



INADI

Instituto para el Desarrollo Industrial
y la Transformación Digital A.C.

La voz
del INADI Núm. 20

Integración de tecnologías 4.0 en la manufactura sostenible

Un análisis sistemático de literatura de la transformación digital en la cadena de valor mediante gemelos digitales y monitoreo predictivo

Agustín Tiburcio Sánchez | abril, 2025



I. Introducción

La Industria 4.0 representa uno de los avances más significativos en la evolución de los sistemas de manufactura, caracterizada por la integración de tecnologías digitales avanzadas que están transformando fundamentalmente los procesos productivos (Ding, Hernández y Jané 2023). La convergencia entre la digitalización industrial y la sostenibilidad ha emergido como una respuesta crucial ante los desafíos ambientales globales y la creciente presión por optimizar recursos en las cadenas de valor manufactureras (Jena, Mishra y Moharana 2024) (Mardani y Saberi 2024).

La manufactura sostenible, como concepto, ha evolucionado desde prácticas básicas de reducción de desperdicios hacia un enfoque holístico que abarca toda la cadena de valor (Jena, Mishra y Moharana 2024) (Qureshi, y otros 2023). Esta evolución se ha acelerado con la llegada de las tecnologías 4.0, que ofrecen nuevas posibilidades para monitorear, optimizar y transformar los procesos productivos (Selicati y Cardinale 2021). En este contexto, tecnologías como los gemelos digitales y los sistemas de monitoreo predictivo emergen como habilitadores claves para la transformación digital de la cadena de valor manufacturera.

Los gemelos digitales, al crear réplicas virtuales de sistemas físicos, permiten la simulación, optimización y predicción de comportamientos en tiempo real, facilitando la toma de decisiones basada en datos y la optimización de procesos (Agarwal, Sahai y Sahay 2024) (Abouzid y Saidi 2023). Esta tecnología, combinada con el monitoreo predictivo, no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también contribuye significativamente a la sostenibilidad al permitir la anticipación de fallos, la reducción de desperdicios y la optimización de los riesgos de producción (Weerapura, y otros 2023).

En este contexto, la implementación de estas tecnologías avanzadas representa un puente fundamental entre la digitalización industrial y los objetivos de sostenibilidad, permitiendo una transición más efectiva hacia modelos de producción más responsables y eficientes (Müge, y otros 2024). Las tecnologías de la Industria 4.0 actúan como catalizadores para la transición hacia estos modelos más sostenibles (Huang, y otros 2021). La integración de estas tecnologías no solo mejora la eficiencia operativa, sino que también facilita la implementación de prácticas sostenibles a lo largo de toda la cadena de valor (Martínez-Olvera 2022).

El impacto potencial de esta convergencia tecnológica se extiende más allá de la optimización de procesos individuales. La capacidad de las tecnologías 4.0 para facilitar la conectividad y la colaboración entre diferentes actores de la cadena de valor permite la creación de ecosistemas industriales más sostenibles (Yildirim y Tuncalp 2023) (Ji, y otros 2024) (Strazzullo, y otros 2024).

En cuanto a los estudios que se han realizado sobre el tema, autores como Naseem y Yang (2021), investigaron el impacto de la Industria 4.0 en la sostenibilidad de la cadena de suministro mediante una revisión sistemática de literatura. Sus hallazgos sugieren que las tecnologías de la Industria 4.0 tienen un impacto significativo en la sostenibilidad de las redes de suministro, proponiendo un marco que identifica los efectos específicos de estas tecnologías en la cadena de valor. En sus futuras líneas de investigación sugieren profundizar en el estudio de otras tecnologías emergentes de la Industria 4.0 y su rol específico en los diversos procesos de la cadena de suministro, particularmente en aspectos relacionados con la sostenibilidad.

Por lo tanto, a pesar del creciente interés en este campo, es necesario comprender las tendencias y perspectivas desde las cuales se ha abordado la integración de tecnologías 4.0, particularmente los gemelos digitales y el monitoreo predictivo, en la cadena de valor manufacturera orientada hacia la sostenibilidad. Este estudio realiza un análisis bibliométrico para mapear y caracterizar la evolución de la investigación en este campo, identificando las principales corrientes de conocimiento y áreas de desarrollo.

Por lo tanto, los objetivos específicos de esta investigación son analizar la estructura intelectual y las redes de conocimiento en torno a la implementación de estas tecnologías para la sostenibilidad manufacturera, e identificar las principales líneas de investigación y campos emergentes en la transformación digital de entornos de manufactura sostenible.

Esta investigación contribuye al campo proporcionando un mapeo sistemático de la producción científica en la intersección entre las tecnologías 4.0 y la manufactura sostenible, ofreciendo una visión integral de la evolución del conocimiento y las áreas de oportunidad para futuras investigaciones en la transformación digital de la industria manufacturera hacia modelos más sostenibles.

II. Metodología

Esta sección establece las bases metodológicas respecto a las herramientas y procedimientos implementados para alcanzar los objetivos planteados en el desarrollo de la investigación. Se define la base de datos analizada, los criterios y términos de búsqueda empleados, así como las herramientas utilizadas para el análisis de datos y la generación del mapeo de redes de la producción científica.

La unidad de análisis seleccionada fue *Web of Sciences*, considerando su trascendencia a nivel internacional como una de las plataformas más reconocidas dentro de la comunidad científica, debido a que integra el indicador de factor de impacto *Journal Citation Report (JCR)* (Goyanes & Demeter, 2020). La exportación de metadatos de dicha plataforma permite la

ejecución de análisis bibliométricos sobre campos de estudio específicos (Kipper et al., 2019).

La revisión de literatura constituye uno de los enfoques más relevantes dentro de la investigación científica, facilitando el mapeo de temas teóricos y la identificación de brechas de conocimiento (Snyder, 2019). Por ello, se realizó una búsqueda exhaustiva de fuentes de información primaria orientada hacia la producción científica relacionada con Industria 4.0 y manufactura inteligente en el contexto de la sostenibilidad y cadena de valor.

El criterio de búsqueda empleado en Web of Science fue: (*"Industry 4.0" OR "Fourth Industrial Revolution" OR "Smart Manufacturing" OR "Digital Manufacturing"*) AND (*"Smart Factory" OR "Digital Twin*" OR "Predictive Maintenance" OR "Real-time Monitor*"*) AND (*"Value Chain Integration" OR "Supply Chain Resilience" OR "Manufacturing Sustainability" OR "Green Manufacturing" OR "Sustainable Operations" OR "Circular Economy" OR "Energy Efficiency"*). La búsqueda se realizó considerando todas las áreas del conocimiento dentro de la plataforma, obteniendo un total de 125 publicaciones.

La información se exportó en formato *.bib* para su procesamiento en el software estadístico "R", específicamente mediante la paquetería *bibliometrix*, frecuentemente utilizada en cienciometría para la obtención eficiente de indicadores bibliométricos (Aria y Cuccurullo 2017). Los indicadores analizados incluyen: producción científica anual, revistas más relevantes, principales investigadores contribuyentes, documentos más citados y términos más frecuentes relacionados con el tema de estudio.

Adicionalmente, se empleó el software *VOSviewer* para el mapeo de redes de contribución por países y enlaces terminológicos. Esta herramienta es ampliamente utilizada en estudios bibliométricos ya que genera mapas de redes que visualizan la estructura e interrelaciones entre elementos como autores, revistas, universidades y países (Van Eck y Waltman 2010) facilitando la comprensión y análisis de tendencias de investigación (Hallinger y Kovačević 2019).

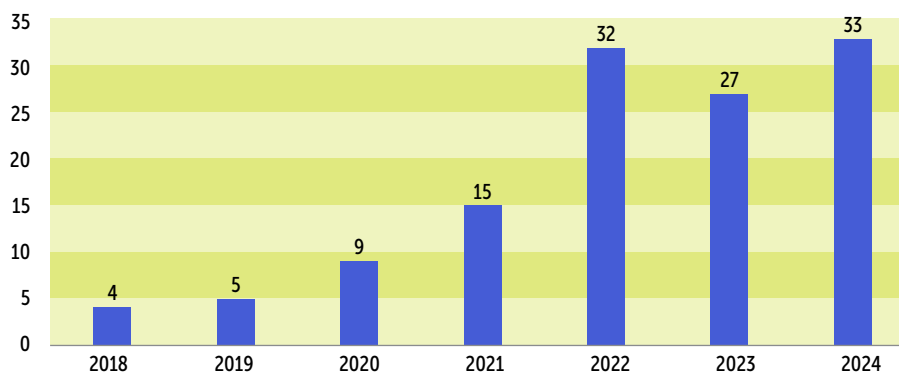
III. Resultados

Los resultados obtenidos proporcionan una visión integral del desarrollo de la literatura científica, abarcando múltiples dimensiones como la producción científica anual, las revistas más influyentes, los autores más citados, la distribución geográfica de la investigación y las principales temáticas abordadas. El análisis comprende un total de 125 documentos publicados entre 2018 y 2024, período que refleja la naturaleza emergente y la creciente relevancia de esta área de investigación. A continuación, se presentan los hallazgos detallados organizados por diferentes indicadores bibliométricos, que en conjunto permiten comprender la estructura y dinámica del conocimiento científico en este campo.

PRODUCCIÓN ANUAL CIENTÍFICA

La evolución de la producción científica en el período analizado (2018-2024) muestra una tendencia claramente ascendente (Figura 1), reflejando el creciente interés de la comunidad académica en la intersección entre Industria 4.0, manufactura inteligente y sostenibilidad. Partiendo de una modesta producción de 4 artículos en 2018, se observa un crecimiento inicial gradual con 5 publicaciones en 2019 y 9 en 2020. El año 2021 marca un punto de inflexión significativo con 15 artículos, seguido por un notable incremento en 2022 que más que duplicó la producción del año anterior, alcanzando 32 publicaciones. Aunque 2023 experimentó un ligero descenso con 27 artículos, la tendencia se recuperó fuertemente en 2024 con 33 publicaciones, estableciendo el máximo histórico en el período estudiado. Este patrón de crecimiento, particularmente pronunciado a partir de 2021, sugiere una maduración del campo de investigación y un reconocimiento cada vez mayor de la importancia de integrar tecnologías de Industria 4.0 con objetivos de sostenibilidad y optimización de la cadena de valor.

FIGURA 1. Evolución sobre la producción científica



FUENTE: Elaboración propia a partir de datos extraídos de Web of Science (2024)

IMPACTO DE LAS REVISTAS

El análisis del impacto de las revistas, medido tanto por el número de publicaciones como por las citas recibidas (Tabla 1), revela patrones interesantes en la difusión del conocimiento en este campo. El *"Journal of Cleaner Production"* destaca significativamente con 552 citas, y aunque ocupa el segundo lugar en número de publicaciones (8 artículos), su alto índice de citación sugiere un impacto sustancial y una notable influencia en el campo. De manera similar, el *"International Journal of Production Research"*, con 345 citas y 5 publicaciones, demuestra una alta relevancia en términos de impacto por artículo.

Un caso particularmente interesante es el de la revista *"Sustainability"*, que lidera en número de publicaciones con 11 artículos y mantiene una posición significativa en citas (308 citas), lo que confirma su papel central en la difusión de investigación sobre la integración de tecnologías 4.0 y sostenibilidad manufacturera.

Es notable observar que algunas revistas con menor número de publicaciones han alcanzado un impacto considerable en términos de citas. Por ejemplo, *"Procedia CIRP"* (237 citas), *"IEEE Access"* (173 citas), y *"Computers in Industry"* (157 citas) no aparecen entre las revistas con mayor número de publicaciones, pero su alto número de citas sugiere que han publicado artículos particularmente influyentes o seminales en el campo. De manera similar, el *"International Journal of Production Economics"* y *"Technological Forecasting and Social Change"* han generado un impacto significativo a pesar de no estar entre las revistas con mayor producción.

Esta disparidad entre el volumen de publicaciones y el número de citas sugiere que la influencia en el campo no está necesariamente correlacionada con la cantidad de artículos publicados, sino con la calidad y relevancia de las contribuciones individuales. Además, la presencia destacada de revistas especializadas tanto en sostenibilidad como en producción industrial y tecnología refuerza la naturaleza interdisciplinaria de la investigación en este campo.

Esta distribución de publicaciones sugiere que la integración de Industria 4.0 y sostenibilidad está siendo abordada principalmente desde perspectivas orientadas a la sostenibilidad y la producción, con un importante componente de aplicación tecnológica y gestión industrial.

TABLA 1 Producción científica e impacto de las revistas más relevantes

REVISTA	ND	REVISTA	NC
Sustainability	11	Journal of Cleaner Production	552
Journal of Cleaner Production	8	International Journal of Production Research	345
International Journal of Production Research	5	Sustainability	308
Applied Science-Basel	4	Procedia CIRP	237
Journal of Manufacturing Systems	4	Journal of Manufacturing Systems	217
Processes	4	IEEE Access	173
Advanced Engineering Informatics	3	Computers in Industry	157
IEEE Transactions on Industrial Informatics	3	International Journal of Production Economics	151
Revista Gestao & Tecnologia – Journal of Management Technology	3	IEEE Transactions on Industrial Informatics	137
Computers & Industrial Engineering	2	Technological Forecasting and Social Change	136

NOTA: ND = Número de documentos; NC = Número de citas

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos extraídos de Web of Science (2024)

PAÍS DE AUTOR DE CORRESPONDENCIA

El análisis de la distribución geográfica de las publicaciones revela patrones significativos en la producción científica y colaboración internacional (Figura 2). China emerge como el líder en producción con 16 artículos, distribuidos entre 9 publicaciones de un solo país (SCP - Single Country Publications) y 7 colaboraciones internacionales (MCP - Multiple Country Publications), lo que demuestra un equilibrio entre la investigación nacional y las colaboraciones internacionales.

Italia y Estados Unidos conforman un segundo grupo de alta producción con 14 y 13 artículos respectivamente. Italia mantiene una distribución similar a China (9 SCP, 5 MCP), mientras que Estados Unidos muestra una marcada preferencia por publicaciones individuales con 11 SCP y solo 2 MCP, sugiriendo un enfoque más localizado en su investigación.

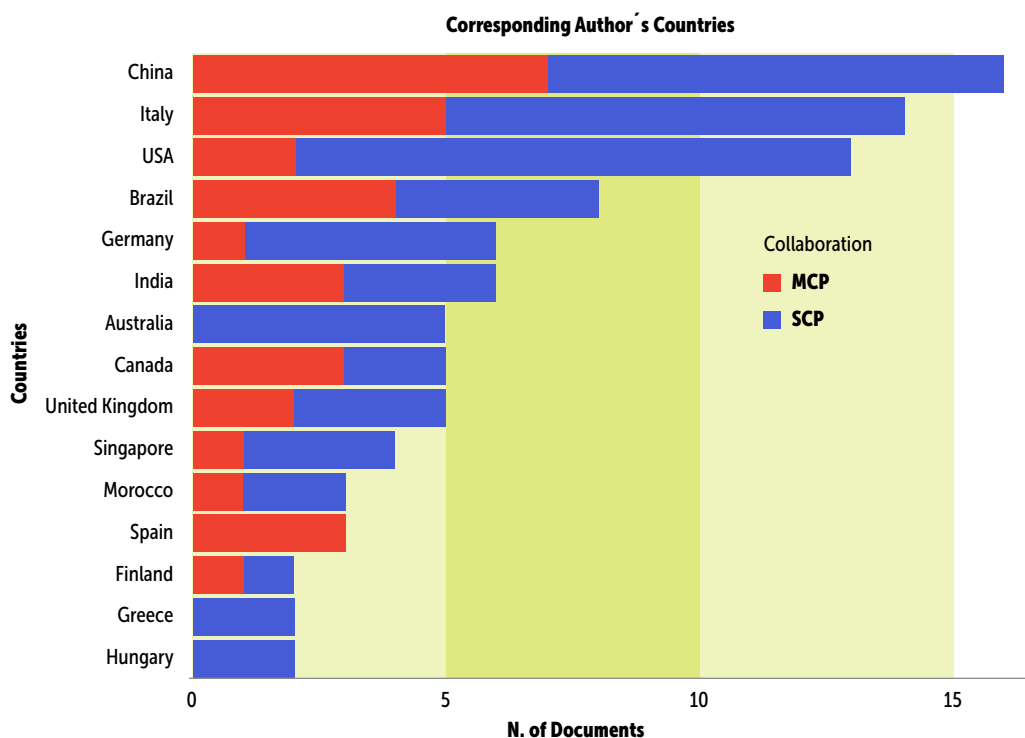
Un grupo intermedio incluye a Brasil (8 artículos, con una distribución equitativa 4 SCP, 4 MCP), seguido por Alemania e India con 6 artículos cada uno. Es notable que Australia, con 5 publicaciones, todas son SCP, indicando un enfoque completamente doméstico en su investigación.

Los países con menor producción (entre 2 y 3 artículos) como Finlandia, Grecia y Hungría, muestran diferentes patrones de colaboración, donde algunos mantienen exclusivamente publicaciones nacionales mientras otros participan en colaboraciones internacionales.

Esta distribución geográfica sugiere que la investigación en tecnologías 4.0 y manufactura sostenible está liderada principalmente por potencias económicas y tecnológicas, con diferentes enfoques en términos de colaboración internacional. La presencia de países tanto desarrollados como

emergentes indica un interés global en la temática, aunque con diferentes niveles de internacionalización en la investigación.

FIGURA 2. País de autor de correspondencia



NOTA: SCP (Single Country Publications) = Publicaciones de un solo país; MCP (Multiple Country Publications) = Publicaciones en colaboración con múltiples países.

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos extraídos de Web of Science (2024)

DOCUMENTOS MAS CITADOS

Para profundizar en el impacto y la relevancia de las investigaciones en el campo de la Industria 4.0 y la manufactura sostenible (Tabla 2), se analizaron los documentos más influyentes según su número de citas. Esta métrica permite identificar las contribuciones seminales y los trabajos que han tenido mayor influencia en la configuración del campo de estudio. La siguiente tabla presenta los diez documentos más citados, destacando sus autores, revistas de publicación y el número total de citas recibidas, lo que proporciona una visión clara de las investigaciones que han sido fundamentales en el desarrollo de este campo de estudio.

TABLA 2. Documentos más citados en el campo de estudio

AUTOR PRINCIPAL Y AÑO	REVISTA	DOCUMENTO	TOTAL DE CITAS
Oztemele (2020)	<i>Journal of Intelligent Manufacturing</i>	<i>Literature review of Industry 4.0 and related technologies</i>	983
Li (2018)	<i>Technological Forecasting and Social Change</i>	<i>China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0"</i>	587
Bressanelli (2018)	<i>Sustainability</i>	<i>Exploring How Usage-Focused Business Models Enable Circular Economy through Digital Technologies</i>	310
Dolgui (2020)	<i>International Journal of Production Research</i>	<i>Reconfigurable supply chain: the X-network</i>	258
Zheng (2019)	<i>Advanced Engineering Informatics</i>	<i>A survey of smart product-service systems: Key aspects, challenges and future perspectives</i>	208
Khan (2021)	<i>Journal of Cleaner Production</i>	<i>Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives</i>	189
Adel (2022)	<i>Journal of Cloud Computing</i>	<i>Future of industry 5.0 in society: human-centric solutions, challenges and prospective research areas</i>	175
Borowski (2021)	<i>Energies</i>	<i>Digitization, Digital Twins, Blockchain, and Industry 4.0 as Elements of Management Process in Enterprises in the Energy Sector</i>	173
Jamwal (2021)	<i>Applied Sciences</i>	<i>Industry 4.0 Technologies for Manufacturing Sustainability: A Systematic Review and Future Research Directions</i>	162
Aheleroff (2020)	<i>Advanced Engineering Informatics</i>	<i>IoT-enabled smart appliances under industry 4.0: A case study</i>	148

FUENTE: Elaboración propia a partir de datos extraídos de Web of Science (2024)

El análisis de los documentos más citados revela las contribuciones más influyentes en el campo de estudio. El trabajo de Oztemele, publicado en el *Journal of Intelligent Manufacturing*, destaca significativamente con 983 citas, estableciéndose como el referente más importante en la revisión de la Industria 4.0 y tecnologías relacionadas. Este alto número de citas sugiere su papel fundamental como marco teórico para investigaciones posteriores.

En segundo lugar, la investigación de Li en *Technological Forecasting and Social Change*, con 587 citas, aporta una perspectiva comparativa crucial entre las iniciativas "Made-in-China 2025" e "Industria 4.0", evidenciando



la importancia de los estudios sobre políticas industriales nacionales en el contexto de la transformación digital.

Un tercer grupo de documentos, con citas entre 200 y 400, incluye los trabajos de Bressanelli (310 citas) sobre modelos de negocio y economía circular, y Dolgui (258 citas) sobre cadenas de suministro reconfigurables, lo que refleja el creciente interés en la integración de sostenibilidad y flexibilidad en las operaciones industriales.

Los documentos restantes, con citas entre 148 y 208, abordan temas diversos pero interconectados, desde sistemas producto-servicio inteligentes (Zheng, 208 citas) hasta aplicaciones específicas de IoT (Aheleroff, 148 citas). Es notable la presencia de múltiples revisiones sistemáticas y estudios de mapeo, lo que sugiere un campo en constante evolución que requiere síntesis periódicas del conocimiento acumulado.

La diversidad de revistas y temas en los artículos más citados refleja la naturaleza multidisciplinaria del campo, abarcando aspectos tecnológicos, sostenibles, económicos y operativos de la Industria 4.0.

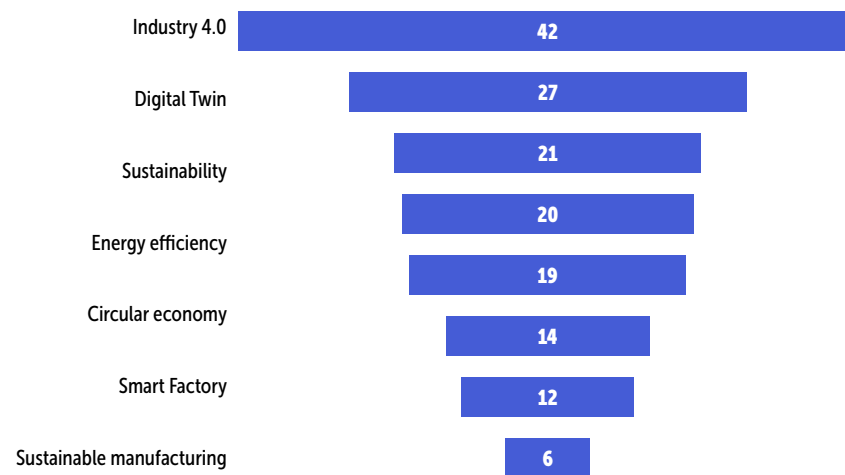
TÉRMINOS MÁS FRECUENTES

El análisis de frecuencia de términos clave (Figura 2), revela las temáticas dominantes y los conceptos fundamentales en el campo de investigación. "Industry 4.0" emerge como el término más frecuente con 42 apariciones, lo que confirma su rol central como paradigma tecnológico y marco conceptual predominante en la literatura analizada. En segundo lugar, "Digital Twin" aparece 27 veces, destacando la importancia de esta tecnología específica como herramienta clave en la transformación digital de la manufactura.

La sostenibilidad se manifiesta a través de varios términos relacionados: "Sustainability" (21 apariciones), "Energy efficiency" (20 apariciones), "Circular economy" (19 apariciones) y "Sustainable manufacturing" (6 apariciones). Esta diversidad de términos relacionados con la sostenibilidad, que en conjunto suman 66 apariciones, sugiere un fuerte énfasis en los aspectos ambientales y de sostenibilidad en la investigación actual.

Los conceptos relacionados con la manufactura avanzada también tienen una presencia significativa, con "Smart Manufacturing" (14 apariciones) y "Smart Factory" (12 apariciones) complementando el marco tecnológico de la Industria 4.0. Esta distribución de términos sugiere una clara integración entre los conceptos de transformación digital, sostenibilidad y manufactura avanzada, reflejando la naturaleza interdisciplinaria del campo de estudio.

FIGURA 2. Frecuencia de términos clave de la literatura analizada



FUENTE: Elaboración propia a partir de datos extraídos de Web of Science (2024)

NUBE DE TÉRMINOS CLAVE

La nube de términos clave (Figura 3), proporciona una representación visual de los conceptos más relevantes en la literatura analizada. Los términos con mayor prominencia visual reflejan su frecuencia e importancia en el campo de estudio. Al centro de la visualización, destacan términos fundamentales como "Industry 4.0", "big data", "management" y "framework", lo que indica su rol central en la investigación.

La presencia destacada de "digital twin" y "cyber-physical systems" refleja las tecnologías habilitadoras clave de la Industria 4.0. La sostenibilidad se manifiesta a través de términos como "circular economy", "sustainability" y "energy efficiency", confirmando la fuerte orientación hacia aspectos ambientales en la investigación.

Es notable la presencia de términos relacionados con la gestión y optimización, como "performance", "optimization", "design" y "implementation", sugiriendo un enfoque práctico en la aplicación de estas tecnologías. La aparición de términos como "future", "challenges" y "technologies" indica una orientación hacia la prospectiva y el análisis de obstáculos en la implementación.

Términos como "blockchain", "internet of things" y "artificial intelligence" representan tecnologías específicas que complementan el ecosistema de la Industria 4.0, mientras que "supply chain" y "supply chain management" reflejan la importancia de la gestión de la cadena de suministro en este contexto.

Esta visualización confirma la naturaleza multidimensional del campo, donde convergen aspectos tecnológicos, de gestión, sostenibilidad y cadena de suministro en el contexto de la transformación digital de la manufactura.

FIGURA 3. Nube de términos clave



FUENTE: Elaboración propia a partir de datos extraídos de Web of Science (2024)

TEMAS DE TENDENCIA

El análisis de tendencias temáticas (Figura 4), muestra la evolución temporal y la frecuencia de los temas clave en el campo de estudio durante el período 2020-2024. Los términos se pueden agrupar en tres períodos distintos:

Temas emergentes (2024):

- “Industry 4.0”, “circular economy” y “challenges” aparecen como los temas más recientes, reflejando el enfoque actual en la implementación de tecnologías avanzadas y su integración con principios de economía circular, así como el reconocimiento de los desafíos asociados.

Temas de desarrollo intermedio (2022):

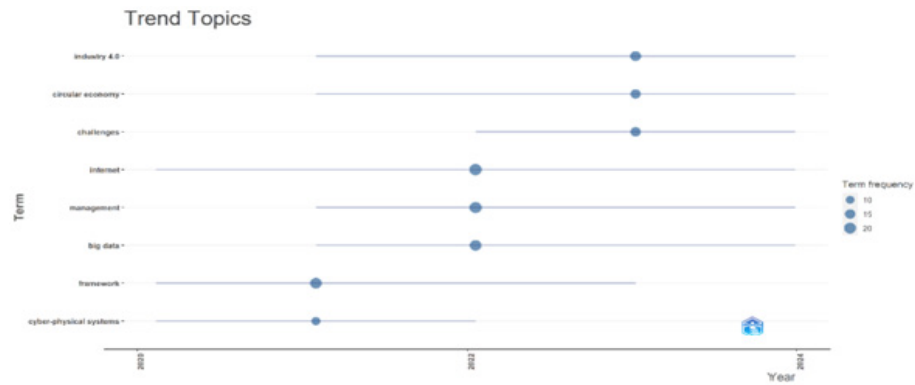
- “Internet”, “management” y “big data” emergen en este período, indicando una fase de maduración en la que la atención se centró en aspectos de gestión y el aprovechamiento de datos masivos.

Temas fundacionales (2020):

- “Framework” y “cyber-physical systems” aparecen como los temas más tempranos, estableciendo las bases conceptuales y tecnológicas del campo.

Esta progresión temporal sugiere una evolución desde los fundamentos tecnológicos hacia aplicaciones más prácticas y la consideración de aspectos de sostenibilidad, con un énfasis creciente en los desafíos de implementación.

FIGURA 4. Temas de tendencia



FUENTE: Elaboración propia a partir de datos extraídos de Web of Science (2024)

RED DE TÉRMINOS CLAVE

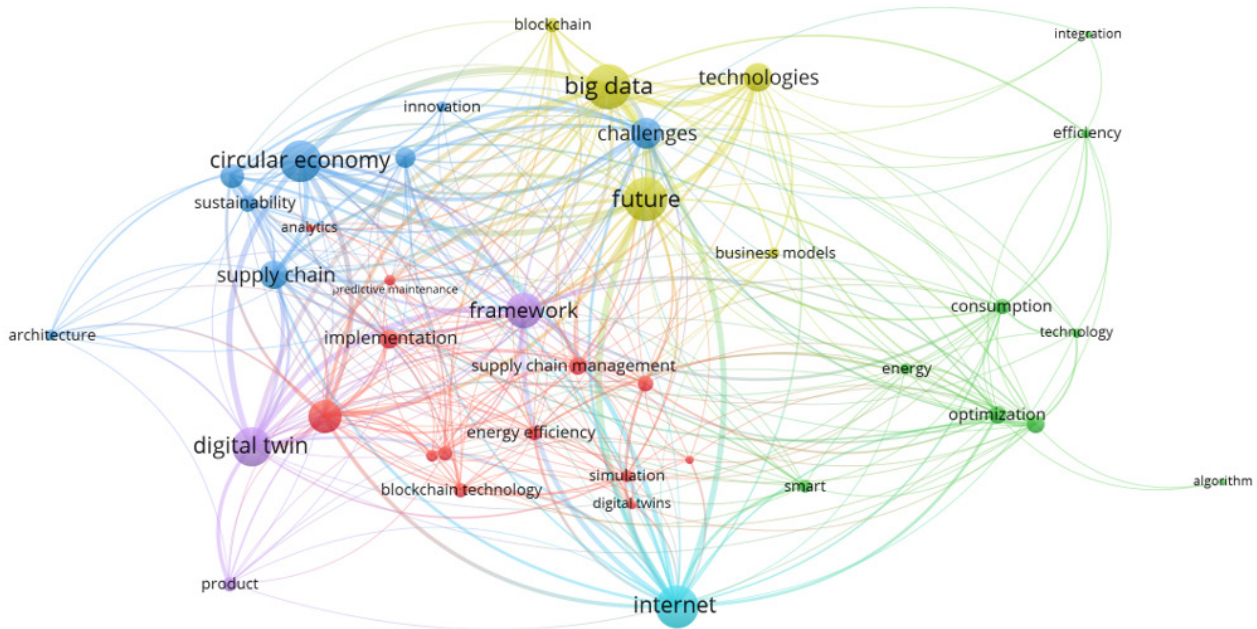
La visualización de la red de términos clave (Figura 5) revela cuatro clusters principales que representan diferentes dimensiones de investigación en el campo, mostrando tanto la interconexión como la especialización de diferentes áreas temáticas:

- Cluster 1 - Tecnologías habilitadoras y gestión de cadena de suministro. Este cluster, representado principalmente por *"digital twin"* como nodo central, agrupa las tecnologías fundamentales de la Industria 4.0 y su aplicación en la cadena de suministro. La fuerte interconexión entre gemelos digitales, sistemas ciber-físicos y mantenimiento predictivo sugiere un enfoque integrado en la implementación de estas tecnologías para la gestión y optimización de operaciones. La presencia de *"supply chain management"* indica la aplicación práctica de estas tecnologías en la gestión de la cadena de suministro.
- Cluster 2 - Eficiencia operacional y optimización, este cluster enfatiza la dimensión operativa de la transformación digital. La agrupación de términos como *"efficiency"*, *"optimization"* y *"smart"* sugiere un enfoque en la mejora del desempeño operacional mediante tecnologías inteligentes. La presencia de *"algorithm"* y *"technology"* indica la base técnica para lograr estas mejoras.
- Cluster 3 - Sostenibilidad e innovación. Este cluster, donde destacan *"circular economy"*, *"sustainability"* e *"Industry 4.0"*, representa la integración de objetivos de sostenibilidad con la transformación digital. La inclusión de *"innovation"* y *"challenges"* sugiere un enfoque en la superación de obstáculos para alcanzar una manufactura más sostenible mediante la innovación tecnológica.
- Cluster 4 - Modelos de negocio y tecnologías emergentes. El cluster más chico pero significativo se centra en la perspectiva estratégica y

futura del campo. La combinación de "big data", "blockchain" y "business models" indica la emergencia de nuevos modelos de negocio basados en tecnologías disruptivas.

La distribución y conexiones entre clusters sugiere una fuerte interrelación entre aspectos tecnológicos, operacionales y sostenibles, donde los gemelos digitales actúan como un punto focal de integración. Las conexiones entre clusters indican que la transformación digital de la manufactura requiere un enfoque holístico que considere simultáneamente la implementación tecnológica, la eficiencia operacional, la sostenibilidad y la innovación en modelos de negocio.

FIGURA 5. Red de términos clave



V. Conclusiones

La investigación sobre la integración de tecnologías 4.0 en la manufactura sostenible, particularmente enfocada en gemelos digitales y monitoreo predictivo, presenta patrones y tendencias significativas que permiten extraer conclusiones relevantes sobre el estado actual y la evolución del campo.

El análisis de la producción científica revela un crecimiento sustancial en las publicaciones, especialmente desde 2021, con un incremento notable que alcanza su punto máximo en 2024 con 33 publicaciones. Esta tendencia ascendente refleja el creciente interés y la maduración del campo, particularmente en la convergencia entre tecnologías digitales y objetivos de sostenibilidad manufacturera.

La distribución geográfica de la investigación muestra un liderazgo de China, Italia y Estados Unidos, con diferentes patrones de colaboración internacional. Mientras China e Italia mantienen un equilibrio entre publicaciones nacionales e internacionales, Estados Unidos muestra una preferencia por la investigación local. Esta diversidad geográfica sugiere un interés global en la temática, aunque con diferentes enfoques y niveles de colaboración internacional.

El análisis de las revistas más influyentes revela una concentración significativa en publicaciones especializadas en sostenibilidad y producción industrial, con el Journal of Cleaner Production y Sustainability liderando en términos de impacto y producción respectivamente. Esta distribución sugiere una fuerte orientación hacia la integración de aspectos ambientales y tecnológicos en la transformación digital de la manufactura.

Los documentos más citados muestran una evolución desde revisiones fundamentales de la Industria 4.0 hacia aplicaciones específicas en sostenibilidad y cadena de suministro. El alto impacto de trabajos relacionados con economía circular y cadenas de suministro reconfigurables indica un creciente interés en la aplicación práctica de tecnologías 4.0 para objetivos de sostenibilidad.

El análisis de términos clave y sus relaciones revela cuatro clusters principales de investigación: tecnologías habilitadoras y gestión de cadena de suministro, eficiencia operacional y optimización, sostenibilidad e innovación, y modelos de negocio emergentes. Esta estructura sugiere un campo multidimensional donde los gemelos digitales actúan como punto focal de integración entre diferentes aspectos de la transformación digital sostenible.

Las tendencias temáticas identificadas indican una evolución desde aspectos fundamentales hacia aplicaciones más prácticas y consideraciones de sostenibilidad. Los temas emergentes en 2024 sugieren un enfoque creciente en la implementación de tecnologías avanzadas y su integración con principios de economía circular, reconociendo simultáneamente los desafíos asociados.



Como implicaciones para futuras investigaciones, se sugiere profundizar en la integración práctica de gemelos digitales y monitoreo predictivo en contextos específicos de manufactura sostenible. Asimismo, resulta fundamental explorar las barreras y facilitadores para la implementación efectiva de estas tecnologías en diferentes contextos geográficos y sectoriales, considerando las particularidades y desafíos únicos de cada entorno. Es igualmente importante investigar el impacto cuantificable de estas tecnologías en indicadores de sostenibilidad manufacturera, lo que permitiría una evaluación más precisa de su contribución real a los objetivos de sostenibilidad. Finalmente, se recomienda desarrollar marcos de implementación que consideren simultáneamente aspectos tecnológicos, operacionales y de sostenibilidad, asegurando un enfoque holístico en la transformación digital de la manufactura sostenible.

En síntesis, este análisis bibliométrico no solo proporciona una comprensión profunda del estado actual de la investigación en la integración de tecnologías 4.0 en la manufactura sostenible, sino que también destaca la naturaleza dinámica y evolutiva del campo. La creciente convergencia entre digitalización y sostenibilidad, evidenciada a través de los patrones de publicación, clusters temáticos y redes de colaboración, sugiere que estamos en un momento crucial para la transformación de la manufactura. A medida que la industria continúa avanzando hacia modelos más sostenibles y digitalmente integrados, la investigación en este campo seguirá siendo fundamental para guiar esta transformación, haciendo que los hallazgos y direcciones futuras identificadas en este estudio sean particularmente valiosos para investigadores, profesionales y tomadores de decisiones en el ámbito de la manufactura sostenible.



Agustín Tiburcio Sánchez
Director Nacional del Comité de Tecnologías de la Información.

Ingeniero en Sistemas Electrónicos por el Tecnológico de Monterrey campus Toluca y tiene estudios de Maestría en Inteligencia Artificial por la Universidad Veracruzana. Tiene más de 29 años de experiencia en las áreas de sistemas, tecnología e industria maquiladora. Entre otras, ha sido administrador del departamento de sistemas en la empresa Gentel y Gerente de sistemas en Falcomex (Irvin Automotive), líder de sistemas en Siemens VDO en Monterrey Nuevo León, gerente senior de sistemas en Alcom Electrónicos de México en Reynosa Tamaulipas, director senior de sistemas en ARC Automotriz. Director de desarrollo de negocios en Transtelco para la zona Noroeste y director comercial a nivel nacional de México Industry.

ABRIL 2025