

Sinergia entre Economía Circular e Industria 5.0 para la Sostenibilidad Agroindustrial: Una Revisión Sistemática

Aquije Pérez, Gloria María¹; Cruz Ormeño, Grecia Alejandra²; Arroyo Condeña Erika Edith³

^{1,2}Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U21301778@utp.edu.pe; U21322205@utp.edu.pe

³Universidad Tecnológica del Perú, Perú C27266@utp.edu.pe

Resumen— En un contexto de demanda creciente y recursos cada vez más limitados, la agroindustria enfrenta el desafío urgente de evolucionar hacia modelos productivos más regenerativos y socialmente responsables. El objetivo del presente artículo fue analizar la sinergia entre la economía circular (EC) y la industria 5.0 (I5.0) para potenciar la sostenibilidad en el sector agroindustrial. La estrategia metodológica consistió en una revisión sistemática de literatura (RSL). Bajo el enfoque PICO y el protocolo PRISMA, se realizó una búsqueda exhaustiva en Scopus y Web of Science que permitió identificar 863 registros, de los cuales 20 cumplieron los criterios de inclusión. Los resultados destacan que la convergencia entre EC e I5.0 promueve un uso más eficiente de los recursos, reduce impactos ambientales mediante procesos optimizados y tecnologías inteligentes, y favorece beneficios sociales asociados al bienestar, la seguridad laboral y el fortalecimiento de la cultura organizacional. Asimismo, se identificaron desafíos como la limitada adopción tecnológica, los costos iniciales elevados y la escasez de evidencia empírica aplicada al sector. El estudio concluye que la articulación entre EC e I5.0 constituye una oportunidad estratégica para avanzar hacia una agroindustria más resiliente y sostenible, subrayando la necesidad de fortalecer la investigación aplicada y los marcos institucionales para lograr su implementación efectiva.

Palabras clave— Economía Circular, Industria 5.0, agroindustria, sostenibilidad, tecnologías inteligentes.

I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la agroindustria enfrenta un escenario complejo marcado por el cambio climático, el deterioro ambiental, el agotamiento de recursos naturales y la creciente demanda alimentaria [1], [2] [3]. Se estima que el 50% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y más del 90% de la degradación de ecosistemas y estrés hídrico se derivan de la producción de materiales, combustibles y alimentos [4]. Además, esta actividad industrial genera altos volúmenes de desechos; según la FAO, alrededor del 33 % de la producción mundial de alimentos, equivalente a unos 930 millones de toneladas, se pierde o desperdicia en la cadena de suministro, afectando la alimentación de 800 millones de personas [5]. Estos problemas se deben, en gran medida, a la predominancia del modelo de economía lineal, basado en el enfoque de “extraer-fabricar-desechar”, el cual genera impactos negativos a nivel ambiental, social y económico [6]. Sin embargo, los subproductos y residuos agrícolas pueden revalorizarse para producir bioenergía, biomateriales o

biofertilizantes, lo que evidencia la existencia de recursos valiosos que el modelo lineal no logra recuperar [7].

Frente a ello, la economía circular (EC) surge como un imperativo estratégico e impulsor de sostenibilidad para el sector, al fundamentarse en principios como la reducción, la reutilización, la readaptación y el reciclaje orientado a prolongar la vida útil de insumos y productos alimentarios [8] [9]. Por ejemplo, Silva et al. [10] destacan el potencial de la valorización de los residuos orgánicos de una cadena agroalimentaria bananera en la producción de fertilizantes, biocombustibles y materiales para el tratamiento de aguas residuales dentro de un marco de EC, evidenciando su eficacia para mitigar los desafíos de la gestión de residuos, reducir el impacto ambiental y respaldar un modelo productivo más sostenible y económicamente viable. No obstante, su implementación a gran escala todavía enfrenta barreras estructurales y operativas como la baja participación y compromiso dentro de las organizaciones [11], las restricciones tecnológicas, la ausencia de marcos regulatorios sólidos y la fragmentación de las cadenas de suministro [12].

A la luz de esas limitaciones, la industria 5.0 (I5.0) plantea una perspectiva distinta al situar en el centro tres pilares: la sostenibilidad, el enfoque humanista y la resiliencia, sin renunciar al aprovechamiento de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial, el análisis de datos en tiempo real y la robótica colaborativa [8], [12]. Con esta combinación se persigue la creación de procesos notablemente más inteligentes y eficientes que, al mismo tiempo, respeten los principios de la economía circular. Las proyecciones indican que tales innovaciones permitirán elevar la productividad de manera sustancial, reducir al mínimo el impacto ambiental y dar respuesta efectiva a los retos políticos y sociales que rodean hoy los sistemas de producción de alimentos [13]. De hecho, diversos estudios aplicados demuestran los beneficios cuantificables de estas tecnologías, como la reducción del tiempo de rastreo de contaminación de 7 días a 2,2 s, disminuciones del 30 % en las pérdidas de productos perecederos mediante IoT y en 20% las de grano a través de gemelos digitales, así como la reducción del consumo de energía entre un 19 % y 41 % en invernaderos inteligentes [14]. Asimismo, Mangla et al. [15] confirman el impacto social de blockchain en las cadenas de suministro de leche, donde la trazabilidad integral de la salud animal, la calidad del producto y los procesos de distribución contribuye a la

reducción del fraude, al incremento del bienestar animal y al fortalecimiento del desarrollo rural. En consecuencia, la industria 5.0 se perfila como un aliado clave para la agroindustria, al abrir el camino hacia un modelo productivo más flexible, socialmente responsable y centrado en las personas [1].

Al mismo tiempo, los trabajos más recientes reflejan un interés creciente por la confluencia entre industria 5.0 y la economía circular, dado el enorme potencial de esta alianza para reconducir los modelos productivos hacia patrones claramente más sostenibles [4]. En particular, Rejeb et al. [12] destacan que la combinación de tecnologías emergentes con una colaboración fluida entre personas y máquinas es capaz de generar procesos industriales al mismo tiempo más eficientes y circulares. Por su parte, Dwivedi et al. [4] delimitan los factores críticos cuya presencia resultará determinante para que esta integración alcance el éxito esperado.

En este escenario, la unión entre industria 5.0 y la economía circular se convierte en un vector decisivo de transformación para la agroindustria. Al combinar tecnologías inteligentes con los principios de circularidad, se promueve una producción visiblemente más sostenible, se optimiza el uso de los recursos, se reducen de forma significativa los residuos y se abren paso nuevos modelos de negocio de mayor valor añadido [16].

A pesar de que la alianza entre industria 5.0 y la economía circular abre posibilidades reales para avanzar hacia un desarrollo verdaderamente sostenible, su puesta en práctica dista de ser sencilla. Entre los principales obstáculos suelen mencionarse los elevados costos de partida, la exigencia de infraestructuras específicas, la necesidad de programas intensivos de capacitación y la aún insuficiente inversión en investigación aplicada [16]. A esto se suma la dificultad de conectar estos avances con objetivos ambientales de mayor alcance, lo que constituye un reto adicional de considerable magnitud [8]. Esto genera un desfase entre el potencial transformador y la aplicación práctica de estas herramientas, lo que subraya la importancia de explorar mecanismos más inclusivos que posibiliten su uso simultáneo.

Pese a ello, gran parte de la literatura disponible aún no aborda la sinergia entre EC e I5.0 como núcleo central, sino que la presenta de forma tangencial dentro de estudios más amplios orientados a industria 4.0, digitalización avanzada o sostenibilidad en general [17], [18]. Además, las investigaciones se han concentrado principalmente en sectores como manufactura o energía, relegando al agroindustrial pese a su relevancia económica, social y ambiental [19], [20]. Los estudios que sí existen en este ámbito suelen enfocarse por separado en la I5.0 o en la EC lo que revela la ausencia de un marco integrador [21], [22]. Esto evidencia un vacío académico: aún no existen artículos que alineen ambos paradigmas de manera integral y sinérgica en el sector agroindustrial, lo que impulsa esta revisión sistemática de literatura (RSL).

El presente estudio se justifica por la relevancia científica, social, económica, ambiental y práctica. Desde lo científico,

resulta necesario consolidar un cuerpo de conocimiento que articule la convergencia entre los pilares de la I5.0 y los principios de la EC en la agroindustria [4], [12]. Respecto al plano social, la simbiosis humano-máquina permite orientar la tecnología al servicio de las personas, priorizando su bienestar y complementando sus capacidades en lugar de sustituirlas [23]. A su vez, desde la perspectiva económica y ambiental, la urgencia de minimizar el desperdicio de alimentos, salvaguardar los recursos y mitigar los impactos del cambio climático convierte este tema en una prioridad global [8]. Por ende, analizar el potencial de las herramientas de I5.0 para facilitar la circularidad en la agroindustria ayuda a mejorar la eficiencia de recursos, reducir el impacto ambiental y brindar información valiosa para responsables de políticas y empresas, aportando al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 12 y 13 [1].

El objetivo de esta RSL es analizar la sinergia entre la EC y la I5.0 para potenciar la sostenibilidad en el sector agroindustrial. Con ese propósito, se localizan, categorizan y examinan los trabajos que han explorado una o ambas corrientes de forma aislada o combinada, buscando organizar el conocimiento actualmente fragmentado y determinar cómo esa convergencia puede favorecer la emergencia de una agroindustria más resiliente, ambientalmente viable y verdaderamente centrada en las personas. En coherencia con lo anterior, el estudio propone la construcción de un marco conceptual integrador que permita destacar los avances consolidados, identificar las lagunas pendientes y señalar oportunidades claras de investigación futura, constituyendo así una contribución relevante para investigadores, empresas del sector y formuladores de políticas públicas.

En tal sentido, se estructura el documento de la siguiente manera: En la sección de Metodología se describe el método utilizado para la RSL, donde también se abordan las preguntas de investigación, junto con la estrategia de búsqueda empleada, los criterios aplicados para incluir o excluir estudios, y el proceso seguido en la selección y el análisis de los artículos. Por su parte, en la sección de Resultados se presentan y organizan los hallazgos derivados de las fuentes revisadas. En la Discusión se lleva a cabo un contraste crítico entre la sinergia EC-I5.0 y las contribuciones reportadas por otros investigadores. Finalmente, en las Conclusiones se resumen los principales resultados del estudio junto con sus implicaciones, al tiempo que se proponen líneas de investigación futuras para consolidar este campo en desarrollo.

II. METODOLOGÍA

El estudio corresponde a una revisión sistemática de literatura, cuyo propósito central fue analizar a fondo el impacto que genera la integración entre la economía circular (EC) y la industria 5.0 (I5.0) en la sostenibilidad de las cadenas agroindustriales. Para formular la pregunta de investigación principal, se empleó el marco PICO (Población, Intervención, Comparación y Resultados), lo que facilitó una

organización adecuada de las palabras clave incorporados en las búsquedas. De igual modo, se definieron criterios de inclusión y exclusión, alineados con la interrogante que orienta el trabajo. En relación con las fuentes consultadas, se priorizaron bases de datos académicas especializadas como recursos primarios para recuperar la información necesaria. Siguiendo las directrices del protocolo PRISMA, se establecieron límites de búsqueda, se eliminaron registros duplicados y se efectuó un primer filtro a partir del título y el resumen. Por último, se realizó un análisis minucioso a texto completo para asegurar que solo aquellos artículos que se alinearan directamente con los objetivos de esta RSL fueran seleccionados y conservados.

A. Planificación de la revisión bibliográfica

Con el propósito de analizar de manera integral la sinergia entre la I5.0 y la EC en el sector agroindustrial, se formuló la siguiente pregunta de investigación:

QP: ¿De qué manera la sinergia entre economía circular e industria 5.0, en comparación con enfoques de producción previos, impulsa la sostenibilidad agroindustrial?

Seguida de las siguientes preguntas específicas:

Q1: ¿Qué características comunes y complementarias presentan la EC y la I5.0 que permiten su sinergia en los sistemas productivos?

Q2: ¿De qué manera esta sinergia difiere de los enfoques de producción previos, como la industria 4.0 o el modelo lineal tradicional?

Q3: ¿Qué impactos ambientales y sociales se evidencian en la implementación conjunta de la EC y la I5.0?

Q4: ¿Qué herramientas facilitan la integración efectiva entre EC e I5.0 y qué desafíos persisten para su implementación?

El estudio fue desarrollado desde un enfoque cualitativo y descriptivo, se utilizó la metodología PICO para delimitar con exactitud los términos de la búsqueda. Este marco permitió desglosar cada componente y traducirlo en palabras clave correspondientes, las mismas que se definieron en inglés, tal como se detalla en la Tabla I.

En cuanto a la recolección de información, se realizó de forma estratégica en dos de las principales bases de datos académicas a nivel mundial: Scopus y Web of Science. De las fuentes escogidas, se formuló y ejecutó una ecuación de búsqueda precisa que se aplicó homogéneamente en todos los campos de búsqueda definidos para garantizar la exhaustividad de la revisión.

TABLA I
METODOLOGIA PICO

P (Población)	Agroindustria, sector agroindustrial, empresas agroindustriales, cadenas agroindustriales, industrias.	Agroindustry OR "agro-industrial sector" OR "agroindustrial companies" OR "agroindustrial chains" OR industry.
I (Intervención)	Economía circular, circularidad, bioeconomía, industria 5.0, colaboración humano-máquina, tecnologías.	("Circular economy" OR circularity OR bioeconomy) AND ("Industry 5.0" OR "human-machine collaboration" OR technologies)
C (Comparación)	Economía lineal, fabricación convencional, producción lineal, industria 4.0.	"Linear economy" OR "conventional manufacturing" OR "linear production" OR "Industry 4.0"
O (Resultado)	Sostenibilidad, eficiencia, resiliencia, reducción de residuos, objetivos de desarrollo sostenible (ODS).	Sustainability OR efficiency OR resilience OR "waste reduction" OR "Sustainable Development Goals"

A continuación, se presenta la sintaxis de la ecuación de búsqueda:

(Agroindustry OR "agro-industrial sector" OR "agroindustrial companies" OR "agroindustrial chains" OR industry) AND ("Circular economy" OR circularity OR bioeconomy) AND ("Industry 5.0" OR "human-machine collaboration" OR technologies) AND ("Linear economy" OR "conventional manufacturing" OR "linear production" OR "Industry 4.0") AND (Sustainability OR efficiency OR resilience OR "waste reduction" OR "Sustainable Development Goals")

Se definieron criterios de inclusión para asegurar una búsqueda pertinente:

- **CI1:** Investigaciones que aborden la Economía Circular (EC), la Industria 5.0 (I5.0) o que exploren su integración.
- **CI2:** Estudios centrados en la agroindustria o, en su defecto, con un enfoque general que aporte bases conceptuales transferibles al sector.
- **CI3:** Artículos con enfoques previos (economía lineal, modelos tradicionales, Industria 4.0) para establecer comparaciones.
- **CI4:** Publicaciones que discutan aspectos relacionados al impacto en la sostenibilidad de las cadenas de suministro.
- **CI5:** Artículos originales y/o revisiones sistemáticas, indexadas en las bases de datos Scopus o Web of Science.

A fin de lograr un mayor grado de exactitud en la revisión, se establecieron criterios de exclusión vinculados con la temporalidad de las publicaciones, el tipo de documentos, el acceso al texto completo, el idioma y el área temática en torno

a la economía circular, la industria 5.0 y la sostenibilidad agroindustrial.

- **CE1:** Estudios que no aborden la EC ni la I5.0, o que no tengan relación con la sostenibilidad agroindustrial.
- **CE2:** Investigaciones aplicadas de manera exclusiva a sectores específicos (ej. construcción, textil, minería), sin aportar elementos replicables o comparativos para el ámbito agroindustrial.
- **CE3:** Tipos de documentos que no correspondan a artículos científicos (ej. tesis, libros, actas de conferencias o material no indexado).
- **CE4:** Documentos sin acceso al texto completo.
- **CE5:** Publicaciones en idiomas distintos al inglés y español.
- **CE6:** Investigaciones anteriores a 2020, por no enmarcarse en la evolución de los nuevos paradigmas productivos.

B. Proceso de búsqueda

Tras aplicar los criterios de inclusión y exclusión definidos en el procedimiento de búsqueda, se empleó la metodología Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) como guía para el desarrollo detallado de la RSL. Se localizaron inicialmente 863 registros en las bases de datos consultadas y se eliminaron 213 de ellos tras identificar títulos y autores duplicados. Posteriormente, se revisó la disponibilidad de los textos completos de 650 informes, de los cuales 283 no pudieron ser recuperados por restricciones de acceso. Adicionalmente, se examinaron los 367 artículos a texto completo, cuya pertinencia y cumplimiento de los criterios establecidos se clasificaron mediante el método semáforo, lo que permitió verificar su elegibilidad de manera más precisa. Como resultado de esta evaluación, se excluyeron 347 estudios (4 por idioma, 121 por título y 222 por resumen), quedando finalmente 20 fuentes seleccionadas. La Figura 1 ilustra el proceso de selección seguido en la revisión sistemática.

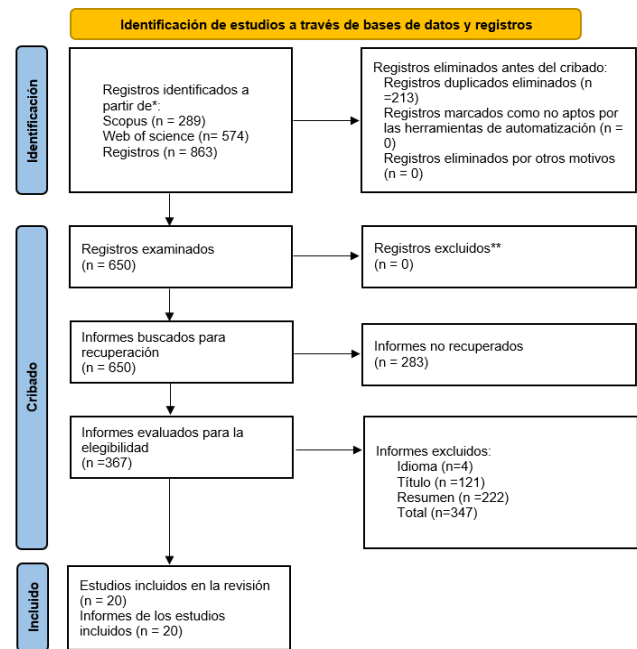


Fig. 1. Diagrama Prisma de la RSL

III. RESULTADOS

A partir de la aplicación de la metodología PRISMA, se realizó una revisión sistemática que permitió recopilar un total de 17 estudios cualitativos y 3 cuantitativos. Estos fueron organizados de forma minuciosa y detallada en una hoja de cálculo de Excel. Posteriormente, se llevó a cabo un análisis exhaustivo de cada artículo mediante fichas de extracción de información, en las cuales se identificaron las características fundamentales de cada estudio relevantes para responder las preguntas de investigación y, en consecuencia, abordar la pregunta principal. Asimismo, se examinaron en profundidad las distintas secciones, los resultados y los hallazgos específicos de cada artículo, considerando los criterios de revisión PICO.

Países donde se realizó el estudio

En relación con la procedencia de los estudios analizados, se identificó que las investigaciones abarcan 16 países diferentes. El Reino Unido concentra la mayor proporción de publicaciones (15 %), seguido de China y Turquía, cada uno con un 10 % del total (Figura 2).

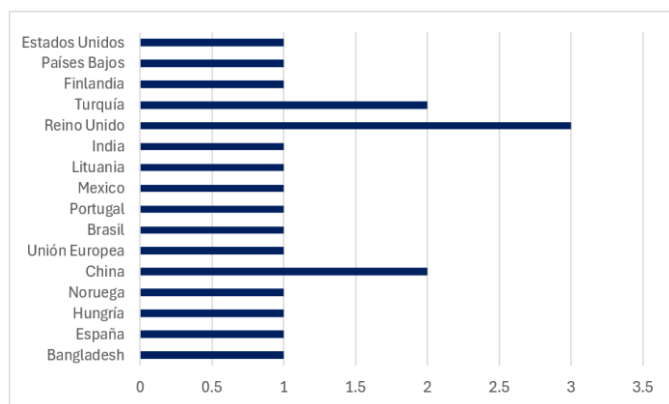


Fig. 2. Orígenes de documentos recuperados

Respuestas a las preguntas PICO

En esta sección se presentan las respuestas derivadas del análisis de los estudios incluidos en la revisión sistemática, organizadas conforme a las preguntas de investigación formuladas bajo la metodología PICO. Cada componente (Población, Intervención, Comparación y Resultado) se analiza con base en la evidencia recopilada, permitiendo identificar los principales hallazgos y tendencias reportadas en la literatura científica.

A. RQ1

¿Qué características comunes y complementarias presentan la EC y la I5.0 que permiten su sinergia en los sistemas productivos?

De los 20 estudios revisados, 14 abordan la relación entre la EC e I5.0. El análisis de estos artículos permitió identificar seis patrones recurrentes.

En primer lugar, todos los artículos coinciden en que la sostenibilidad y la eficiencia en el uso de recursos constituyen el eje común que conecta ambos enfoques, ya que ambos buscan reducir los impactos ambientales y optimizar los flujos materiales y energéticos en el sistema productivo. En segundo lugar, estos mismos estudios establecen un consenso sobre la circularidad (cierres de ciclo, reutilización, remanufactura y eco-diseño) como objetivo operacional de la EC que la I5.0 ayuda a implementar. Un tercer patrón es la digitalización y el uso de tecnologías habilitadoras (IA, IoT, blockchain, gemelos digitales, big data) que permiten trazabilidad y control en tiempo real de los bucles circulares [12], [17], [19], [24]–[34]. En cuarto lugar, la mayor parte de los estudios incorpora la dimensión humano-céntrica de la I5.0 como complemento necesario a la lógica ecológica de la EC [17], [19], [24]–[26], [28]–[34]. El quinto patrón sintetiza la complementariedad funcional: la EC entrega el marco normativo y de valor; la I5.0 suministra las capacidades operativas y organizativas para aplicarlo de forma escalable y verificable [12], [17], [22], [24]–[34]. Finalmente, ocho trabajos señalan explícitamente que esta integración potencia la resiliencia y adaptabilidad de

las cadenas productivas frente a entornos cambiantes [12], [17], [24], [25], [30], [32]–[34].

En la Figura 3 se sintetizan estos hallazgos mediante un diagrama de Venn, que ilustra los elementos comunes y las características complementarias de ambos enfoques en los sistemas productivos analizados.

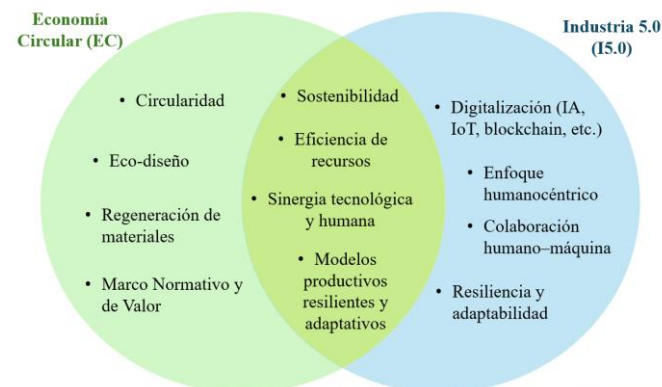


Fig. 3. Relación entre la EC y la I5.0 según los estudios revisados

B. RQ2

¿De qué manera esta sinergia difiere de los enfoques de producción previos, como la Industria 4.0 o el modelo lineal tradicional?

De los 20 estudios analizados, 19 permiten establecer diferencias entre los modelos productivos previos y la sinergia entre la Economía Circular (EC) y la Industria 5.0 (I5.0). En conjunto, los hallazgos evidencian una evolución conceptual desde un paradigma lineal orientado al crecimiento y consumo ilimitado hacia un modelo regenerativo, ético y colaborativo [12], [17], [19], [24]–[39].

Con el fin de sintetizar las diferencias identificadas, se elaboró la Tabla II, que resume los principales contrastes entre el modelo lineal, la Industria 4.0 y la sinergia EC–I5.0 según la literatura revisada.

TABLA II
COMPARACIÓN: MODELO LINEAL, INDUSTRIA 4.0 Y EC–I5.0.

Criterio	Modelo lineal tradicional	Industria 4.0	Sinergia EC–I5.0
Lógica productiva	Basada en el ciclo “extraer–producir–desechar”; prioriza el crecimiento económico y el consumo ilimitado sin considerar la regeneración de recursos [12], [19], [26]–[29].	Se orienta a la automatización, digitalización y eficiencia operativa mediante tecnologías inteligentes (IoT, IA, robótica), pero mantiene un enfoque tecnocómico	Propone un modelo regenerativo y colaborativo, donde los recursos materiales, energéticos y de información se mantienen dentro del sistema mediante estrategias circulares y

	[33]–[37].	[17], [24], [28], [31], [38].	decisiones basadas en datos [12], [25], [29], [33]–[36].
Objetivo principal	Maximizar la producción y el beneficio económico a corto plazo [12], [26], [28], [33], [37].	Aumentar la eficiencia y la productividad mediante automatización y conectividad [17], [24], [28], [32], [39].	Alcanzar la prosperidad sostenible, combinando eficiencia, bienestar humano y responsabilidad ambiental [17], [19], [26], [28], [30], [31], [33], [34].
Uso de recursos	Explotación continua de materias primas; altos niveles de residuos y emisiones [12], [19], [26]–[29], [35], [36].	Optimiza procesos, pero sigue dependiendo de insumos vírgenes y cadenas de suministro lineales [24], [27], [28], [37], [38].	Implementa ciclos cerrados, reutilización, remanufactura y eco-diseño; reduce la extracción y el desperdicio [12], [17], [25], [26], [29], [33]–[36].
Rol de la tecnología	Limitado y reactivo; centrado en la mecanización tradicional y sin integración digital o retroalimentación del proceso productivo [12], [27], [29], [35], [37], [38].	Predominantemente automatizador y tecnocéntrico; el ser humano cumple un rol pasivo [17], [24], [28], [31], [32].	La tecnología se convierte en facilitadora de circularidad y trazabilidad, potenciando la cooperación humano-máquina y la toma de decisiones ética y sostenible [19], [25], [27]–[32], [34]–[39].
Dimensión humana	Prácticamente ausente; el trabajo se valora solo como fuerza productiva [22], [29], [35], [37].	Limitada; el enfoque se centra en la eficiencia digital más que en el bienestar laboral [17], [24], [31], [38].	Humanocéntrica: prioriza la creatividad, la seguridad y la participación activa de las personas en un entorno sostenible y ético [17], [19], [24], [26], [30] [33], [39].
Sostenibilidad	Ausente; genera impactos negativos en el entorno y en las comunidades [12], [19], [26]–[29], [33]–[37].	Parcial; mejora la eficiencia energética pero no aborda integralmente las dimensiones ambiental y social [17], [24], [28], [31], [32], [38].	Integrada como eje estructural: busca equilibrio entre prosperidad económica, regeneración ecológica y bienestar social [12], [17], [19], [24]–[34], [39].

C. RQ3

¿Qué impactos ambientales y sociales se evidencian en la implementación conjunta de la EC y la I5.0?

De las 20 fuentes analizadas, 17 evidencian impactos socioambientales derivados de la implementación conjunta de la EC y la I5.0.

En el plano ambiental, se destacan cuatro ejes principales. En primer lugar, la reducción de residuos, emisiones y huella ecológica mediante tecnologías inteligentes que optimizan los procesos productivos [12], [17], [19], [24]–[32], [34]–[36], [40]. Segundo, el incremento de la eficiencia energética impulsado por el monitoreo y control digital del consumo en tiempo real [17], [19], [24], [27]–[30], [32], [35], [36], [40]. En tercer lugar, la gestión de materias primas orientada a minimizar el uso de recursos vírgenes y promover la regeneración de flujos materiales [12], [17], [19], [24]–[30], [32]–[36], [40]. Por otro lado, la prolongación del ciclo de vida de productos [12], [19], [24]–[26], [28]–[30], [33], [34], [36], [40], vinculada con estrategias de reutilización, reciclaje y remanufactura. En conjunto, estos hallazgos evidencian una transición hacia modelos productivos más limpios, regenerativos y circulares.

En cuanto a los impactos sociales, predominan cinco patrones: la mejora del bienestar y seguridad laboral [12], [17], [19], [24]–[30], [32]–[35]; la generación de nuevos empleos [17], [24]–[28], [30], [35], [40]; la promoción de la recualificación y el desarrollo de nuevas competencias [12], [24], [26], [27], [29], [32]–[34], [36], [40]; el fortalecimiento de una cultura colaborativa, inclusiva y socialmente responsable [12], [17], [19], [24], [26], [28]–[30], [32]–[36] y la mejora de la seguridad alimentaria [19], [29], [31], [34], [35], [40]. Es decir que, se puede lograr un entorno laboral más equitativo, productivo y centrado en las personas.

La Figura 4 ilustra estos resultados en un gráfico de barras agrupado, que muestra la frecuencia de cada impacto, diferenciando las dimensiones ambiental y social.

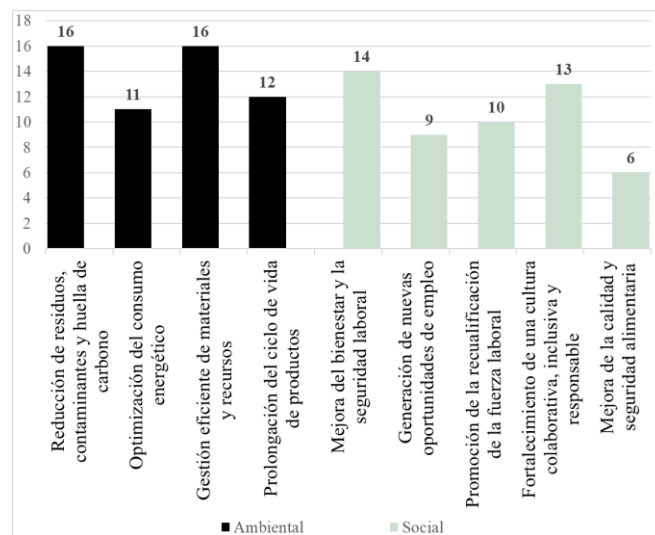


Fig. 4. Impactos ambientales y sociales de la sinergia entre I5.0 y EC

D. RQ4

¿Qué herramientas facilitan la integración efectiva entre EC e I5.0 y qué desafíos persisten para su implementación?

Los 20 estudios revisados identifican herramientas y factores habilitadores que facilitan la convergencia entre la EC y la I5.0, así como los principales desafíos que limitan su implementación efectiva. Los resultados revelan que esta integración depende tanto de capacidades tecnológicas avanzadas (IA, IoT, blockchain, gemelos digitales, robótica colaborativa) como de condiciones organizacionales, económicas y regulatorias que permitan su adopción sostenible [12], [17], [19], [24]–[40].

Asimismo, la literatura coincide en que los avances técnicos deben acompañarse de una transformación cultural y formativa, junto con marcos institucionales y académicos que garanticen una transición equitativa y basada en evidencia.

Con el fin de sintetizar los resultados, se presenta la Tabla III, la cual agrupa los principales facilitadores y desafíos según cinco categorías analíticas: tecnológicos, organizacionales, económicos, regulatorios y académicos.

TABLA III
FACILITADORES Y DESAFÍOS DE LA EC–I5.0

Categoría	Facilitadores identificados	Desafíos asociados
Tecnológicos	Innovaciones (IA, IoT, Big Data, blockchain, gemelos digitales, robótica colaborativa, impresión 3D) que optimizan la trazabilidad, transparencia y eficiencia [12], [17], [19], [24]–[40].	Altos costos de inversión, brechas de infraestructura digital, riesgos de ciberseguridad y falta de interoperabilidad y estandarización [12], [19], [24]–[40].
Organizacionales	Cultura de innovación, liderazgo sostenible, gestión del conocimiento y colaboración humano–máquina [12], [17], [24], [26]–[30], [33], [34], [40].	Brecha de competencias, resistencia al cambio y deficiente integración entre sostenibilidad y operaciones [17], [24], [28], [30], [31], [34].
Económicos	Modelos circulares rentables, eficiencia energética, economía de retorno [19], [24], [26], [28], [35], [37].	Costos iniciales altos, limitaciones financieras y escasez de incentivos económicos [19], [25], [27], [35], [37], [39].
Regulatorios	Políticas de sostenibilidad, certificaciones ambientales y estándares internacionales que orientan la transición circular [19], [24], [27], [29], [30], [33].	Ausencia de marcos regulatorios integrales, incentivos débiles y desigualdad digital entre países [12], [19], [25], [27], [29], [30], [33], [34], [37].
Académico	Avances conceptuales y metodológicos sobre la convergencia EC–I5.0 [26], [33], [34].	Fragmentación teórica, escasez de evidencia empírica y falta de indicadores para medir el nivel de integración y estudios longitudinales [26], [33], [34].

IV. DISCUSIÓN

Los resultados de esta revisión sistemática muestran avances en digitalización, sostenibilidad operativa y trazabilidad en la agroindustria. Estos hallazgos coinciden con Stanescu et al. [41] y Pakseresht et al. [42], quienes resaltan el papel de las tecnologías digitales para fortalecer cadenas agroalimentarias resilientes y circulares. De manera similar, los estudios analizados en esta revisión priorizan soluciones para optimizar procesos, reducir impactos ambientales y mejorar la toma de decisiones mediante datos, lo cual es coherente con investigaciones sobre agricultura inteligente y manufactura avanzada [43], [44].

Los temas más frecuentes identificados en la literatura revisada, como sostenibilidad ambiental, innovación, eficiencia energética y adopción tecnológica, se relacionan con lo planteado por Rajput et al. [45] y Carlos y de Mattos [46], quienes reconocen la complementariedad entre digitalización y economía circular en la transición hacia modelos productivos responsables. También se alinean con aportes que destacan que las tecnologías asociadas a industria 5.0 favorecen operaciones más adaptativas y resilientes [47], [48]. Sin embargo, al comparar estas expectativas con los resultados obtenidos, aparece una diferencia importante: la implementación real en el sector agroindustrial avanza de manera más lenta y desigual que lo proyectado en la literatura teórica.

Este contraste también se observa en el caso de la trazabilidad. Aunque autores como Plakantara y Karakitsiou [49] documentan mejoras en la gestión de riesgos gracias a tecnologías emergentes, los estudios revisados muestran que la adopción de estas herramientas sigue siendo heterogénea. Esto sugiere que, aunque existe claridad sobre sus beneficios, su aplicación práctica continúa enfrentando limitaciones en diferentes entornos agroindustriales.

Los beneficios identificados en la revisión se corresponden con la evidencia previa sobre cadenas agroalimentarias digitales. Investigaciones como las de Plakantara y Karakitsiou [49] y Aivazidou et al. [50] confirman que las tecnologías de monitoreo y trazabilidad fortalecen la transparencia y la toma de decisiones, aunque nuevamente su implementación no es uniforme. Además, el componente social presente en los estudios analizados, relacionado con formación técnica y seguridad laboral, coincide con el enfoque humano que caracteriza a Industria 5.0 y que ha sido resaltado por trabajos recientes [44], [48], [50], [51].

La brecha más evidente entre esta revisión y la literatura disponible es la falta de estudios que integren de manera explícita economía circular e industria 5.0 en la agroindustria. Aunque existen aportes sólidos sobre ambos enfoques por separado, diversos autores advierten que su convergencia aún se desarrolla principalmente a nivel conceptual [51], [52]. En esta misma línea, la revisión de estrategias circulares en

sistemas agroalimentarios realizada por Singh et al. [53] también destaca que gran parte de la literatura permanece en niveles teóricos y carece de evaluaciones empíricas robustas, lo cual coincide directamente con los hallazgos de este estudio.

Los resultados de esta revisión confirman esa observación, pues se identificó una escasez de marcos integrados, poca evidencia empírica y ausencia de metodologías estandarizadas, lo que mantiene esta intersección como un vacío vigente en la literatura contemporánea [42], [46], [49], [50], [53]. Los hallazgos muestran que, si bien ya existen bases conceptuales sobre digitalización, circularidad e Industria 5.0 [50], [51], la aplicación conjunta de estos enfoques en la agroindustria continúa siendo incipiente. Esto resalta la necesidad de desarrollar estudios empíricos y guías operativas que permitan avanzar hacia implementaciones reales y medibles, tal como señalan las investigaciones más recientes en innovación digital y sostenibilidad [52], [53].

V. CONCLUSIÓN

En conclusión, esta investigación analizó la influencia de la sinergia entre la industria 5.0 y la economía circular en la sostenibilidad del sector agroindustrial, evidenciándose que este nuevo paradigma ofrece ventajas significativas frente a sus predecesoras. Mientras la economía lineal se caracteriza por los altos niveles de extracción y la generación de contaminantes, y la industria 4.0 se destaca por la automatización y la eficiencia operativa, la integración EC-15.0 se sustenta en la circularidad de los recursos y el uso de innovaciones tecnológicas con una visión centrada en el ser humano, configurando así un modelo productivo más resiliente, regenerativo y socialmente responsable.

Entre los principales hallazgos se encontraron impactos ambientales positivos tales como la minimización de residuos, el aumento de la eficiencia energética y la gestión responsable de materias primas. Del mismo modo, esta convergencia contribuye a nivel social a mejorar el bienestar y la seguridad en el trabajo, potenciar la colaboración humano-máquina y fortalecer la seguridad alimentaria. Estos beneficios son impulsados por factores tecnológicos, organizacionales y económicos, pero aún persisten retos importantes que dificultan su adopción a gran escala como los altos costos iniciales, la brecha de infraestructura digital y la baja disponibilidad de evidencia empírica, especialmente en contextos agroindustriales.

Ante la naturaleza predominantemente teórica de la literatura actual, resulta fundamental que las investigaciones futuras trasciendan el análisis conceptual y se enfoquen en la creación de marcos integradores que unifiquen el conocimiento hoy fragmentado. Esta evolución académica debe priorizar la obtención de evidencia empírica mediante estudios de caso aplicados en entornos industriales reales, extendiendo este análisis con especial énfasis a los países

emergentes. Bajo esta perspectiva, es imperativo desarrollar indicadores universales que permitan una medición estandarizada de los impactos socioeconómicos y ambientales de la Industria 5.0. Solo mediante este tránsito hacia la aplicación práctica será posible validar la contribución real de estas tecnologías a la economía circular, proporcionando así una base sólida para la toma de decisiones empresariales y el diseño de políticas públicas que garanticen una transición alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Agradecemos a la Universidad Tecnológica del Perú por fomentar y respaldar el desarrollo del presente trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] N. J. García Prado, F. G. Tigre Ortega, F. R. Lema Chicaiza, C. A. Rosero Mantilla, C. H. Sánchez Rosero, and A. Sigcha Quezada, "Indicadores de rendimiento de la cadena de suministro 5.0 para la agroindustria: revisión de literatura," *Conciencia Digital*, vol. 7, no. 3, pp. 112–134, jul. 2024. doi: 10.33262/CONCIENCIADIGITAL.V7I3.3089.
- [2] V. S. Yadav, A. R. Singh, A. Gunasekaran, R. D. Raut, and B. E. Narkhede, "A systematic literature review of the agro-food supply chain: Challenges, network design, and performance measurement perspectives," *Sustain Prod Consum*, vol. 29, pp. 685–704, 2022. doi: 10.1016/J.SPC.2021.11.019.
- [3] I. García-Sánchez y S. Enciso-Alfaro, "Women and circular transition in agri-food industry: The commitment to gender diversity as an engine of change," *Sustain. Develop.*, vol. 33, no. 1, pp. 1044–1067, 2024. doi: 10.1002/sd.3170.
- [4] A. Dwivedi, D. Agrawal, A. Jha, and K. Mathiyazhagan, "Studying the interactions among Industry 5.0 and circular supply chain: Towards attaining sustainable development," *Comput Ind Eng*, vol. 176, p. 108927, 2023. doi: 10.1016/J.CIE.2022.108927.
- [5] S. Abbate, P. Centobelli, R. Cerchione, G. Giardino, and R. Passaro, "Coming out the egg: Assessing the benefits of circular economy strategies in agri-food industry," *J Clean Prod*, vol. 385, p. 135665, 2023. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2022.135665.
- [6] L. A. Carrillo-Rodríguez, M. C. Romero, and J. A. Galindo Larrahondo, "The use of agro-industrial waste towards a sustainable circular economy: A systematic review," *Detritus*, vol. 31, pp. 45–61, 2025. doi: 10.31025/2611-4135/2025.19491.
- [7] M. Donner and H. De Vries, "How to innovate business models for a circular bio-economy?," *Business Strategy and the Environment*, vol. 30, no. 4, pp. 1932–1947, 2021. doi: 10.1002/bse.2725.
- [8] S. Nayeri, Z. Sazvar, and E. B. Tirkolaei, "Towards waste management 5.0: A nexus between circular economy and industry 5.0 dimensions," *Waste Manage.*, vol. 203, 2025. doi: 10.1016/j.wasman.
- [9] G. Betti, F. Gagliardi, A. Mecca, A. Riccaboni, and C. Tozzi, "Sustainability and Circularity of the Agri-food Systems: How to measure it? A first attempt on the Italian system," *Sustainability*, vol. 17, no. 7, p. 3169, 2025. doi: 10.3390/su17073169.
- [10] P. Silva, E. Orozco, D. Verduga, K. Diéguez, S. Ruiz and N. Sablón, "Prospective of the circular economy in a banana agri-food chain", *TEC Empresarial*, vol. 17, no. 1, pp. 34–52, 2023. doi: 10.18845/te.v17i1.6475.
- [11] S. Tumuyu y L. Marthalia, "Strategy on circular economy transition: A case study of agrocompany in Indonesia," *Journal of Infrastructure Policy and Development*, vol. 8, n.º 1, 2023. doi: 10.24294/jipd.v8i1.3021.

- [12] A. Rejeb, K. Rejeb, J. G. Keogh, and E. Süle, "When Industry 5.0 meets the circular economy: A systematic literature review," *Circ. Econ. Sustain.*, vol. 5, pp. 2621–2652, 2025. doi: 10.1007/s43615-025-00570-y.
- [13] D. Haloui, K. Oufaska, M. Oudani, and K. E. Yassini, "Bridging Industry 5.0 and Agriculture 5.0: Historical perspectives, opportunities, and future perspectives," *Sustainability*, vol. 16, no. 9, p. 3507, 2024. doi: 10.3390/su16093507.
- [14] S. Stanescu, C. Ionescu, M. Ştefan, L. Ionescu, G. Bondac y A. Cristea, "Digitalization and Blockchain Integration in Agri-Food Supply Chains: Towards a Resilient, Circular, and Sustainable Future", *Sustainability*, vol. 17, no. 20, p. 9276, 2025. doi: 10.3390/su17209276.
- [15] S. Mangla, Y. Kazancoglu, E. Ekinici, M. Liu, M. Özbiltekin y M. Sezer, "Using system dynamics to analyze the societal impacts of blockchain technology in milk supply chains", *Transp. Rev.*, vol. 149, p. 102289, 2021. doi: 10.1016/j.tre.2021.102289.
- [16] S. Hosseini, "An integrated decision-making framework for evaluating Industry 5.0 and circular economy in supply chain management using Z-numbers," *Applied Soft Computing*, vol. 181, 2025. doi: 10.1016/j.asoc.2025.113504.
- [17] S. Atif, "Analysing the alignment between circular economy and industry 4.0 nexus with industry 5.0 era: An integrative systematic literature review," *Sustainable Development*, vol. 31, no. 4, pp. 2155–2175, 2023. doi: 10.1002/SD.2542; WGROUP: STRING: PUBLICATION.
- [18] J. C. R. Hernandez, E. Villa-Enciso, S. Cardona-Acevedo, J. Valencia, and S. Velasquez Salas, "Smart Innovation for a Circular Economy: A Systematic Review of Emerging Trends and the Future of AI in the Sustainable Economy," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 13, p. 5793, 2025. doi: 10.3390/SU17135793/S1.
- [19] M. A. Shabur, A. Shahriar, and M. A. Ara, "From automation to collaboration: exploring the impact of industry 5.0 on sustainable manufacturing," *Discover Sustainability*, vol. 6, no. 1, pp. 1–23, 2025. doi: 10.1007/S43621-025-01201-0/FIGURES/1.
- [20] J. L. Hu, Y. Li, and J. C. Chew, "Industry 5.0 and Human-Centered Energy System: A Comprehensive Review with Socio-Economic Viewpoints," *Energies* 2025, vol. 18, no. 9, p. 2345, 2025. doi: 10.3390/EN18092345.
- [21] E. R. Cahyadi, N. Hidayati, N. Zahra, and C. Arif, "Integrating Circular Economy Principles into Agri-Food Supply Chain Management: A Systematic Literature Review," *Sustainability*, vol. 16, no. 16, p. 7165, 2024. doi: 10.3390/SU16167165.
- [22] Z. Ali, A. Muhammad, N. Lee, M. Waqar, and S. W. Lee, "Artificial Intelligence for Sustainable Agriculture: A Comprehensive Review of AI-Driven Technologies in Crop Production," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 5, p. 2281, 2025. doi: 10.3390/SU17052281/S1.
- [23] R. Rame, P. Purwanto, and S. Sudamo, "Industry 5.0 and sustainability: An overview of emerging trends and challenges for a green future," *Innovation and Green Development*, vol. 3, no. 4, p. 100173, 2024. doi: https://doi.org/10.1016/j.igdd.2024.100173.
- [24] C. Castillo, T. Otero-Romero, and E. J. Alvarez-Palau, "Navigating the transition to industry 5.0: advancing sustainability, resilience, and human-centricity in Spanish supply chain management," *Discover Sustainability* 2024 6:1, vol. 6, no. 1, pp. 1–20, Apr. 2025. doi: 10.1007/S43621-025-01190-0.
- [25] F. Psarommatas, G. May, and V. Azamfirei, "Product reuse and repurpose in circular manufacturing: a critical review of key challenges, shortcomings and future directions," *Journal of Remanufacturing* 2025 15:2, vol. 15, no. 2, pp. 273–310, Mar. 2025. doi: 10.1007/S13243-025-00153-Y.
- [26] M. N. Shafique, U. Adeel, and A. Rashid, "The Synergy Between Industry 5.0 and Circular Economy for Sustainable Performance in the Chinese Manufacturing Industry," *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 9952, vol. 16, no. 22, p. 9952, Nov. 2024. doi: 10.3390/SU16229952.
- [27] A. Mesjasz-Lech, A. Kemendi, and P. Michelberger, "Circular manufacturing and Industry 5.0. assessing material flows in the manufacturing process in relation to e-waste streams," *Engineering Management in Production and Services*, vol. 16, no. 1, pp. 114–133, Mar. 2024. doi: 10.2478/EMJ-2024-0009.
- [28] S. Garrido, J. Muniz, and V. Batista Ribeiro, "Operations Management, Sustainability & Industry 5.0: A critical analysis and future agenda," *Cleaner Logistics and Supply Chain*, vol. 10, p. 100141, Mar. 2024. doi: 10.1016/J.CLSCN.2024.100141.
- [29] C. Ramírez-Márquez, T. Posadas-Paredes, A. Y. Raya-Tapia, and J. M. Ponce-Ortega, "Natural Resource Optimization and Sustainability in Society 5.0: A Comprehensive Review," *Resources* 2024, Vol. 13, Page 19, vol. 13, no. 2, p. 19, Jan. 2024. doi: 10.3390/RESOURCES13020019.
- [30] M. Ghobakhloo, M. Iranmanesh, B. Foroughi, E. Babae Tirkolaei, S. Asadi, and A. Amran, "Industry 5.0 implications for inclusive sustainable manufacturing: An evidence-knowledge-based strategic roadmap," *J Clean Prod.*, vol. 417, p. 138023, Sep. 2023. doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2023.138023.
- [31] C.; Tumer, J. Oyekan, C. Turner, and J. Oyekan, "Manufacturing in the Age of Human-Centric and Sustainable Industry 5.0: Application to Holonic, Flexible, Reconfigurable and Smart Manufacturing Systems," *Sustainability* 2023, Vol. 15, Page 10169, vol. 15, no. 13, p. 10169, Jun. 2023. doi: 10.3390/SU151310169.
- [32] C. Turner, J. Oyekan, W. Gam, C. Duggan, and K. Abdou, "Industry 5.0 and the Circular Economy: Utilizing LCA with Intelligent Products," *Sustainability* 2022, Vol. 14, Page 14847, vol. 14, no. 22, p. 14847, Nov. 2022. doi: 10.3390/SU142214847.
- [33] C.-H.; Hsu et al., "Enabling Industry 5.0-Driven Circular Economy Transformation: A Strategic Roadmap," *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 9954, vol. 16, no. 22, p. 9954, Nov. 2024. doi: 10.3390/SU16229954.
- [34] V. Nasir et al., "Human-centric Industry 5.0 manufacturing: a multi-level framework from design to consumption within Society 5.0," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 18, no. 1, Dec. 2025. doi: 10.1080/19397038.2025.2551000;CTYPE:STRING:JOURNAL.
- [35] W. A. Varella et al., "Integrated Service Architecture to Promote the Circular Economy in Agriculture 4.0," *Sustainability* 2024, Vol. 16, Page 2535, vol. 16, no. 6, p. 2535, Mar. 2024. doi: 10.3390/SU16062535.
- [36] M. Sharma, S. Joshi, and K. Govindan, "Overcoming barriers to implement digital technologies to achieve sustainable production and consumption in the food sector: A circular economy perspective," *Sustain Prod Consum.*, vol. 39, pp. 203–215, Jul. 2023. doi: 10.1016/J.SPC.2023.04.002.
- [37] N. Ada et al., "Analyzing Barriers of Circular Food Supply Chains and Proposing Industry 4.0 Solutions," *Sustainability* 2021, Vol. 13, Page 6812, vol. 13, no. 12, p. 6812, Jun. 2021. doi: 10.3390/SU13126812.
- [38] A. M. Järvenpää, V. Salminen, and J. Kantola, "Industrial Symbiosis, Circular Economy and Industry 4.0 - A Case Study in Finland," *Management and Production Engineering Review*, vol. 12, no. 4, pp. 111–121, 2021. doi: 10.24425/MPER.2021.139999.
- [39] L. Klerkx and D. Rose, "Dealing with the game-changing technologies of Agriculture 4.0: How do we manage diversity and responsibility in food system transition pathways?," *Glob Food Sec.*, vol. 24, p. 100347, Mar. 2020. doi: 10.1016/J.GFS.2019.100347.
- [40] Manuscript Templates for Conference Proceedings, IEEE. http://www.ieee.org/conferences_events/conferences/publishing/template.shtml
- [41] M. King, B. Zhu, and S. Tang, "Optimal path planning," *Mobile Robots*, vol. 8, no. 2, pp. 520–531, March 2001.
- [42] H. Simpson, *Dumb Robots*, 3rd ed., Springfield: UOS Press, 2004, pp.6-9.
- [43] M. King and B. Zhu, "Gaming strategies," in *Path Planning to the West*, vol. II, S. Tang and M. King, Eds. Xian: Jiaoda Press, 1998, pp. 158–176.
- [44] B. Simpson, et al, "Title of paper goes here if known," unpublished.
- [45] J.-G. Lu, "Title of paper with only the first word capitalized," *J. Name Stand. Abbrev.*, in press.
- [46] Y. Yorozu, M. Hirano, K. Oka, and Y. Tagawa, "Electron spectroscopy studies on magneto-optical media and plastic substrate interface," *IEEE Translated J. Magn. Japan*, vol. 2, pp. 740–741, August 1987 [*Digest 9th Annual Conf. Magnetics Japan*, p. 301, 1982].
- [47] M. Young, *The Technical Writer's Handbook*, Mill Valley, CA: University Science, 1989.
- [48] W. Guangju, F. Batool, S. Hussain, M. Jabeen, M. Ali, and A. Afzal, "Impact of Industry 4.0 and 5.0 Technologies on Circular Economy and Sustainable Performance Using Hybrid PLS-SEM and ANN Approach," *Hum Behav Emerg Technol*, vol. 2025, no. 1, p. 9920983, Jan. 2025, doi: 10.1155/HBE2/9920983.

- [49] S. P. Plakantara and A. Karakitsiou, "Transforming Agrifood Supply Chains with Digital Technologies: a Systematic Review of Safety and Quality Risk Management," *Operations Research Forum*, vol. 6, no. 3, Sep. 2025, doi: 10.1007/S43069-025-00511-3.
- [50] E. Aivazidou, N. Tsolakis, and E. Mollona, "Circular Economy 5.0 on Its Way: A Digital Sustainability Transition," <https://doi.org/10.5465/amp.2023.0161>, Feb. 2025, doi: 10.5465/AMP.2023.0161.
- [51] A. A. Rumman, L. Al-Abbad, R. Alshawabkeh, Z. Alkhazali, and R. Al-Aqrabawi, "Industry 5.0 circular economy practices: Innovation management and its impact on sustainable development," *Humanities and Social Sciences Letters*, vol. 13, no. 2, pp. 485–505, Apr. 2025, doi: 10.18488/73.V13I2.4176.
- [52] Q. Zhang *et al.*, "Digital Green Innovation towards Industry 5.0 and Society 5.0: A Mini-Review," *Open Access Library Journal*, vol. 12, no. 8, pp. 1–27, Aug. 2025, doi: 10.4236/OALIB.1114058.
- [53] Singh, J., Ordoñez, I., & Davies, P. (2022). *Circular economy strategies for agri-food production: A review*. *Journal of Cleaner Production*, 365, 132689.