
◆

Modelo de sinergia sostenible para la manufactura aditiva:

Un estudio de análisis bibliométrico

Sebastián Núñez Chavarro⁹

Viridiana Humarán Sarmiento¹⁰

Luis Miguel Ballesteros Ospina¹¹

⁹Ingeniero Industrial y Tecnólogo en Mecatrónica Industrial. Maestrante en Gestión por Procesos para la transformación Digital. Docente universitario e Investigador del grupo Anudamientos de la Facultad de Ciencias Sociales y Humanas adscrita a la Institución Universitaria Antonio José Camacho, Colombia. snunez@admon.uniajc.edu.co

¹⁰ Doctoranda en Ciencia y Tecnología en Ingeniería Industrial y Manufactura Avanzada. Investigadora y docente titular del Instituto Técnico Superior de Guasave, México. viridiana.hs@guasave.tecnm.mx

¹¹Ingeniero mecatrónico y Doctorando con Énfasis en Ingeniería Industrial y Manufactura Avanzada. Investigador científico – Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial – CIDESI, México. l.ballesteros@posgrado.cidesi.edu.mx

Resumen

El presente estudio propone un modelo de sinergia sostenible que integra la Manufactura Aditiva (MA), el Lean Manufacturing (LM) y la Cadena de Suministro Verde (CSV) en el marco de la Industria 4.0, como respuesta a los retos de sostenibilidad industrial. El problema que se aborda es la fragmentación en la producción científica y la limitada articulación de estas tres áreas para enfrentar los desafíos ambientales y de eficiencia en los procesos productivos. Se desarrolló con un enfoque descriptivo-exploratorio de tipo aplicado, sustentado en un análisis bibliométrico de literatura científica publicada entre 2000 y 2025. Se emplearon herramientas como Scopus Analytics, VOSviewer y Excel, complementadas con algoritmos de recomendación (Research Rabbit) e inteligencia artificial para el análisis de contenido. El corpus final estuvo conformado por 25 documentos científicos en las áreas de ingeniería, ciencia de materiales, ciencias ambientales y manufactura aditiva.

Los hallazgos muestran que el 96 % de las publicaciones emergen después de 2015, con predominio europeo (92 %) y ausencia de producción latinoamericana. El campo presenta 115 autores únicos, con solo un autor recurrente, reflejando alta fragmentación. Se identificó que la manufactura aditiva constituye el eje central de investigación, fuertemente asociada al reciclaje de materiales y la economía circular, aunque con escasa integración a LM y CSV. El modelo propuesto articula cuatro pilares que permiten reducir entre un 15 % y 30 % los impactos ambientales, mientras optimizan la eficiencia operativa.

Palabras clave

manufactura aditiva, economía circular, lean manufacturing, cadena de suministro verde, sostenibilidad industrial, industria 4.0

Introducción

La Manufactura Aditiva ha emergido como parte de las tecnologías disruptivas de la Industria 4.0, revolucionando la manera en que concebimos y ejecutamos los procesos

de fabricación. A diferencia de los métodos tradicionales de manufactura sustractiva, que se caracterizan por la remoción de material para obtener la forma deseada, la manufactura aditiva construye objetos tridimensionales capa por capa, incorporando únicamente el material necesario para la geometría final. Esta característica fundamental representa una oportunidad para repensar los paradigmas de producción bajo criterios de sostenibilidad y eficiencia de recursos.

En el contexto actual, donde la presión ambiental y la escasez de recursos naturales plantean desafíos críticos para la continuidad de los modelos productivos tradicionales, la convergencia entre tecnologías emergentes y principios de sostenibilidad se presenta como un área de oportunidad. Toyserkani et al. (2022) señalan que la manufactura aditiva no solo representa un cambio tecnológico, sino una transformación fundamental en la filosofía de producción, donde la funcionalidad de un objeto deriva de la combinación sinérgica entre geometría optimizada y propiedades de materiales dirigidos.

A pesar del potencial inherente de la manufactura aditiva para contribuir a la sostenibilidad industrial, su implementación aislada no garantiza la maximización de beneficios ambientales y económicos. Es en este punto donde surge la necesidad de articular esta tecnología con metodologías complementarias que potencien su impacto positivo. La integración con Lean Manufacturing, filosofía centrada en la eliminación sistemática de desperdicios y la optimización de procesos, junto con la incorporación de principios de cadena de suministro verde, priorizan la gestión ambientalmente responsable de flujos logísticos, configurando un ecosistema sinérgico.

Esta convergencia cobra especial relevancia en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura. La manufactura aditiva, cuando se integra adecuadamente con principios de sostenibilidad, puede contribuir a la construcción de sistemas productivos más resilientes, eficientes y ambientalmente responsables.

El presente estudio propone el desarrollo de un marco que conceptualice la sinergia sostenible entre Manufactura Aditiva, Lean Manufacturing y Cadena de Suministro Verde. Esta propuesta busca no solo optimizar el aprovechamiento de recursos y minimizar desperdicios, sino también establecer las bases conceptuales para la transición hacia modelos de economía circular en la industria manufacturera.

Al considerar la manufactura aditiva desde sus siete familias: Fotopolimerización en tina (VAT), Fusión en lecho de polvo (PBF), Extrusión de material (MEX), Depósito de energía dirigida (DED), Inyección de aglutinante (BJT), Laminado de objetos (LOM) y Depósito de material (MD), se busca construir un modelo comprensivo que reconozca tanto las particularidades como las sinergias entre diferentes aproximaciones tecnológicas.

Marco teórico

Manufactura aditiva: un acercamiento a las tecnologías disruptivas

La Manufactura Aditiva ha sido una de las tecnologías que más ha revolucionado la manufactura en los últimos años. Se reconoce que esta tecnología ha generado el interés de ser implementada por diversas industrias como la aeroespacial, médica, automotriz, de defensa, recursos naturales, entre otros (Toyserkani et al., 2022), trayendo consigo infinidad de beneficios a sus procesos productivos, lo que impacta de manera positiva el quehacer de estas industrias en un mundo cada vez más interconectado.

La Manufactura Aditiva, a diferencia de la Sustractiva, ha permitido de entrada reducir los desperdicios y el inventario en stock, debido a que esta tecnología incorpora la materia prima a procesar en función de la necesidad de lo que se desea construir, disminuyendo los costos que genera el tener materia prima almacenada (Maldonado, 2023). Dentro de estos procesos, se encuentran una serie de tecnologías tipificadas en siete (7) familias encargadas de procesar diferentes materiales bajo parámetros, requerimientos y objetivos acordes a lo que se desea realizar.

Figura 1.

Las 7 familias de la manufactura aditiva – representación conceptual



Fuente: elaboración propia.

La Manufactura Aditiva es, entonces, definida por la norma ISO/ASTM 52900:2021 como el proceso de unir materiales para fabricar piezas a partir de diseños de modelos 3D, generalmente capa por capa, en contraposición a las metodologías de fabricación sustractiva y formativa, representa un cambio paradigmático en los procesos de fabricación. Esta tecnología se caracteriza por su capacidad de crear geometrías complejas, personalizar productos de manera eficiente y optimizar el uso de materiales, características que la posicionan como una tecnología clave para la transición hacia modelos de producción más sostenibles.

Lean Manufacturing: una filosofía para la eliminación de desperdicios

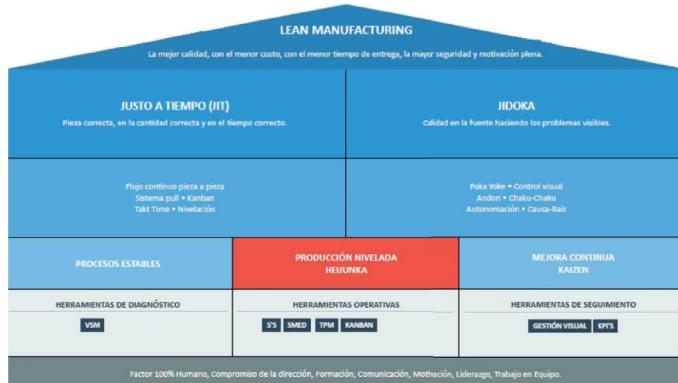
También conocida como Manufactura esbelta, es una filosofía de gestión empresarial que busca mejorar las actividades asociadas a un proceso dentro de diferentes sistemas productivos, enfatizándose en hacer más con menos recursos

y buscando la eliminación de desperdicios o mudas que no agregan valor al proceso (Muñoz-Arcentales et al., 2022; Cruz y Pichardo, 2025). Esta filosofía busca el perfeccionamiento de sistemas productivos aplicando principios y métodos integrados (Cruz y Pichardo, 2025).

El término “Lean Manufacturing” se originó a principios del siglo XX como respuesta a los estudios de las prácticas de fabricación en la industria, dando paso a su implementación en diferentes empresas a nivel glocal (Muñoz-Arcentales et al., 2022), algunos de sus precursores como Frederick Taylor y Henry Ford comenzaron a implementar esta filosofía en sus empresas para racionalizar los procesos productivos a gran escala (Muñoz-Arcentales et al., 2022). El pilar central de la manufactura esbelta se asocia principalmente al sistema de producción Toyota diseñado por Taiichi Ohno, quien buscó incrementar la competitividad productiva disminuyendo los residuos asociados a su proceso.

Esta filosofía se basa también en las personas (recurso humano) y se caracteriza por: 1. El proceso orientado al centro, 2. La reducción de residuos y 3. El aumento del nivel de asociación y colaboración (Raju et al., 2021; citado en Muñoz-Arcentales et al., 2022). La casa Lean es una representación del sistema que articula áreas de participación como lo son:

Figura 2.
Sistema de Casa Lean de la Manufactura Esbelta – modelo Toyota



Nota: Adaptación de Cardozo et al. (2019)

Como parte de los aspectos centrales de la metodología lean, se encuentra la erradicación de los desperdicios o la muda (Cardozo et al., 2019; Cruz y Pichardo, 2025) conocidas por ser:

- Transporte
- Inventario
- Movimiento
- Esperas
- Sobreproducción
- Sobreprocesamiento
- Defectos
- Habilidades y/o destrezas de los trabajadores
(Amaya et al., 2024)

Cadena de suministro verde: gestión logística sostenible

El término de sostenibilidad se ha ido posicionando en el panorama empresarial actual, situado por la creciente sobreexplotación de los recursos en los diferentes escenarios y, como consecuencia del cambio climático, se han buscado alternativas de sostenibilidad que permitan disminuir el impacto que generan las actividades productivas (Sánchez et al., 2025). Este concepto implica un equilibrio interrelacional entre el crecimiento económico, la inclusión social y preservación ambiental, tal como se relacionan en los Objetivos de Desarrollo Sostenible – ODS presentados en la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (Santos-Hernández et al., 2022).

En este panorama, la gestión de la Cadena de Suministro verde desde una perspectiva de sostenibilidad se posiciona como una estrategia clave de ventaja competitiva empresarial (Santos-Hernández et al., 2022). Su objetivo radica en la integración sistemática de variables económicas, ambientales y sociales en la gestión del recurso humano, el flujo de materiales, la

información y el capital, con la finalidad de satisfacer las necesidades de los stakeholders al tiempo que se mejora la eficiencia, la rentabilidad, competitividad y posicionamiento de las organizaciones en el tiempo.

La logística sostenible de la cadena de suministro se define como un pilar estratégico cuya finalidad es el equilibrio económico, medioambiental y social en las empresas (Sánchez et al., 2025). Su objetivo se orienta hacia la incorporación de prácticas verdes en cada uno de los eslabones que conforman la cadena de suministro y, en esencia, la interacción entre los actos clave que la gestionan y su ampliación hacia la logística inversa (Lema-Ruiz y Hurtado-Yugcha, 2022).

La adopción de tecnologías sostenibles que ocasionen un impacto ambiental menor en la manufactura de productos, potencia la gestión verde de la cadena de suministro, entre tanto se repiensa los procesos de fabricación y se reemplazan prácticas tradicionales por contemporáneas. Esta incorporación, como lo es la Manufactura Aditiva, permite tener a disposición piezas y/o productos con diseños más sostenibles y menores impactos ambientales, pues incorpora conceptos como lo es el Short Running Manufacturing que posibilita la producción por lotes pequeños en ciclos de producción definidos con mayor agilidad, niveles de personalización y costos de producción reducidos (Suárez-Luna et al., 2024).

Economía circular: paradigma de sostenibilidad integral

El concepto de economía circular simboliza un cambio de paradigmas en el consumo de bienes y/o servicios cuyo ciclo de vida del producto radica en extraer, elaborar y eliminar (economía lineal) (Bracho et al., 2025; Palacio, 2025), buscando ampliar la vida útil de los productos al buscar la transformación de los residuos en nuevas materias primas o recursos, contribuyendo a la disminución de desperdicios.

La economía circular se alinea con el concepto de manufactura ambientalmente sostenible, en el que se busca mejorar la sostenibilidad de procesos productivos incorporando

estrategias como “Green Lean Six Sigma” mediante la adopción de las 3R: reducir, reutilizar y reciclar o las 6R: reducir, reutilizar, reciclar, revalorizar, redistribuir y relacionar (Guevara et al., 2024).

La Manufactura Aditiva (MA) se reconoce como una tecnología que permite implementar economía circular a mayor escala; en comparación con la manufactura sustractiva, se identifica que la MA facilita la transformación de residuos y/o desperdicios y subproductos en nuevas materias primas que benefician el ciclo de vida del producto (Bracho et al., 2025). Esta tecnología disminuye los costos asociados al consumo de recursos al reducir la necesidad de extraer materia virgen y consigo mitigar la contaminación ambiental en el sector.

El diseño circular, apoyado por la manufactura aditiva, es vital para contrarrestar la obsolescencia y mantener el valor de los productos a lo largo del tiempo, permitiendo que los elementos o insumos usados se conviertan en una materia prima integral para nuevos ciclos productivos. Un ejemplo práctico es la creación de prendas con textiles impresos en 3D a partir de filamento de PET reciclado, que ilustra cómo los desechos plásticos pueden transformarse en productos de alto valor con un impacto ambiental reducido (Restrepo-Salgado et al., 2021).

Metodología de análisis y recolección de datos

Para el desarrollo del presente artículo se enfocó el estudio en un análisis bibliométrico cuantitativo de tipo descriptivo-exploratorio orientado al análisis de la evolución temporal, patrones de colaboración, convergencia temática y gaps de investigación en la intersección entre Manufactura Aditiva (MA), Economía Circular (EC) con Lean Manufacturing (LM) y Cadena de Suministro Verde (CSV). Esta investigación se articuló bajo un enfoque que combina la bibliometría descriptiva en tanto que cuantifica la producción científica con la productividad de autores, países e instituciones y la bibliometría relacional para el análisis de co-citación, co-ocurrencia de palabras clave y trabajo colaborativo científico, para terminar con un análisis de contenido de categorización temática e identificación de gaps metodológicos en el campo.

Filtros de búsqueda

1. Delimitación temporal

Para el estudio se determinó un periodo de 25 años (2000 a 2025) en promedio, con la finalidad de identificar en este tiempo la evolución relacionada con las prácticas sostenibles en entornos de fabricación de productos con tecnologías de Manufactura Aditiva.

2. Criterios de tipo documental

- Artículos de revistas (peer-reviewed)
- Reviews y meta-análisis
- Conference papers de congresos
- Chapter books

3. Criterios de idioma

El idioma de búsqueda principal fue inglés, debido a la predominancia de literatura científica y la diversificación de países y escenarios de aplicación.

4. Criterios de áreas temáticas

- Engineering (ingeniería)
- Materials Science (ciencia de materiales)
- Environmental Science (Ciencias Ambientales)
- Additive Manufacturing (Manufactura Aditiva)
- Green Supply Chain Management (Gestión de la cadena de suministro verde)
- Green Lean Manufacturing (Fabricación eficiente y ecológica)
- Circular economy (economía circular)

Bases de datos primaria de búsqueda sistemática

Una de las bases de datos para la búsqueda documental sistemática fue Scopus como principal plataforma, debido a la facilidad de acceso con cuenta disponible por la universidad.

Complementariamente, se utilizó Research Rabbit como herramientas para identificar literatura adicional, mediante el análisis de redes de citación y recomendaciones algorítmicas.

Diseño Query

La revisión sistemática de la literatura comenzó con el diseño de Queries para utilizar en Scopus, facilitando la medición y visualización de tendencias en producción científica a través de palabras clave, resúmenes y títulos.

Tabla 1.

Diseño de Query para motores de búsqueda

Query	Keywords
Query 1 AM	(TITLE-ABS-KEY ("additive manufacturing") OR TITLE-ABS-KEY ("3D printing") OR TITLE-ABS-KEY ("powder bed fusion") OR TITLE-ABS-KEY ("selective laser melting") OR TITLE-ABS-KEY ("material extrusion") OR TITLE-ABS-KEY ("directed energy deposition") OR TITLE-ABS-KEY ("laser metal deposition") OR TITLE-ABS-KEY ("binder jetting") OR TITLE-ABS-KEY ("material jetting")) AND PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2026
Query 2 CE	(TITLE-ABS-KEY ("circular economy") OR TITLE-ABS-KEY ("material circularity") OR TITLE-ABS-KEY ("circular manufacturing") OR TITLE-ABS-KEY ("waste-to-resource") OR TITLE-ABS-KEY ("material reuse") OR TITLE-ABS-KEY ("powder reuse") OR TITLE-ABS-KEY ("feedstock recycling") OR TITLE-ABS-KEY ("closed-loop manufacturing")) AND PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2026
Query 3 GSCM	(TITLE-ABS-KEY ("green supply chain") OR TITLE-ABS-KEY ("sustainable supply chain") OR TITLE-ABS-KEY ("green logistics") OR TITLE-ABS-KEY ("sustainable logistics") OR TITLE-ABS-KEY ("green procurement") OR TITLE-ABS-KEY ("sustainable sourcing") OR TITLE-ABS-KEY ("carbon footprint supply")) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2026
Query 4 GLM	(TITLE-ABS-KEY ("green lean") OR TITLE-ABS-KEY ("sustainable lean") OR TITLE-ABS-KEY ("environmental lean") OR TITLE-ABS-KEY ("eco-lean") OR TITLE-ABS-KEY ("green kaizen") OR TITLE-ABS-KEY ("sustainable kaizen") OR TITLE-ABS-KEY ("environmental kaizen") OR TITLE-ABS-KEY ("green waste reduction") OR TITLE-ABS-KEY ("sustainable waste elimination") OR TITLE-ABS-KEY ("carbon lean") OR TITLE-ABS-KEY ("energy lean")) AND PUBYEAR > 1999 AND PUBYEAR < 2026
Query 5 AM + CE + GSCM+ GLM	(TITLE-ABS-KEY (additive manufacturing) OR TITLE-ABS-KEY (3D printing) AND TITLE-ABS-KEY (sustainability) OR TITLE-ABS-KEY (sustainable) OR TITLE-ABS-KEY (life cycle assessment) OR TITLE-ABS-KEY (LCA) OR TITLE-ABS-KEY (carbon footprint) AND TITLE-ABS-KEY (circular economy) OR TITLE-ABS-KEY (green supply chain) OR TITLE-ABS-KEY (GSCM) AND TITLE-ABS-KEY (green lean manufacturing) OR TITLE-ABS-KEY (eco-design) OR TITLE-ABS-KEY (ecodesign)) AND PUBYEAR > 2012 AND PUBYEAR < 2026

Nota: AM: Additive Manufacturing, CE: Circular Economy, GSCM: Green Supply Chain Management, GLM: Green Lean Manufacturing

Para el proceso de análisis de la información se empleó una metodología de triangulación que combinó bibliometría descriptiva, bibliometría relacional y análisis de contenido temático. La Fase 1 (bibliometría descriptiva) utilizó Scopus Analytics, Research Rabbit y Excel para cuantificar patrones temporales, geográficos e institucionales. La Fase 2 (bibliometría relacional) empleó VOSviewer 1.6.19 para generar mapas de co-ocurrencia de palabras clave, redes de co-autoría y análisis de co-citación. La Fase 3 (análisis de contenido) se apoyó en Inteligencia artificial con Claude, Notebook Lm y ChatGpt para codificación temática y análisis de patrones conceptuales. La validación metodológica siguió los criterios PRISMA, y la visualización de resultados integró excel para dashboards.

El proceso de selección documental siguió un enfoque de filtrado secuencial teniendo en cuenta una serie de criterios como lo son:

Query por segmentación en áreas temáticas (Manufactura Aditiva, Lean Manufacturing, Economía circular y Cadena de Suministro Verde) obteniendo un total de 55.235 documentos entre artículos científicos, artículos de conferencias, revisiones, capítulos de libros, libros, entre otros.

Los filtros que se llevaron a cabo para pasar del Universo poblacional = 55.235 documentos de Scopus a la muestra final donde se incorporaron los documentos identificados en Research Rabbit, se presentan a través de un diagrama prisma.

Figura 3.
Diagramación PRISMA



Nota: elaboración propia

Una vez definido el corpus de 25 documentos a examinar, se plantearon tres (3) fases analíticas:

Fase 1. Análisis de bibliometría descriptiva

Objetivo: cuantificar y caracterizar la producción científica en la intersección AM + EC + LM + CSV

Variables de análisis definidas

- Análisis de temporalidad

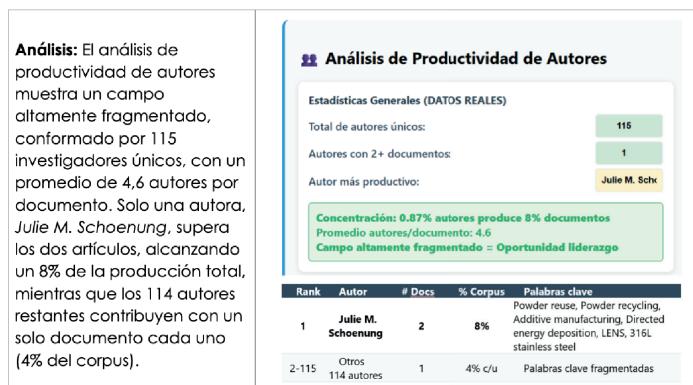
Figura 4.
Temporalidad del Análisis bibliométrico



Nota: elaboración propia

Análisis de productividad

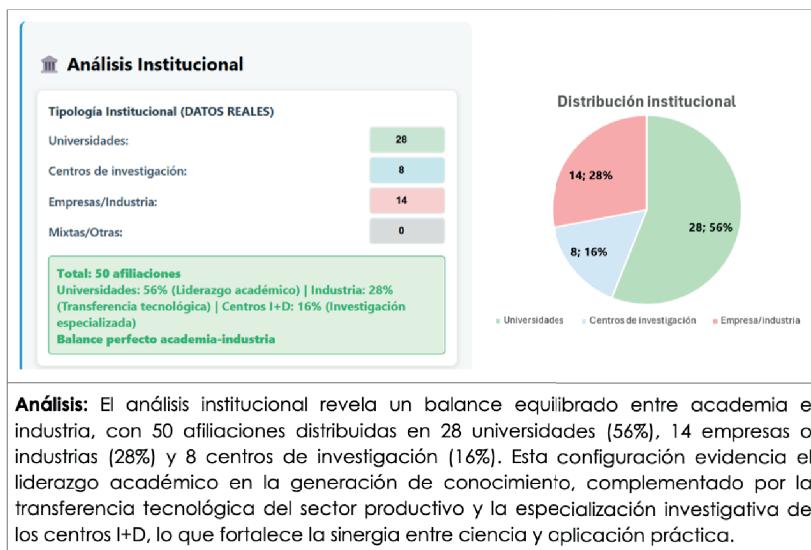
Figura 5.
Análisis de productividad de Autores



Nota: elaboración propia

Esta baja concentración refleja la ausencia de núcleos consolidados de liderazgo académico, lo cual convierte a este campo en un espacio de oportunidad. Además, las palabras clave asociadas al trabajo de la autora más productiva permiten identificar ejes temáticos emergentes.

Figura 6.
Análisis institucional



Análisis geográfico

Nota: elaboración propia

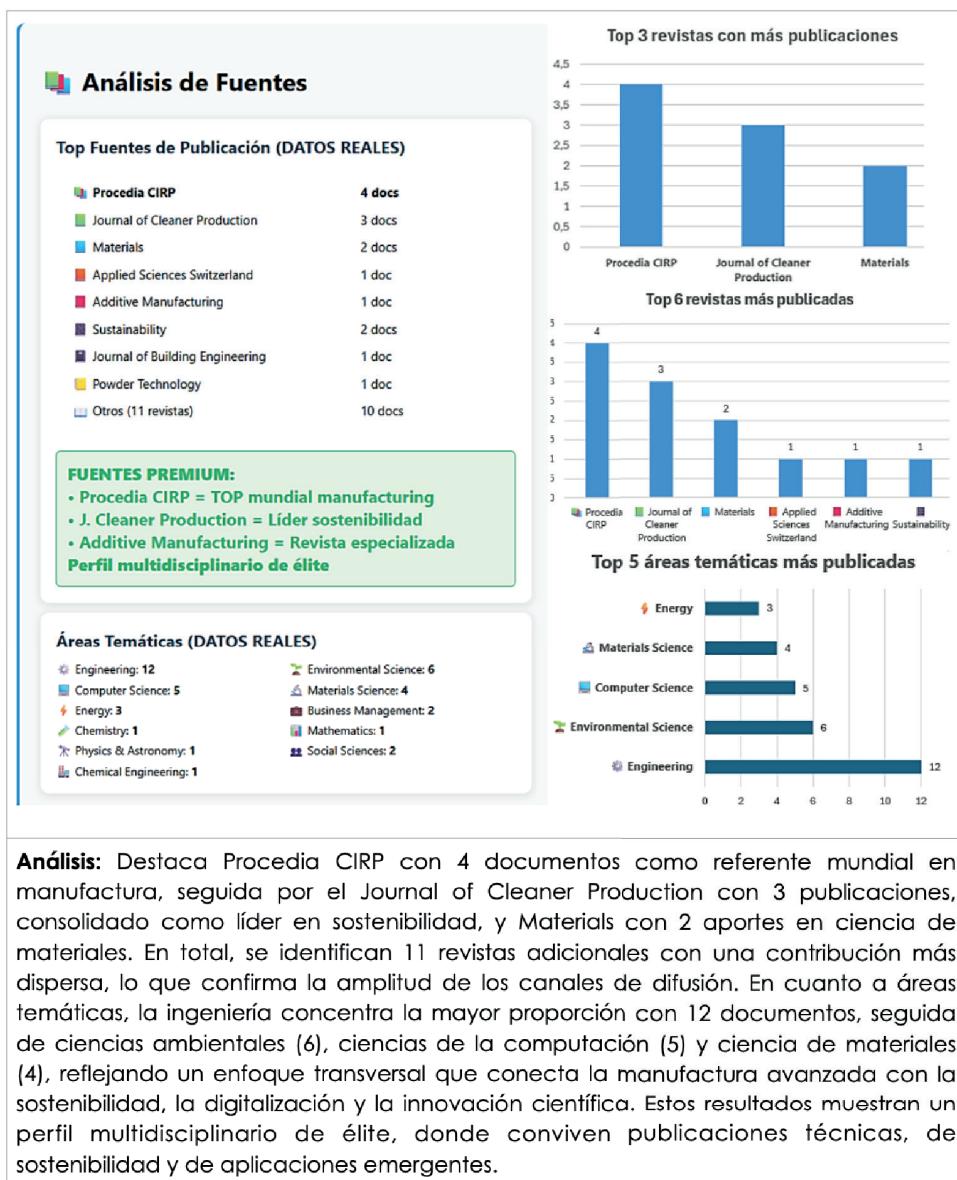
Figura 7.
Análisis geográfico



Nota: elaboración propia

Análisis de fuentes

Figura 8.
Análisis de revistas



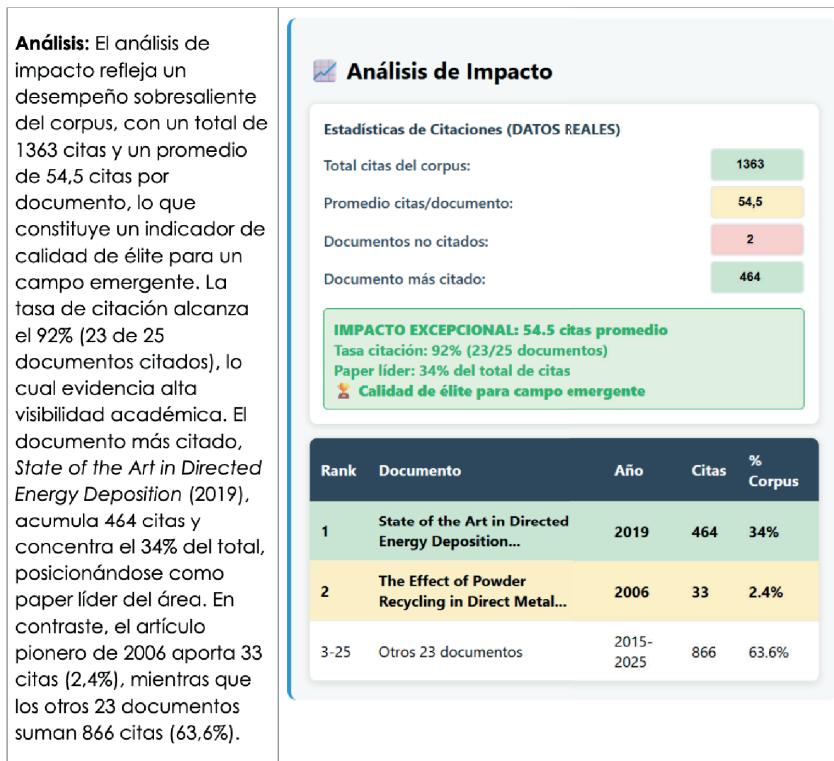
Nota: elaboración propia

• **Análisis de impacto**

Figura 9.

Análisis de impacto por citaciones

Nota: elaboración propia



Nota: elaboración propia

Fase 2. Análisis bibliométrico relacional

Una vez se completó el análisis de bibliometría descriptiva y tener el Corpus AM+EC+LM+CSV con:

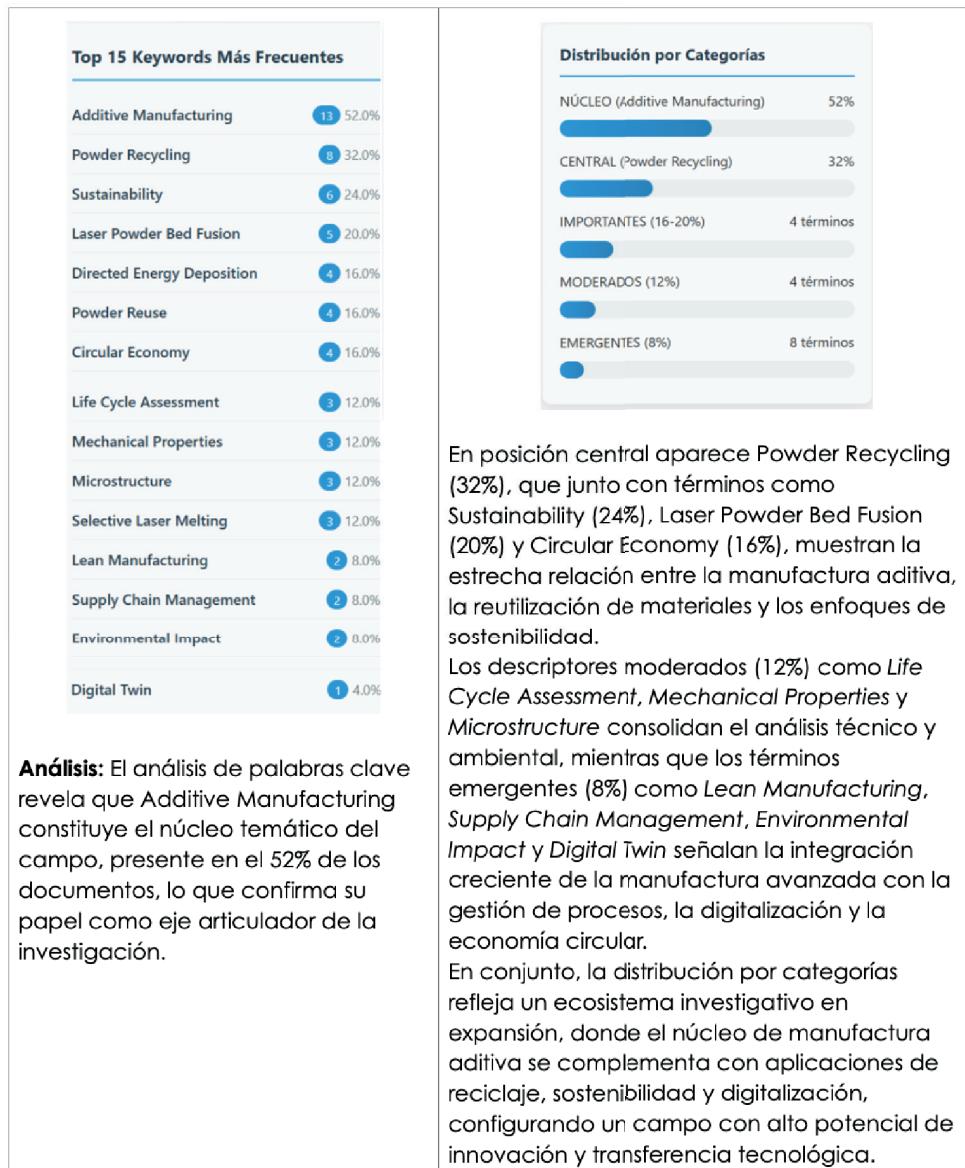
- 25 documentos
- 115 autores únicos
- 54.5 citas promedio
- 96% publicaciones luego del 2015
- Europa predomina en un 92%
- América Latina tiene participación del 0%

Se dio paso al análisis bibliométrico relacional, obteniendo los siguientes hallazgos:

- **Análisis co-ocurrencia de Keywords**

Figura 10.

Co-ocurrencia de keywords



Nota: elaboración propia

Determinación de Clústeres preliminares

Una vez se identificaron las palabras clave predominantes, se categorizaron y acomodaron en 5 clústeres como resultados preliminares al análisis.

Figura 11.
Clústeres preliminares

<p>CLUSTER 1: Núcleo Tecnológico AM</p> <p>25 co-ocurrencias Dominancia: 52% 4 términos principales</p> <p>Términos centrales: Additive Manufacturing, Laser Powder Bed Fusion, Selective Laser Melting, Directed Energy Deposition</p> <p>Características: Dominio tecnológico absoluto. Núcleo de todas las conexiones principales.</p>	<p>Ánalisis: El análisis de clústeres muestra que la manufactura aditiva constituye el núcleo tecnológico del campo, estrechamente conectado con el reciclaje de polvos y la sostenibilidad, lo que evidencia una transición hacia modelos circulares con validación técnica a través de la caracterización de materiales. Sin embargo, los procesos lean aparecen fragmentados y desconectados, representando una oportunidad crítica para integrar eficiencia productiva y gestión de la cadena de suministro en futuras investigaciones.</p>
<p>CLUSTER 2: Reciclaje y Reutilización</p> <p>14 co-ocurrencias Penetración: 48% 3 términos principales</p> <p>Términos centrales: Powder Recycling, Powder Reuse, Material Recycling</p> <p>Características: Puente crítico hacia sostenibilidad. Segunda mayor frecuencia del corpus.</p>	
<p>CLUSTER 3: Sostenibilidad y Circularidad</p> <p>15 co-ocurrencias Crecimiento: +40% 2020-2025 4 términos principales</p> <p>Términos centrales: Sustainability, Circular Economy, Life Cycle Assessment, Environmental Impact</p> <p>Características: Marco conceptual emergente. Conexiones fuertes con LCA.</p>	
<p>CLUSTER 4: Caracterización de Materiales</p> <p>8 co-ocurrencias Validación técnica 3 términos principales</p> <p>Términos centrales: Mechanical Properties, Microstructure, Powder Characterization</p> <p>Características: Soporte científico para validación de procesos de reciclaje.</p>	
<p>CLUSTER 5: Procesos Lean (FRAGMENTADO)</p> <p>5 co-ocurrencias Subrepresentado: 8% DESCONECTADO</p> <p>Términos centrales: Lean Manufacturing, Lean Construction, Supply Chain Management</p> <p>Características: OPORTUNIDAD CRÍTICA - Sin conexiones directas con AM.</p>	

Nota: elaboración propia

Matriz de conexiones principales

Tabla 2.

Matriz de conexiones principales de co-ocurrencia

Conexiones Fuertes (≥ 3 co-ocurrencias)	
Additive Manufacturing ↔ Powder Recycling	8 conexiones
Additive Manufacturing ↔ Sustainability	6 conexiones
Powder Recycling ↔ Mechanical Properties	4 conexiones
Sustainability ↔ Life Cycle Assessment	3 conexiones
Additive Manufacturing ↔ Directed Energy Deposition	3 conexiones
Conexiones Fuertes (≥ 3 co-ocurrencias)	
Circular Economy ↔ Design for Sustainability	2 conexiones
Environmental Impact ↔ Sustainability	2 conexiones
Powder Reuse ↔ Directed Energy Deposition	2 conexiones
Laser Powder Bed Fusion ↔ Powder Recycling	2 conexiones
Conexiones Fuertes (≥ 3 co-ocurrencias)	
Lean Manufacturing ↔ Additive Manufacturing	0 conexiones
Supply Chain Management ↔ Circular Economy	0 conexiones
Digital Twin ↔ Sustainability	0 conexiones

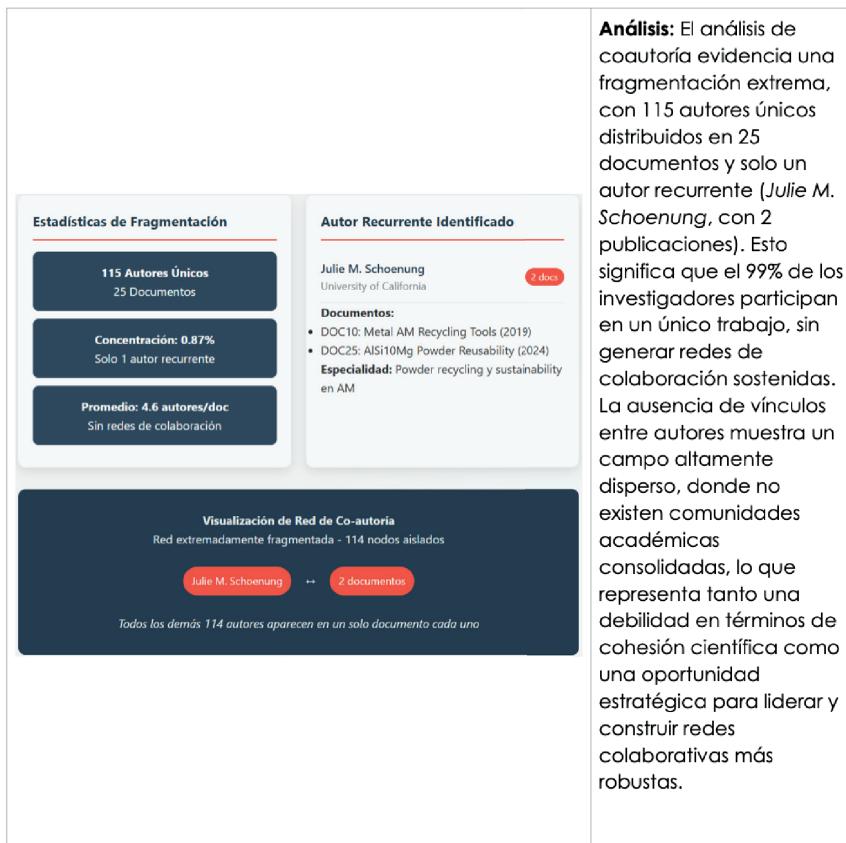
Nota: elaboración propia

Confirmaciones estratégicas

Hay existencia de sinergia entre AM + Reciclaje dominante: 32% del corpus conecta ambos términos de manera directa. Asimismo, se reconoce una emergencia de sostenibilidad igual al 24% que integra marcos sustentables (con un crecimiento del 40% entre 2020-2025). Economía circular tracción del 16% corpus reciente que incluye CE explícitamente. Luego de realizar el análisis de co-autoría, se identificó un área de oportunidad en el campo al no contar con líderes en el campo, se revela la existencia de una fragmentación como se evidencia a continuación.

Figura 12.

Fragmentación emergentes en recurrencia – redes de colaboración



Nota: elaboración propia

Fase 3. Análisis de contenido temático

En esta fase se construyó la síntesis conceptual de la literatura y se presentó la propuesta inicial del marco integrado de AM+EC+LM+CSV. Primero se identificaron los patrones metodológicos, dando como resultado:

- **Patrón Dominante:** Experimentación con Validación LCA
- **Prevalencia:** 16/25 documentos (64%)
- **Característica:** Combinación de experimentación en procesos AM con evaluación de sostenibilidad mediante LCA

- **Fortalezas:** Rigor científico, validación cuantitativa, aplicabilidad práctica
- **Limitaciones:** Enfoque fragmentado, falta de marcos integradores

Donde, además, se categorizó de acuerdo con el enfoque de cada artículo las siguientes temáticas:

Figura 13.

Categorización temática

<p>Life Cycle Assessment (LCA)</p> <p>Documentos: 8/25 (32%)</p> <p>Estándares: ISO 14040/14044 dominante</p> <p>Software: SimaPro, GaBi, ecoinvent</p> <p>Limitaciones: Datos LCI limitados para AM</p> <p>DOC02, DOC03, DOC08, DOC10, DOC16, DOC22, DOC23</p>	<p>Experimentación Controlada</p> <p>Documentos: 12/25 (48%)</p> <p>Enfoques: Powder recycling, mechanical testing</p> <p>Instrumentos: SEM, XRD, tensile testing</p> <p>Fortalezas: Validación empírica robusta</p> <p>DOC11, DOC12, DOC13, DOC14, DOC15, DOC19, DOC20, DOC24, DOC25</p>	<p>Ánalisis: Hay predominio de la experimentación controlada (48%), que aporta validación empírica robusta, seguida por el Life Cycle Assessment (32%) enfocado en sostenibilidad, aunque con limitaciones en bases de datos específicas para AM. El modelado y simulación (16%) contribuye a la optimización de procesos, pero carece de integración con marcos sostenibles, mientras que las revisiones sistemáticas (16%) fortalecen el estado del arte, aunque aún sin síntesis integradoras. En conjunto, el campo combina solidez experimental con enfoques emergentes de sostenibilidad y sistematización.</p>
<p>Modelado y Simulación</p> <p>Documentos: 4/25 (16%)</p> <p>Herramientas: MATLAB, TRNSYS, optimization algorithms</p> <p>Aplicaciones: Process optimization, energy modeling</p> <p>Gap: Integración limitada con marcos sostenibles</p> <p>DOC01, DOC04, DOC09, DOC17</p>	<p>Revisiones Sistemáticas</p> <p>Documentos: 4/25 (16%)</p> <p>Metodologías: PRISMA, ontological mapping</p> <p>Contribución: State-of-art, gap identification</p> <p>Limitación: Falta de síntesis integradoras</p> <p>DOC05, DOC18, DOC21, DOC23</p>	

Nota: elaboración propia

Análisis Conceptual por Clústeres

Este análisis facilita la categorización de información emergentes en las áreas temáticas para la sinergia propuesta, permitiendo denotar la existencia o no de evidencia conceptual/teórica y metodológica.

Figura 14.
Clústeres finales

<p>Cluster AM: Definiciones y Enfoques</p> <p>Definición consensuada: "Layer-by-layer manufacturing process" (13 documentos) Evidencia Fuerte</p> <p>Tecnologías dominantes: L-PBF (20%), DED (16%), SLM (12%) Evidencia Fuerte</p> <p>Enfoque sostenibilidad: Reducción material waste, energy efficiency Evidencia Moderada</p> <p>Limitación conceptual: Visión tecnológica sin integración sistémica Evidencia Fuerte</p>	<p>Cluster EC: Economía Circular en AM</p> <p>Marco dominante: Ellen MacArthur Foundation (4 documentos) Evidencia Moderada</p> <p>Aplicación principal: Powder recycling como "closing loops" Evidencia Fuerte</p> <p>Principios identificados: Design for disassembly, material recovery Evidencia Moderada</p> <p>Gap conceptual: No integración con principios lean Evidencia Fuerte</p>
<p>Cluster LM: Lean Manufacturing (FRAGMENTADO)</p> <p>Presencia limitada: Solo 2 documentos abordan lean explicitamente Evidencia Débil</p> <p>Herramientas identificadas: Value Stream Mapping, waste reduction Evidencia Débil</p> <p>Aplicación potencial: Process optimization in AM Sin Evidencia</p> <p>Desconexión crítica: Sin vinculación conceptual con sostenibilidad Evidencia Fuerte</p>	<p>Cluster CSV: Green Supply Chain</p> <p>Enfoque dominante: Local production, reduced transportation Evidencia Moderada</p> <p>Beneficios identificados: Shortened supply chains, JIT manufacturing Evidencia Moderada</p> <p>Limitación: Visión lineal, no circular Evidencia Moderada</p> <p>Gap integrador: Sin conexión con waste elimination lean Evidencia Fuerte</p>

Nota: elaboración propia

Este acercamiento permite generar el siguiente interrogante: ¿Cómo pueden integrarse los principios lean de eliminación de desperdicios con los loops circulares de reutilización de materiales en AM para crear un modelo de sinergia sostenible? Se identificó, además:

- **Convergencia:** Todos los estudios confirman viabilidad técnica del reciclaje de materiales en AM.
- **Beneficio sostenibilidad:** Reducción consistente 15-30% en impactos ambientales.
- **Limitación común:** Falta de optimización integral de procesos (lean principles ausentes).

Gaps teóricos y oportunidades

Finalmente, una vez realizado la triangulación que combinó la bibliometría descriptiva, bibliometría relacional y análisis de contenido temático, se identificaron los gaps teóricos finales y las áreas de oportunidad emergentes como lo son:

Figura 15.

Gaps finales

Gap 1: Métricas Integradas Problema: Métricas fragmentadas por disciplina Evidencia: LCA para sostenibilidad, mechanical testing para calidad, no lean metrics Oportunidad: Desarrollo de KPIs transversales que midan eficiencia lean + circularidad + sostenibilidad Impacto potencial: Optimización holística de procesos AM	Gap 2: Diseño para Sinergia Problema: Design for circularity vs Design for manufacturing desconectados Evidencia: DOC06 aborda circular design, pero no optimización lean Oportunidad: "Design for Lean-Circular Manufacturing" framework Impacto potencial: Productos optimizados desde diseño para máxima eficiencia	Gap 3: Supply Chain Circular-Lean Problema: Supply chains verdes pero no optimizados lean Evidencia: DOC01 aborda lean supply chain, pero no circularidad Oportunidad: Cadenas de suministro que combinen JIT + material loops Impacto potencial: Reducción simultánea waste + environmental impact	Gap 4: Tecnologías 4.0 Integradoras Problema: Digital twins y AI mencionados pero no aplicados sistemáticamente Evidencia: Solo DOC05 menciona digital twin para PVC recycling Oportunidad: Digital twins para optimización lean-circular en tiempo real Impacto potencial: Adaptive manufacturing systems
--	---	--	---

Nota: elaboración propia

Posicionamiento América Latina: Liderar desarrollo de primer marco teórico integrado AM+EC+LM+CSV

Timing perfecto: Campo fragmentado en proceso de consolidación (96% literatura post-2015)

Diferenciación: Único enfoque que combine efficiency (lean) + circularity (EC) + sustainability (LCA)

Impacto académico: Potencial para convertirse en referencia del campo

Resultados

El análisis bibliométrico en tres (3) fases para el corpus documental de 25 documentos científicos, reveló un área de oportunidad como campo de conocimiento emergente, donde el 96% de la literatura emerge en el 2015, confirmando los inicios de la intersección entre múltiples variables con la Manufactura Aditiva, pero que nace un campo poco explorado entre la Manufactura Aditiva y su interacción con la Economía Circular, Lean manufacturing y Cadena de suministro verde. La fragmentación documental con apenas un autor recurrente entre 115, junto con la ausencia total de producción científica de este estilo en América Latina, configura un escenario de oportunidad emergente para el desarrollo de este marco teórico integral.

El modelo de sinergia sostenible propuesto, fundamentado en la convergencia de cuatro pilares tecnológicos y metodológicos, representa la primera aproximación sistemática que articula principios lean de eliminación de desperdicios con loops circulares de reutilización de materiales en contextos de manufactura aditiva, diferenciándose conceptualmente del framework previo de construcción por su enfoque específico en manufactura industrial y la incorporación explícita de economía circular como elemento diferenciador.

Pilares de integración

Tabla 3.

Matriz de pilares de integración en sinergia

<p>Pilar 1: Manufactura Aditiva Optimizada</p> <p>Fundamento: AM como tecnología habilitadora</p> <p>Elementos:</p> <ul style="list-style-type: none">• Process optimization (laser parameters, material properties)• Quality control integrado• Multi-material capabilities• Design freedom exploitation	<p>Pilar 2: Economía Circular Aplicada</p> <p>Fundamento: Loops cerrados de materiales</p> <p>Elementos:</p> <ul style="list-style-type: none">• Powder recycling optimization• End-of-life product recovery• Design for circularity• Material passport systems
<p>Pilar 3: Lean Manufacturing Integrado</p> <p>Fundamento: Eliminación sistemática desperdicios</p> <p>Elementos:</p> <ul style="list-style-type: none">• Value stream mapping AM processes• Just-in-time production• Continuous improvement (kaizen)• Waste elimination (muda, mura, muri)	<p>Pilar 4: Cadena Suministro Verde</p> <p>Fundamento: Optimización integral de flujos</p> <p>Elementos:</p> <ul style="list-style-type: none">• Distributed manufacturing networks• Local material sourcing• Reverse logistics optimization• Supplier sustainability integration

Nota: elaboración propia

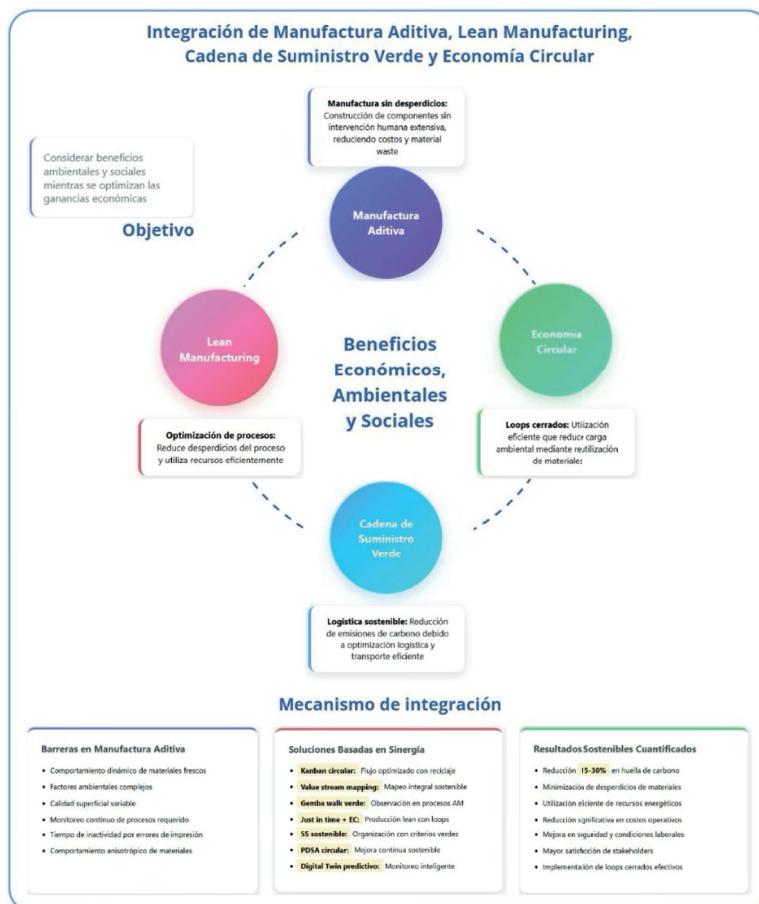
Pregunta orientadora final:

¿Cómo puede desarrollarse un modelo de sinergia sostenible que integre principios lean de eficiencia con loops circulares de reutilización de materiales en manufactura aditiva para maximizar simultáneamente la eficiencia operacional y el impacto ambiental positivo a lo largo de la cadena de suministro?

A continuación, se presenta la estrategia propuesta

Figura 16.

Propuesta de sinergia entre MA + LM + EC + CSV



Nota: elaboración propia

Conclusiones

La presente investigación estableció las bases conceptuales para la transición hacia modelos de producción industrial más resilientes y ambientalmente responsables en el marco de la Industria 4.0. Los hallazgos cuantificados demuestran que la integración sinérgica de estos cuatro elementos puede generar reducciones del 15-30% en impactos ambientales, mientras optimiza simultáneamente la eficiencia operacional mediante la implementación de métricas transversales que miden circularidad, sostenibilidad y eficiencia lean de manera integral. La validación empírica del modelo a través del análisis bibliométrico riguroso, complementada con la identificación de gaps metodológicos críticos y la propuesta de soluciones específicas como el “Kanban circular” y el “Digital Twin predictivo”, posiciona esta investigación como un referente teórico fundamental para futuras implementaciones prácticas. El timing estratégico de la investigación, desarrollada durante la fase de consolidación del campo, pero antes del establecimiento de líderes dominantes, ofrece una ventana de oportunidad para que América Latina lidere el desarrollo de conocimiento en esta intersección tecnológica crítica para la sostenibilidad industrial.

Referencias

- Amaya, M. T., Bermúdez, A. D., Platero, G. A., Torres, E. M., & Álvarez, E. M. (2024). Propuesta de aplicación de herramientas de lean manufacturing en una planta de adhesivos del sector textil: Caso de estudio. *Realidad Empresarial*, 17(1), 61–74. <https://doi.org/10.51378/reuca.v1i17.8011>
- Bracho, A. M., Pérez, A. B., Bracho, A. I., & Ortega, J. A. (2025). Economía circular y la impresión 3D: biomateriales en la sostenibilidad industrial. *RIEMAT: Revista de Investigaciones de Energía, Medio Ambiente y Tecnología*, 10(1), 56–67. <https://doi.org/10.33936/riemat.v10i1.7680>
- Cardozo, A. D., Chantris, E. F., Medina, Á. M., & Tovar, O. A. (2019). Implementación de lean manufacturing e industria 4.0 para mejorar el sistema de producción automatizado y

semi-automatizado en la empresa Cilindros Company S.A.S. [Trabajo de grado, Universidad Cooperativa de Colombia]. Repositorio Institucional UCC.

Cruz, L., & Pichardo, M. F. (2025). Aplicación de herramientas de lean manufacturing para una propuesta de mejora en la optimización del tiempo de entrega de suéteres navideños en la empresa textil JENCAR S.A. de C.V. Ingenio y Conciencia. *Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, 12(24), 33–50. <https://doi.org/10.29057/escs.v12i23.14731>

Guevara, I., Corichi, J. M., Martínez, I., Heredia, R. & Clemente, J. E. (2024). Hacia una economía circular: Una revisión sistemática de la implementación de Green Lean Six Sigma en la industria manufacturera. *Recima21: Revista Científica Multidisciplinaria*, 8(6), 3799–3813. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i6.15129

Lema-Ruiz, E. E., & Hurtado-Yugcha, J. del P. (2022). Gestión de la cadena de suministro: presiones, prácticas y desempeño del sector manufacturero. *593 Digital Publisher CEIT*, 7(5), 108–123. <https://doi.org/10.33386/593dp.2022.5.1125>

Muñoz-Arcentales, J., Balón-Ramos, I., Reyes-Soriano, F., & Muyulema-Allaica, J. (2022). Manufactura esbelta para eliminación de desperdicios en PyMEs: Una revisión sistemática de la literatura. *593 Digital Publisher CEIT*, 7(4-2), 483–495. <https://doi.org/10.33386/593dp.2022.4-2.1279>

Palacio, D. A. (2025). Economía circular y cooperativismo en Colombia: estrategias de emprendimiento para la inclusión social y la sostenibilidad. *Revista Ingeniería, Matemáticas y Ciencias de la Información*, 12(23), 101–107. <https://doi.org/10.21017/rimci.1127>

Restrepo-Salgado, M. P., Cortés-Sáenz, D. & Arbeláez-Ríos, S. E. (2021). Metodología de diseño de prendas usando textiles impresos en 3D con filamento PET reciclado. *Cultura Científica y Tecnológica*, 18(3), 1–8. <https://doi.org/10.20983/culcyt.2021.3.2.1>

Sánchez, M. A., Camarena, J., Camacho, J., Pinto De Gracia, A., Vázquez, Y. & Barria, Y. (2025). Logística sostenible: Estrategias para reducir el impacto ambiental sin perder rentabilidad en las operaciones de la cadena de suministro. *Revista O Universo Observável*, 2(6), 1-12. <https://doi.org/10.69720/29660599.2025.000120>

Santos-Hernández, B. L., Ruvalcaba-Sánchez, L. G., & Ramírez Ospina, D. E. (2022). Gestión del conocimiento y gestión lean: relación y efecto en la gestión de la sostenibilidad de la cadena de suministro. *Revista Espacios*, 43(3), 2. <https://doi.org/10.48082/espacios-a22v43n03p02>

Suarez-Luna, J. M., Romero-Guerrero, J. A., & Arenas-Islas, D. (2024). Productividad de granjas de manufactura aditiva en la cadena de suministro industrial. *Pädi*, 12(Especial 4), 236–242. <https://doi.org/10.29057/icbi.v12iEspecial4.13268>

Toyserkani, E., Sarker, D., Obehi, O., Liravi, F., Russo, P. & Taherkhani, K. (2022). *Metal additive manufacturing*. John Wiley & Sons.

Documentos base de revisión bibliométrica

Briones-Llorente, R., Barbosa, R., Almeida, M., Montero García, E. A., & Rodríguez Saiz, Á. (2020). Ecological Design of New Efficient Energy-Performance Construction Materials with Rigid Polyurethane Foam Waste. *Polymers*, 12(5), 1048. <https://doi.org/10.3390/polym12051048>

Caiazzo, F. & Alfieri, V. (2018). Laser-Aided Directed Energy Deposition of Steel Powder over Flat Surfaces and Edges. *Materials*, 11(3), 1-15.

Carroll, P.A.; Brown, P.; Ng, G.; Scudamore, R.; Pinkerton, A.J.; Syed, W.; Sezer, H.; Li, L.; Allen, J. (2006). The Effect of Powder Recycling in Direct Metal Laser Deposition on Powder and Manufactured Part Characteristics. In *Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing* (pp. 18-1 – 18-10). Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-139, Paper 18. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>

Chidara, A., Cheng, K., & Gallear, D. (2025). Engineering Innovations for Polyvinyl Chloride (PVC) Recycling: A Systematic Review of Advances, Challenges, and Future Directions in Circular Economy Integration. *Machines*, 13(5), 362. <https://doi.org/10.3390/machines13050362>

Dass A. & Moridi A. (2019). State of the Art in Directed Energy Deposition: From Additive Manufacturing to Materials Design. *Coatings*, 9(7), 1-26.

Denti, L., Sola, A., Defanti, S., Sciancalepore, C. & Bondioli, F. (2019). Effect of Powder Recycling in Laser-based Powder Bed Fusion of Ti-6Al-4V. *Manufacturing Technology*, 19(2), 190-196.

Falsafi, A., Togiani, A., Colley, A., Varis, J., & Horttanainen, M. (2025). Life cycle assessment in circular design process: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 521, 146188. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146188>

Fico, D., Rizzo, D., De Carolis, V., Montagna, F., Palumbo, E., & Esposito Corcione, C. (2022). Development and characterization of sustainable PLA/Olive wood waste composites for rehabilitation applications using Fused Filament Fabrication (FFF). *Journal of Building Engineering*, 56, 104673. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104673>

Gilibert, P., Mesnil, R., & Baverel, O. (2023). Robust optimization for geometrical design of 2D sequential interlocking assemblies. *Automation in Construction*, 158, 1-42. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105207>

Girot, F. (2017). Microstructure characterization of recycled IN718 powder and resulting laser clad material. *Materials Characterization*, 134, 103-113.

Gruber, K., Smolina, I., Kasprowicz, M. & Kurzynowski, T. (2021). Evaluation of Inconel 718 Metallic Powder to Optimize the Reuse of Powder and to Improve the Performance and Sustainability of the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Process. *Materials*, 14(6), 1-27.

Joju, J., Verdi, D., Han, W. S., Hang, W., Soh, N., Hampo, C.C., Niu, N. & Yang, S.S. (2023). Sustainability assessment of feedstock powder reuse for Directed Laser Deposition. *Journal Of Cleaner Production*, 388, 1-13.

Kiani, P., Dupuy, A., Ma, K. & Schoenung, J. M. (2024). The Reusability of AlSi10Mg Powder in Directed Energy Deposition. *Powders*, 3, 28-43.

Oros A. E., Negrea C. S., Artimon F. G., Angelescu D., Popan G., Gheorghe S. I., Gheorghe M. (2019). A Deep Look at Metal Additive Manufacturing Recycling and Use Tools for Sustainability Performance. *Sustainability*, 11(19), 1-19.

Priarone, P., Lunetto, V., Atzeni, E. & Salmi, A. (2018). Laser powder bed fusion (L-PBF) additive manufacturing: On the correlation between design choices and process sustainability. *Procedia CIRP*, 78, 85-90.

Raza, M. H., & Zhong, R. Y. (2024). Integration of additive manufacturing, lean and green construction: A conceptual framework. *Procedia CIRP*, 128, 180–185. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.06.018>

Renderos, M., Torregaray, A., Gutierrez-Orrantia, M.E., Lamikiz, A., Saintier, N. & Cirot, F. (2017). Microstructure characterization of recycled IN718 powder and resulting laser clad material. *Materials Characterization*, 134, 103-113.

Santecchia, E., Spigarelli, S. & Cabibbo M. (2020). Material Reuse in Laser Powder Bed Fusion: Side Effects of the Laser—Metal Powder Interaction. *Metals*, 10(3), 1-21.

Sauerwein, M., Doubrovski, E., Balkenende, R., & Bakker, C. (2019). Exploring the potential of additive manufacturing for product design in a circular economy. *Journal of Cleaner Production*, 226, 1138–1149. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.108>

Sendino, S., Martinez, S. & Lamikiz, A. (2020). Characterization of IN718 recycling powder and its effect on LPBF manufactured parts. *Procedia CIRP*, 94, 227-232.

Shalnova, S. A., kuzminova, Y. O., Evlashin, S. A., Klimova-Korsmik, O. G., Shibalova, A. A. & Turichin, G. A. (2022). Effect of recycled powder content on the structure and mechanical properties of Ti-6Al-4V alloy produced by direct energy deposition. *Journal of Alloys and Compounds*, 893.

Sutton, A., Kriewall, C., Karnati, S., Leu, M. & Newkirk, J. (2020). Characterization of AISI 304L Stainless Steel Powder Recycled in the Laser Powder-Bed Fusion Process. *Additive Manufacturing*, 32, 1-33.

Terrassa, K.L., Haley, J.C., MacDonald, B.E. & Schoenung, J.M. (2018). Reuse of powderfeedstock for directed energy deposition. *Powder Technology*, 338, 819–829.

Wiśnicki, B.; Dzhuguryan, T.; Mielniczuk, S.; Petrov, I. & Davydenko, L. (2024). A Decision Support Model for Lean Supply Chain Management in City Multifloor Manufacturing Clusters. *Sustainability*, 16, 8801. <https://doi.org/10.3390/su16208801>

Wurst, J., Mozgova, I. & Lachmayer, R. (2022). Sustainability Assessment of Products manufactured by the Laser Powder Bed Fusion (LPBF) Process. *Procedia CIRP*, 105, 243-248.

Yadegari, M. J., Martucci, A., Biamino, S., Ugues, D., Montanaro, L., Fino, P., & Lombardi, M. (2025). Aluminum Laser Additive Manufacturing: A Review on Challenges and Opportunities Through the Lens of Sustainability. *Applied Sciences*, 15(4), 2221. <https://doi.org/10.3390/app15042221>