrando los siete tipos de obstáculos identificados en la literatura, sus bucles de refuerzo mutuo (líneas punteadas) y los mecanismos habilitadores (nodos verdes) que, cuando se activan

de manera coordinada, pueden interrumpir estos ciclos restrictivos y acelerar la transición hacia la circularidad.

Figura 2

Mapa de Barreras estructurales interconectadas en ecosistemas de innovación



Nota. Elaboración con base en la literatura revisada (2020-2025).

En cuarto lugar, la dimensión tecnológica introduce una paradoja crítica: los mismos habilitadores digitales IoT, *blockchain*, IA que potencian la circularidad requieren infraestructura, capacidades organizacionales y estándares de interoperabilidad frecuentemente ausentes en los ecosistemas regionales menos desarrollados (Alka et al., 2024; Surya et al., 2025).

Sin embargo, la transición hacia ecosistemas circulares apoyados por tecnologías digitales continúa enfrentando barreras relacionadas con capacidades organizacionales, infraestructura tecnológica y condiciones regulatorias, elementos que pueden limitar la implementación efectiva de estrategias sostenibles (Trevisan et al., 2023).

3. Inteligencia artificial como motor y fuente de riesgos

La inteligencia artificial ha emergido como uno de los factores más disruptivos en la reconfiguración de los ecosistemas de innovación contemporáneos. Secundo et al. (2025)

proponen que la adopción de plataformas de IA dentro de los ecosistemas de innovación genera un nuevo paradigma el *AI innovation ecosystem* caracterizado por capacidades ampliadas de toma de decisiones, colaboración Inter firma acelerada y creación de valor más allá de los límites organizacionales convencionales. Estos autores, a partir del análisis de 244 publicaciones indexadas en *Scopus*, identificaron que las plataformas de IA optimizan los procesos de *matching* entre actores complementarios, reducen los costos de transacción asociados a la colaboración y habilitan formas nuevas de co-creación de conocimiento.

Toderas (2025) complementa esta perspectiva documentando que el procesamiento de lenguaje natural presenta el mayor coeficiente de impacto sobre el compromiso de los grupos de interés y la transparencia en la comunicación de métricas de sostenibilidad.

Sin embargo, el análisis crítico exige reconocer tres categorías de riesgo: (1) riesgos de concentración, pues las plataformas de IA generan efectos de red acumulativos que favorecen la consolidación del poder en actores con mayor capacidad computacional; (2) riesgos de captura de gobernanza, cuando las plataformas son controladas por actores privados sin mecanismos adecuados de rendición de cuentas; y (3) riesgos de sesgo algorítmico, cuando los datos de entrenamiento no representan adecuadamente la diversidad de actores del ecosistema, reproduciendo y amplificando patrones históricos de exclusión.

La OCDE (2024) ha propuesto algunos principios con los cuales la IA puede volverse confiable; pero la literatura aún no ha encontrado soluciones sobre cómo aplicarlos a escala del ecosistema regional con capacidad institucional limitada.

La revisión sistemática de Khawaja et al. (2024) sobre gobernanza de IA confirma que este vacío de implementación es transversal a múltiples contextos institucionales. Camilleri (2024) sistematiza estos riesgos bajo el concepto de gobernanza de IA responsable, argumentando que la confiabilidad de los sistemas de IA en contextos de innovación requiere mecanismos explícitos de transparencia algorítmica y rendición de cuentas que trasciendan las declaraciones de principios para convertirse en estructuras organizacionales verificables.

Chi et al. (2023) evidencian que las tecnologías digitales, como el análisis de datos, el Internet de las cosas y la inteligencia artificial, desempeñan un papel fundamental en la transición hacia modelos de economía circular, al facilitar procesos más eficientes, predictivos y sostenibles.

4. Filtrar fuentes, construir datos éticos y visualizar contenido críticamente

El dominio de las teorías es solo una parte de la fórmula para diseñar el conocimiento doctoral dentro de los ecosistemas de innovación y la otra es el proceso de encontrar, verificar y evaluar fuentes. El número de publicaciones sobre economía circular e innovación más de 3,000 documentos indexados en *Scopus* según Alka et al. (2024) no garantiza la calidad ni la pertinencia de las fuentes seleccionadas.

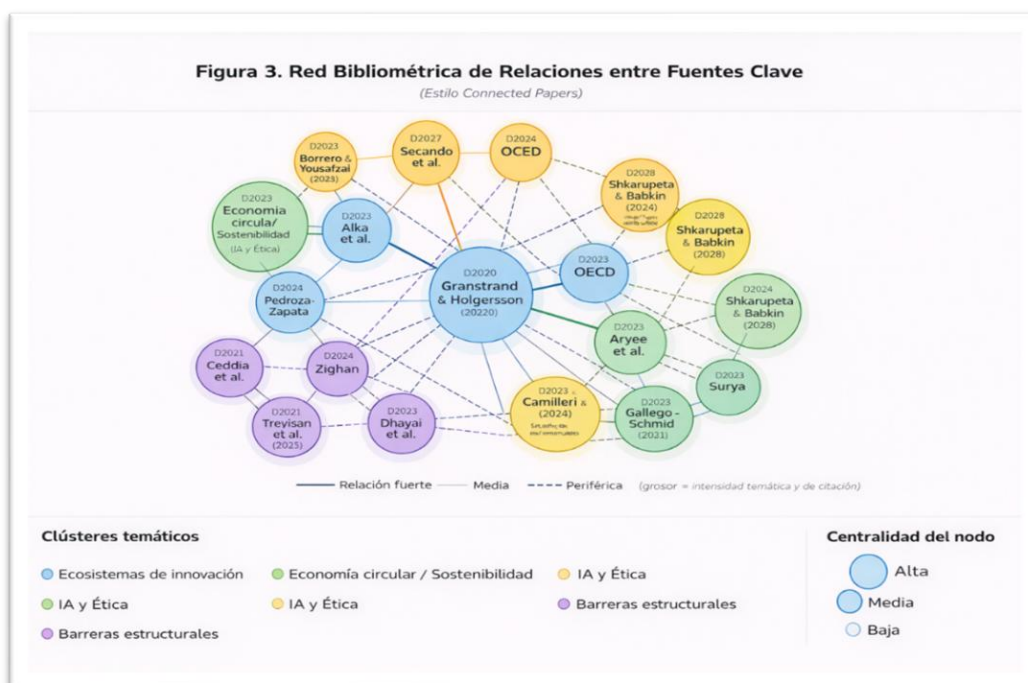
Los ecosistemas con mecanismos institucionales para la documentación colectiva y la difusión de los fallos de implementación presentan capacidades de adaptación superiores a los que operan bajo una lógica de ocultamiento del error.

La distinción entre revisiones sistemáticas con protocolos PRISMA explícitos y artículos sin evidencia empírica sólida resulta fundamental para la construcción de argumentos críticos.

Este principio es aplicable tanto al diseño organizacional del ecosistema como al proceso de producción del conocimiento, la capacidad de identificar y articular los límites del conocimiento existente es una competencia central en la generación de contribuciones originales. Podemos observarlo en la figura 3.

Figura 3

Red bibliométrica de relaciones entre fuentes clave



Nota. Elaboración con apoyo de *Connected Papers*, *Gephi* y *Zotero*.



El uso de herramientas como *Connected Papers* y *Gephi* para el análisis de redes de citas permitió identificar los núcleos conceptuales más densamente conectados del campo, distinguir entre fuentes seminales y trabajos periféricos, y detectar vacíos temáticos que representan oportunidades de contribución original.

Este tipo de análisis de co-citación y co-ocurrencia de palabras clave es reconocido como una metodología válida para la cartografía intelectual de un campo científico (Alka et al., 2024; Surya et al., 2025), distinguir entre fuentes seminales y trabajos periféricos, y detectar vacíos temáticos que representan oportunidades de contribución original. El ordenamiento final de las referencias fue gestionado en Zotero.

Discusión

La discusión gana profundidad cuando se ancla en experiencias territoriales concretas. En el contexto latinoamericano, tres casos ilustran de manera especialmente nítida las dinámicas analizadas en este ensayo.

El primer caso es el ecosistema tecnológico Guadalajara-Monterrey en México. Allí la consolidación de la industria tecnológica y manufacturera ha generado una masa crítica de actores académicos, empresariales y gubernamentales. Sin embargo, la ausencia de mecanismos formales de coordinación multinivel ha fragmentado los esfuerzos hacia la circularidad. El resultado son iniciativas puntuales, con baja escalabilidad y escasa transferencia de aprendizajes entre sectores (Pedroza-Zapata y Silva-Flores, 2020). Este caso ilustra con claridad la paradoja señalada en la literatura: mayor densidad de actores no se traduce automáticamente en mayor circularidad si no existen plataformas de gobernanza que articulen los incentivos.

El segundo caso es el ecosistema de innovación verde de Medellín, Colombia, que ha avanzado en la incorporación de criterios de economía circular en la política municipal de ciencia, tecnología e innovación. La articulación entre la Universidad de Antioquia, el clúster de energía eléctrica y el gobierno metropolitano ha generado condiciones propicias para proyectos piloto de circularidad en la cadena de suministro industrial. No obstante, la dependencia de financiamiento internacional y la fragilidad de los mecanismos de gobernanza ante los ciclos electorales comprometen la sostenibilidad institucional de estas iniciativas (Gallego-Schmid et al., 2024).

El tercer caso corresponde al ecosistema agroalimentario de la Pampa húmeda, en Argentina. Allí, la adopción de tecnologías de precisión basadas en inteligencia artificial ha



mejorado la eficiencia productiva, también ha generado nuevas formas de concentración del conocimiento en actores privados con capacidad computacional. Este fenómeno ilustra los riesgos de captura de gobernanza identificados en el análisis teórico y subraya la necesidad de marcos regulatorios que garanticen la distribución equitativa de los beneficios tecnológicos en ecosistemas regionales con asimetrías estructurales previas (Dhayal et al., 2025).

Estos tres casos convergen en señalar que la transición hacia ecosistemas de innovación sostenibles en Latinoamérica requiere, de manera prioritaria, el diseño e implementación de mecanismos institucionales concretos.

Entre las propuestas que la literatura sustenta con mayor solidez empírica destacan: la creación de comités multisectoriales de ética y transparencia algorítmica, con representación de sociedad civil y academia independiente; el desarrollo de protocolos de auditoría de plataformas de IA adoptadas en ecosistemas de innovación regionales, con publicación periódica de resultados; y el establecimiento de fondos de innovación circular con estructuras de financiamiento mixto que compartan el riesgo entre actores públicos, privados y cooperativos, reduciendo así la aversión al riesgo que la literatura identifica como la barrera financiera más recurrente (Aryee et al., 2025; Zighan, 2025). La literatura sobre ecosistemas digitales emprendedores en América Latina corrobora este diagnóstico: Santos et al. (2024), analizando 14 países de la región, documentan que la densidad de redes, la transferencia tecnológica y la protección digital son los factores diferenciadores entre ecosistemas con alta y baja contribución al desarrollo sostenible.

En términos de capacidades institucionales para la innovación sostenible, Pique et al. (2021) identifican que la ausencia de políticas orientadas por misión representa la principal brecha estructural de América Latina frente a otras regiones.

La gobernanza colaborativa de ecosistemas de innovación no puede permanecer en el plano declarativo: requiere mecanismos institucionales operacionalizables con funciones, responsabilidades y métricas de evaluación claramente definidas.

La OCDE (2024) propone que la confiabilidad de la inteligencia artificial en contextos de innovación depende de tres condiciones institucionales que deben implementarse de manera simultánea y no secuencial. Alamandi (2025) argumenta que la gestión de la innovación sostenible requiere equilibrar el crecimiento económico con la responsabilidad, mediante la integración de tecnologías emergentes y marcos regulatorios orientados al desarrollo sostenible.



La primera condición es la existencia de comités multisectoriales de ética algorítmica con capacidad vinculante. Estos organismos deben integrar representantes del sector académico, la sociedad civil organizada, el sector privado y las instituciones públicas de regulación, y tienen como función revisar periódicamente los criterios de diseño y entrenamiento de los sistemas de IA adoptados en el ecosistema. Su eficacia depende del carácter vinculante de sus resoluciones, aspecto frecuentemente ausente en los modelos de gobernanza de IA implementados en América Latina (Dhayal et al., 2025).

La segunda condición es el desarrollo de protocolos estandarizados de auditoría de transparencia algorítmica, adaptados a las capacidades institucionales de los ecosistemas regionales. Ceddia et al. (2024) documentan que los ecosistemas que han implementado mecanismos de rendición de cuentas verificables en sus procesos de innovación presentan mayores niveles de confianza intersectorial y, como consecuencia, menores costos de coordinación en la implementación de proyectos colaborativos.

La tercera condición, menos documentada en la literatura, pero identificada como emergente, es la creación de observatorios de impacto de IA en ecosistemas regionales, con publicación periódica de informes accesibles al público general. Este mecanismo permitiría generar evidencia empírica sobre los efectos distributivos reales de la adopción tecnológica, nutriendo tanto la toma de decisiones de política pública como la investigación académica futura (Toderas, 2025).

Conclusiones

Examinar con detenimiento estudios previos sobre ecosistemas de innovación, economía circular y sistemas artificiales muestra algo claro: la distancia entre teoría y aplicación no surge por falta de datos acumulados, más bien por cómo están organizadas las estructuras que deberían usarlos. Donde se observan progresos reales en prácticas circulares no siempre coincide con lugares de alta densidad investigadora; aquí, en cambio, sobresalen formas de gestión colectiva que convierten ideas abstractas en pasos comunes, a pesar de objetivos dispares entre quienes participan.

Por su parte, la inteligencia artificial intensifica esta situación hasta convertirla en un asunto prioritario: al introducirse en entornos con regulación insuficiente, no corrige desequilibrios ya presentes, más bien los agrava y propulsa. Lo difícil aquí no radica en lo técnico, sino en cómo funcionan las organizaciones. En América Latina, dado que muchas instituciones operan



con recursos ajustados mientras las diferencias sociales arraigadas persisten, el dilema trasciende lo económico para volverse cuestión de reparto justo, inseparable del estudio sobre quién compite y en qué condiciones.

Claramente emerge un doble foco investigativo desde las ideas expuestas: por un lado, diseñar estructuras de gestión conjunta ajustadas al contexto institucional latinoamericano, incluyendo canales claros de responsabilidad y reparto justo de ganancias; por otro, acumular datos concretos sobre cómo realmente afecta la inteligencia artificial a la distribución de recursos en entornos regionales.

Explorar estos frentes con métodos sólidos y atención al entorno local resulta clave hoy día, tanto para avanzar en conocimiento como para orientar decisiones en materia de innovación frente a retos actuales.

Declaración de conflicto de intereses y financiación

“Ninguno”. No existe conflicto de intereses, tampoco financiación.

Declaración sobre el uso de herramientas

Se utilizaron diversas herramientas tecnológicas, para diversos procesos, que se detallan en el mismo escrito y a continuación. Para comprobar ortografía y gramática un editor, para verificar traducción DeepL, ambos alojados en el Word de Microsoft. Para protocolo de búsqueda, selección bibliográfica, gestor bibliográfico Zotero, para análisis de redes *Connected Papers*, *Gephi*.

Referencias

- Abreu, A. (2021). *Innovation ecosystems: A sustainability perspective*. *Sustainability*, 13(4), 1675.
<https://doi.org/10.3390/su13041675>
- Alamandi, M. (2025). *Sustainable innovation management: Balancing economic growth and environmental responsibility*. *Sustainability*, 17(10), 4362.
<https://doi.org/10.3390/su17104362>
- Alka, T. A., Raman, R., y Suresh, M. (2024). Research trends in innovation ecosystem and circular economy. *Discover Sustainability*, 5(1), Article 323.
<https://doi.org/10.1007/s43621-024-00535-5>



- Aryee, R., Kanda, W., Geissdoerfer, M., y Kirchherr, J. (2025). Circular ecosystems: Past, present, and future research directions. *Journal of Industrial Ecology*, 9(4), 1364–1381. <https://doi.org/10.1111/jiec.70061>
- Bauld, S., y Minifie, J. (2025). Innovation ecosystem dynamics: A multi-regional case study analysis of entrepreneurial environments. *International Journal of Business & Management Studies*. <https://doi.org/10.56734/ijbms.v6n7a2>
- Borrero, J. D., y Yousafzai, S. (2024). Circular entrepreneurial ecosystems: A Quintuple Helix Model approach. *Management Decision*, 62(13), 141–177. <https://doi.org/10.1108/MD-08-2023-1361>
- Camilleri, M. A. (2024). Artificial intelligence governance: Ethical considerations and implications for social responsibility. *Expert Systems*, 41(1), Article e13406. <https://doi.org/10.1111/exsy.13406>
- Carayannis, E. G., Barth, T. D., y Campbell, D. F. J. (2012). The Quintuple Helix innovation model: Global warming as a challenge and driver for innovation. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 1(1), Article 2. <https://doi.org/10.1186/2192-5372-1-2>
- Ceddia, A. R., Oricchio, S., Barberio, G., y Innella, C. (2024). A systematic literature review exploring the nexus between circular economy and communities. *Frontiers in Sustainable Cities*, 6, 1404279. <https://doi.org/10.3389/frsc.2024.1404279>
- Chi, Z., Liu, Z., Wang, F., & Osmani, M. (2023). *Driving circular economy through digital technologies: Current research status and future directions*. *Sustainability*, 15(24), 16608. <https://doi.org/10.3390/su152416608>
- Dhayal, K. S., Giri, A. K., Agrawal, R., Agrawal, S., Samadhiya, A., y Kumar, A. (2025). Do the innovative technological advancements foster the green transition pathways for industry 5.0? A perspective toward carbon neutrality. *Benchmarking: An International Journal*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1108/BIJ-04-2024-0330>
- Suchek, N., Filser, M., Fernandes, C. I., & Kraus, S. (2021). *Innovation and the circular economy: A systematic literature review*. *Business Strategy and the Environment*. <https://doi.org/10.1002/bse.2834>
- Surya, D., Rahim, R. K., Hamsal, M., Candra, S., y Gunadi, W. (2025). Mapping the nexus between open innovation and circular economy: A decade of bibliometric evidence. *Frontiers in Sustainability*, 6, Article 1638284. <https://doi.org/10.3389/frsus.2025.1638284>



- Gallego-Schmid, A., López-Eccher, C., Muñoz, E., Salvador, R., Cano-Londoño, N. A., Vetroni Barros, M., Choconta Bernal, D., Mendoza, J. M. F., Nadal, A., & Guerrero, A. B. (2024). Circular economy in Latin America and the Caribbean: Drivers, opportunities, barriers and strategies. *Sustainable Production and Consumption*, 51, 118–136. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.09.006>
- Granstrand, O., y Holgersson, M. (2020). Innovation ecosystems: A conceptual review and a new definition. *Technovation*, 90–91, Article 102098. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2019.102098>
- Khawaja, S., Bhatt, M., Baber, A., & Farooq, U. (2024). *AI governance: A systematic literature review. AI and Ethics*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1007/s43681-024-00653-w>
- Organisation for Economic Co-operation and Development (OECD). (2024). *Evolving with innovation: The 2024 OECD AI principles update*. OECD Publishing. <https://oecd.ai/en/work/evolving-with-innovation-the-2024-oecd-ai-principles-update>
- Pedroza-Zapata, Á. R., y Silva-Flores, M. L. (2020). Ecosistema universitario de ciencia, tecnología, innovación y emprendimiento. *Magis. Revista Internacional de Investigación en Educación*, 12(25), 93–110. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7768728>
- Piqué, J. M., Berbegal-Mirabent, J., & Etzkowitz, H. (2021). *Challenges for innovation and sustainable development in Latin America: The significance of institutions and human capital. Sustainability*, 13(7), 4077. <https://doi.org/10.3390/su13074077>
- Rua Hernandez, J. C., Villa-Enciso, E., Cardona-Acevedo, S., Valencia, J., & Velásquez Salas, S. (2025). *Smart innovation for a circular economy: A systematic review of emerging trends and the future of AI in the sustainable economy. Sustainability*, 17(13), 5793. <https://doi.org/10.3390/su17135793>
- Santos, J. L. S., Torkomian, A. L. V., & Wunsch Filho, V. (2024). *Impacts of digital entrepreneurial ecosystems on sustainable development: Insights from Latin America. Sustainability*, 16(18), 7928. <https://doi.org/10.3390/su16187928>
- Secundo, G., Spilotro, C., Gast, J., y Corvello, V. (2025). The transformative power of artificial intelligence within innovation ecosystems: A review and a conceptual framework. *Review of Managerial Science*, 19, 2697–2728. <https://doi.org/10.1007/s11846-024-00828-z>



-
- Shkarupeta, E., y Babkin, A. (2024). Eco-innovative development of industrial ecosystems based on the quintuple helix. *International Journal of Innovation Studies*, 8(3), 273–286. <https://doi.org/10.1016/j.ijis.2024.04.002>
- Toderas, M. (2025). *Artificial intelligence for sustainability: A systematic review and critical analysis*. *Sustainability*, 17(17), 8049. <https://doi.org/10.3390/su17178049>
- Trevisan, A. H., Lobo, A., Guzzo, D., Gomes, L. A. de V., y Mascarenhas, J. (2023). Barriers to employing digital technologies for a circular economy: A multi-level perspective. *Journal of Environmental Management*, 332, Article 117437. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117437>
- Zighan, S. (2025). *Barriers to circular economy transitions in emerging markets: Insights from the GCC and implications for sustainable development*. *Sustainable Development*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1002/sd.70177>