

## Impact of Industry 4.0 Adoption on Eco-Innovation and Sustainable Development: The Automotive and Aerospace Manufacturing Sectors<sup>1</sup>

*Impacto de la adopción de la Industria 4.0 en la ecoinnovación y el desarrollo sostenible: sector manufacturero automotriz y aeroespacial*

<https://doi.org/10.32870/myn.vi57.7838>

Gonzalo Maldonado Guzmán

Universidad Autónoma de Aguascalientes (México)

[gonzalo.maldonado@edu.uaa.mx](mailto:gonzalo.maldonado@edu.uaa.mx)

<https://orcid.org/0000-0001-8814-6415>

Received: January 20, 2025

Accepted: August 6, 2025

### ABSTRACT

This study aims to fill a gap in the literature and provide robust empirical evidence on the effects of IoT 4.0 on eco-innovation and the sustainable development of manufacturing companies by conducting a survey of 378 manufacturing companies in the automotive and aerospace industries in Mexico and validating the results using PLS-SEM. The results suggest that the adoption of Industry 4.0 has significant positive effects on both sustainable development and eco-innovation, that eco-innovation has a considerable positive impact on sustainable development, and that eco-innovation also serves as a mediating mechanism between Industry 4.0 and sustainable development.

Keywords: Industry 4.0; eco-innovation; sustainable development; automotive industry; aerospace industry.

Jel Code: M15.

---

<sup>1</sup> Traducción de la versión en inglés usando Grammarly en apoyo a la política de multilingüismo



## **RESUMEN**

Este estudio tiene como objetivo llenar el vacío existente en la literatura y aportar evidencia empírica robusta de los efectos que tiene la 4.0 en la eco-innovación y el desarrollo sustentable de las empresas manufactureras, mediante la aplicación de una encuesta a una muestra de 378 empresas manufactureras de la industria automotriz y aeroespacial de México, validando los resultados mediante el uso del PLS-SEM. Los resultados obtenidos sugieren que la adopción de la Industria 4.0 tiene efectos positivos significativos tanto en el desarrollo sustentable como en la ecoinnovación, y que la ecoinnovación tiene un efecto positivo significativo en el desarrollo sustentable, además de jugar un rol mediador entre la Industria 4.0 y el desarrollo sustentable.

Palabras clave: Industria 4.0; ecoinnovación; desarrollo sustentable; industria automotriz; industria aeroespacial.

Código JEL: M15.

## INTRODUCCIÓN

El crecimiento exponencial de la población mundial, el aumento en el consumo de bienes y servicios, y la mejora en la calidad de vida generada en las últimas décadas han impulsado incrementos exponenciales en la demanda de recursos naturales (Strazzullo et al., 2023). Sin embargo, la escasez de recursos naturales está provocando que la sociedad en general, y las empresas manufactureras en particular, replanteen sus estrategias operativas y rediseñen sus procesos de producción desde una perspectiva de desarrollo sostenible (DS) (Jawaad & Zafar, 2019). Asimismo, esto se enmarca en el compromiso asumido por la mayoría de los países para orientar sus estrategias hacia el consumo y la producción sostenibles, no solo como parte de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas para alcanzar los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (UN General Assembly, 2015), sino también para limitar el aumento de la temperatura del planeta a 1.5 °C (UN, 2021).

Para lograr este objetivo, es necesaria la adopción y aplicación de tecnologías digitales en los sistemas de producción actuales, con el fin de promover la transición hacia una economía más limpia que garantice la reducción de la demanda de recursos naturales, combinada con un uso eficiente de los bienes de consumo, y que converja hacia una economía regenerativa (Strazzullo et al., 2023). El concepto de Industria 4.0 (I4.0) se presenta en la literatura como una solución líder para armonizar el crecimiento económico con las aspiraciones de mejorar el desarrollo sostenible (DS) (Khan et al., 2023). En particular, porque la I4.0 ha demostrado ser un impulsor de la ecoinnovación (EI) en productos y servicios derivada de sus rápidos avances tecnológicos (Frank et al., 2019), así como de la mejora de procesos (De Giovanni & Cariola, 2021), organizaciones (Dalenogare et al., 2018) y modelos de negocio en general (Ibarra et al., 2018) en diferentes sectores industriales.

En este contexto, las tecnologías digitales contemporáneas utilizadas en la Industria 4.0 (I4.0), en conjunto con la ecoinnovación (EI) de productos respetuosos con el medio ambiente, han demostrado ser una estrategia con un potencial notable para la creación de valor industrial sostenible, al mejorar componentes económicos de las empresas manufactureras, como la eficiencia en el uso de los recursos, además de superar las restricciones ambientales y sociales necesarias para el desarrollo sostenible (DS) (Bonilla et al., 2018). Aunque la I4.0 y la EI son conceptos estrechamente relacionados, la relación entre la I4.0 y el DS constituye una tendencia emergente relativamente reciente en la literatura que requiere un análisis más amplio (Luthra & Mangla, 2018; Dubey et al., 2019; Bai et al., 2020). La relación entre la I4.0 y la EI resultante, así como sus implicaciones para el DS, es reconocida en la literatura como un conjunto de conceptos tanto sinérgicos como superpuestos, aunque también se considera un tema abierto al debate (Khan et al., 2023).

Además, existen estudios publicados recientemente que han investigado el impacto de las tecnologías digitales de la Industria 4.0 (I4.0) y de la ecoinnovación (EI) en distintos aspectos de la sostenibilidad, como la relación entre la I4.0 y la economía circular (Rosa et al., 2020), y el desarrollo sostenible (DS) (Dantas et al., 2021), las funciones de producción sostenible (Ching et al., 2022), la gestión del mantenimiento (Silvestri et al., 2020) y aspectos de la sostenibilidad organizacional y social (Ghobakhloo et al., 2021). Sin embargo, dada la importancia, relevancia y actualidad de este tema, estudios recientes sugieren una evaluación cuidadosa del vínculo entre la I4.0 y la EI, así como de su influencia en el impacto sobre el DS (por ejemplo, Bai et al., 2020; Mubarak et al., 2021), principalmente porque aún se desconoce la verdadera fortaleza de la relación entre la I4.0, la EI y el DS (Piccarozzi et al., 2022). Sus resultados siguen siendo demasiado ambiguos y continúan siendo objeto de debate (Khan et al., 2023).

Por lo tanto, el objetivo de este estudio es analizar la adopción de tecnologías digitales de la Industria 4.0 (I4.0) en empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial en México, así como su efecto sobre la ecoinnovación (EI) y el desarrollo sostenible (DS), utilizando una muestra de 378 empresas y la técnica estadística de Modelado de Ecuaciones Estructurales por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-SEM), mediante el uso del software SmartPLS 4.10.9 (Ringle et al., 2024). Asimismo, este estudio contribuye a reducir la brecha existente en la literatura sobre la relación entre la I4.0, la EI y el DS (Bai et al., 2020; Mubarak et al., 2021; Piccarozzi et al., 2022), además de proporcionar evidencia empírica sólida sobre la adopción de tecnologías digitales de la I4.0 en empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial en un país en desarrollo como México (Khan et al., 2023). El resto del artículo está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 presenta la revisión de la literatura y las hipótesis; la Sección 3 describe la metodología de investigación; el análisis e interpretación de los resultados se incluyen en la Sección 4; y, finalmente, la Sección 5 expone las conclusiones, limitaciones y futuras líneas de investigación.

## **REVISIÓN DE LA LITERATURA**

### *Industria 4.0 y Desarrollo Sostenible*

En las últimas dos décadas, el concepto de sostenibilidad ha despertado un interés creciente en la comunidad científica y académica (Sadhukhan et al., 2020), principalmente debido a la implementación de políticas globales de protección ambiental promovidas en diversos países (Fuso Nerini et al., 2019; Zhang et al., 2019), así como al establecimiento de la Agenda de Desarrollo Sostenible por parte de las Naciones Unidas, la cual garantiza el bienestar de las personas y un planeta más sostenible para toda la sociedad (Rosa, 2017; Pollitzer, 2018). El concepto de I4.0 aparece en la literatura como un enfoque y una estrategia que pueden incrementar significativamente la riqueza de las empresas manufactureras (Fakhrul et al.,

---

2022), así como el desarrollo industrial vinculado a los objetivos del DS (Hidayatno et al., 2019; Schroeder et al., 2019), y la creatividad, que constituye un requisito previo para el DS (Silvestre & Tirca, 2019).

Por lo tanto, la I4.0 mejora sustancialmente el DS de las empresas manufactureras mediante la automatización y digitalización de los procesos de producción (Pacchini et al., 2019), así como a través de la personalización masiva y la servitización (Oztemel & Gursev, 2020). Otros beneficios de la I4.0 incluyen el seguimiento y la trazabilidad en tiempo real de las transacciones en las cadenas de suministro (Upadhyay et al., 2021), la reducción y el reciclaje de residuos, y la facilitación de los resultados de la economía circular (Nascimento et al., 2019). Por consiguiente, mediante la adopción de la I4.0, tanto la agilidad de la producción como la eficiencia en los costos de producción (Raj et al., 2020; Upadhyay et al., 2020) mejoran exponencialmente, al igual que el DS de las empresas manufactureras (Mukhuty et al., 2022). A pesar del reconocimiento de estos beneficios, la adopción de la I4.0 ha sido lenta en la industria manufacturera (Fantini et al., 2020; Raj et al., 2020; Nankervis et al., 2021).

Además, la literatura muestra que el uso de sensores inteligentes extiende el ciclo de vida de los productos y reduce el uso de recursos naturales, promoviendo así tanto el reciclaje como el DS (Blömeke et al., 2020). En este sentido, las nuevas tecnologías digitales de la I4.0 basadas en sensores ayudan a las empresas manufactureras a monitorear constantemente el uso de maquinaria y equipos, así como las necesidades energéticas de la organización, incrementando de esta manera el nivel de DS (Strazzullo et al., 2023). Asimismo, las tecnologías digitales avanzadas de la I4.0 mejoran la eficiencia de los procesos de producción y reducen el nivel de residuos industriales (Strazzullo et al., 2023) mediante la eliminación de defectos existentes en los procesos productivos (Moeuf et al., 2018; Bigliardi et al., 2022), lo que incrementa en gran medida el nivel de DS de las empresas manufactureras (Strazzullo et al., 2023).

Según Ghobakhloo (2020), la I4.0 permite a las empresas introducir nuevos modelos de negocio, como la innovación colaborativa (*crowd-sourced innovation*), la manufactura como servicio (*manufacturing as a service*) y la producción como servicio (*production as a service*), los cuales ofrecen importantes oportunidades para mejorar la sostenibilidad social y económica del DS (Ákerman et al., 2018; Birkel et al., 2019). En cuanto a la mejora del aspecto ambiental del DS, la adopción de la I4.0 brinda oportunidades para reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> de las empresas manufactureras (Kamble et al., 2018), las cuales representaron una cuarta parte de las emisiones globales en 2021 (IEA, 2022). Sin embargo, a pesar de los ejemplos anteriores, relativamente pocos estudios publicados en la literatura han analizado y discutido la simbiosis entre la I4.0 y el DS (Ghobakhloo, 2020; Beltrami et al., 2021). Por lo tanto, con base en la información presentada anteriormente, se propone la siguiente hipótesis de investigación.

*H<sub>1</sub>: Cuanto mayor sea el nivel de adopción de la I4.0, mayor será el nivel de desarrollo sostenible.*

### *Industria 4.0 y Eco-innovación*

El impulso hacia la producción sostenible durante la última década surge de la creciente presión que enfrentan las empresas manufactureras globales por parte de grupos ambientalistas, proveedores, administraciones públicas y la sociedad en general, quienes exigen una mayor responsabilidad ambiental (Liu et al., 2021; Srhir et al., 2023). Por lo tanto, las empresas manufactureras deben modificar sus estrategias actuales para adaptarlas al desarrollo de capacidades verdes que permitan reducir su impacto ambiental (Sahoo et al., 2024), una transformación que suele ser desafiante debido a los cambios requeridos en los procesos de producción, las cadenas de suministro y la ecoinnovación de productos (Bag et al., 2021; Kannan et al., 2022), así como a los altos costos de inversión en la transformación tecnológica y a la impredecible demanda de los clientes (Bai & Satir, 2020).

6 Estos obstáculos suelen generar una reticencia inicial, ya que las empresas manufactureras evalúan la falta de un retorno inmediato de la inversión frente a los beneficios a largo plazo que la organización podría obtener (Kannan et al., 2022; Isensee et al., 2023). Sin embargo, la falta de desarrollo de capacidades de ecoinnovación (EI) en productos verdes genera diversos riesgos para las empresas manufactureras, entre ellos el daño ambiental, las desventajas competitivas y la pérdida de oportunidades de negocio lucrativas (Quintana-García et al., 2021; Jafari et al., 2022; Buadit et al., 2023). Por lo tanto, para mitigar estos riesgos, es necesario que las empresas manufactureras incorporen tecnologías digitales de la I4.0 en la creación y desarrollo de actividades de EI de productos y servicios (Nayal et al., 2021; Malacina & Teplov, 2022), lo que podría minimizar la huella de carbono y garantizar la sostenibilidad (Bui et al., 2023).

Estudios publicados recientemente en la literatura sostienen que las empresas manufactureras que han adoptado y aplicado tecnologías digitales de la I4.0 como un recurso estratégico han mejorado significativamente la creación de valor, la visibilidad, la transparencia de la cadena de suministro con sus socios y las actividades de EI (por ejemplo, Qader et al., 2022). En particular, porque la adopción de la I4.0 implica integrar tecnologías avanzadas en los procesos de producción tradicionales para crear un sistema de producción inteligente, mejorando así la eficiencia, la productividad, la toma de decisiones y la EI (Bag et al., 2021; Venanzi et al., 2023). En este sentido, la literatura sugiere que la integración de las tecnologías digitales que conforman la I4.0 es un habilitador fundamental para que las empresas manufactureras mejoren sus actividades de EI (Di Maria et al., 2022; Erboz et al., 2022).

Además, en la literatura se han propuesto dos justificaciones principales para analizar la relación entre la I4.0 y la EI (Sahoo et al., 2024). En primer lugar, debido al creciente compromiso de clientes y consumidores con el cuidado y la protección del medio ambiente, la demanda de productos respetuosos con el entorno está aumentando (Bui et al., 2023; Luo et al., 2023). Esta tendencia está llevando a las empresas manufactureras a invertir cantidades cada vez mayores de recursos económicos en el desarrollo de productos de EI, lo que requiere nuevas tecnologías y procesos de producción (Nayal et al., 2021; Wang et al., 2022). En segundo lugar, la I4.0 está transformando los procesos de producción y de la cadena de suministro, mejorando su eficiencia, reduciendo los residuos industriales y fortaleciendo el desarrollo de la EI en colaboración con los socios de la cadena de suministro (Patrucco et al., 2022). Por lo tanto, considerando la información presentada anteriormente, se propone la siguiente hipótesis de investigación.

*H<sub>2</sub>: Cuanto mayor sea el nivel de adopción de la I4.0, mayor será el nivel de eco-innovación.*

#### *Eco-innovación y Desarrollo Sostenible*

En la literatura, la innovación es considerada un impulsor fundamental del DS, y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas proporcionan un marco integral para abordar las diferentes dimensiones (personas, planeta, prosperidad, alianzas y paz) de los desafíos globales (Dzhunushalieva & Teuber, 2024). El progreso hacia el logro de algunos ODS presenta retrasos, particularmente en los países en desarrollo (Dzhunushalieva & Teuber, 2024), pero aún es posible alcanzarlos (Sachs et al., 2023). Sin embargo, Schot y Steinmueller (2018) argumentaron que la naturaleza compleja tanto de los ODS como del DS requiere soluciones transformadoras que vayan más allá de la simple adopción de actividades de innovación, por lo que las empresas manufactureras necesitan implementar una combinación de actividades innovadoras y tecnologías avanzadas para desarrollar productos ecoinnovadores (Islam, 2025).

En este contexto, la EI es considerada en la literatura como un elemento esencial para promover y alcanzar los ODS y el DS de las empresas manufactureras, debido a que desempeña un papel central en el fomento de la sostenibilidad ambiental y la prosperidad económica de las organizaciones (Islam, 2025). Al centrarse en tecnologías y prácticas ecológicas, la EI ayuda a las empresas manufactureras a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y a combatir el cambio climático, aspectos fundamentales para mejorar significativamente el DS (Wang et al., 2022; Khan & Idrees, 2023). Además, la EI incluye avances en eficiencia energética, reducción de residuos industriales y gestión sostenible de los recursos, los cuales contribuyen conjuntamente a un crecimiento económico más sostenible y a una mejor gestión ambiental, mejorando sustancialmente el nivel de DS (Islam, 2025).

Además, la sinergia entre la EI y el DS, junto con los avances tecnológicos, facilita el progreso de varios ODS, incluidos aquellos relacionados con el agua limpia y el saneamiento, la energía asequible y no contaminante, y las ciudades y comunidades sostenibles (Shahzad et al., 2022; Yikun et al., 2022). Por lo tanto, la adopción e implementación de la EI en las empresas manufactureras no solo mejora el DS, sino que también impulsa el desarrollo social mediante la creación de nuevas oportunidades económicas y la mejora de la calidad de vida de la sociedad (Islam, 2025). Sin embargo, para alcanzar todo el potencial de la EI, las empresas manufactureras suelen necesitar fortalecer otros factores complementarios, como los niveles de desempeño sostenible y las políticas de apoyo, con el fin de obtener beneficios de manera efectiva y a largo plazo (Younas et al., 2023).

En este sentido, Calabrese et al. (2021) destacaron el papel mediador de la EI en el logro del DS por parte de las empresas manufactureras. Profundizando en el ámbito comunitario, Imaz y Eizagirre (2020) analizaron cómo las empresas manufactureras pueden contribuir a la agenda de DS mediante el fortalecimiento de las actividades de EI. Por su parte, Alarcón et al. (2021) y Nogueira et al. (2022) resaltaron el papel fundamental de las actividades de EI para abordar y alcanzar los ODS, particularmente en las empresas rurales. Asimismo, Khan et al. (2022) encontraron que la EI modera la correlación entre el desempeño financiero y la mejora del DS. Zhou et al. (2020) y Wei et al. (2023) exploraron la promoción de la EI en las cadenas de suministro sostenibles, mientras que Wang et al. (2022) destacaron el papel de la gestión del conocimiento de la EI en la mejora del DS de las organizaciones. Por lo tanto, considerando la información presentada anteriormente, se propone la siguiente hipótesis de investigación.

*H<sub>3</sub>: Cuanto mayor sea el nivel de adopción de la eco-innovación, mayor será el nivel de desarrollo sostenible.*

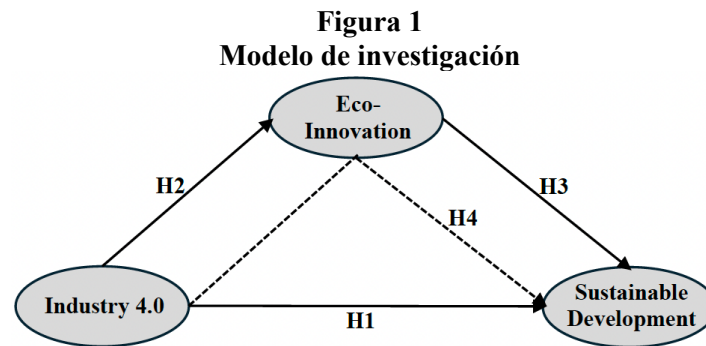
En la última década, la comunidad científica y académica no se ha limitado a analizar el paradigma de la I4.0 y su vínculo con las actividades de EI. Por el contrario, ha ido un paso más allá y actualmente se centra en la creación de un valor industrial más sostenible (Khan et al., 2023). Así, desde un punto de vista económico, las actividades de EI para productos y servicios mejoran la relación entre la I4.0 y el DS al reducir las desigualdades sociales, el cambio climático y los problemas ambientales globales (UN DESA, 2020; UN News, 2021). Por lo tanto, la adopción de la EI en las empresas manufactureras ha contribuido a mejorar los resultados de las nuevas tecnologías de la I4.0 a lo largo de toda la cadena de valor, desde la solidez de los procesos de producción (Sánchez et al., 2020; Tripathi et al., 2022) hasta la transformación hacia una cadena de suministro más escalable y flexible (Hahn, 2020).

Además, Liu y De Giovanni (2019) demostraron mediante modelos matemáticos que la I4.0 mejora significativamente el DS al incorporar la EI en los procesos de producción, mientras

que Dev et al. (2020) mostraron cómo la I4.0 puede simplificar la cadena de suministro en un entorno de difusión de productos que favorecen el DS. Chen et al. (2021) encontraron que la EI derivada de la implementación de tecnologías de la I4.0 incrementó la eficiencia energética y el nivel de DS de las empresas manufactureras. Ghobakhloo y Fathi (2021) determinaron que las actividades de EI pueden contribuir a una mayor adopción e implementación de los avances tecnológicos de la I4.0 en las empresas manufactureras, lo que incrementaría significativamente tanto la sostenibilidad energética como el nivel de DS.

En este contexto, las tendencias actuales de investigación en la literatura muestran una interrelación esencial entre la I4.0, la EI de productos, procesos y gestión, y el DS desde diferentes perspectivas, como, por ejemplo, las implicaciones de la sostenibilidad para la sociedad, la economía y el medio ambiente (Müller, 2021), la cadena de suministro sostenible (Luthra & Mangla, 2018), la economía circular (Rajput & Singh, 2019; Yu et al., 2022) y los modelos de negocio sostenibles (De Man & Strandhagen, 2017). Sin embargo, la literatura proporciona una visión limitada de la interacción e interpretación de la EI, la I4.0 y el DS. Además, carece de un análisis sistemático del papel mediador de la EI en las implicaciones de la relación entre la I4.0 y el DS (Khan et al., 2023). Por lo tanto, considerando la información presentada anteriormente, se propone la siguiente hipótesis de investigación.

*H4: La eco-innovación desempeña un papel mediador entre la I4.0 y el desarrollo sostenible.*



Fuente: Elaboración propia

## METODOLOGÍA

Para dar respuesta a las hipótesis planteadas en el modelo de investigación, se consideraron como marco de referencia los directorios empresariales de la Asociación Mexicana de la Industria Automotriz (AMIA), que contaba con un registro de 950 empresas, y de la Federación Mexicana de la Industria Aeroespacial (FEMIA), que contaba con un registro de 350 empresas al 30 de enero de 2023. Es importante señalar que las empresas manufactureras de la AMIA y la FEMIA pertenecen a diferentes asociaciones y cámaras empresariales

nacionales e internacionales, por lo que este estudio no se centró en un grupo o cámara empresarial en particular. Además, este estudio se enfocó exclusivamente en empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial, dado que estas industrias no han recibido una atención amplia en la literatura en comparación con otros sectores.

Las empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial fueron seleccionadas mediante un muestreo aleatorio simple, con un error máximo de  $\pm 4\%$  y un nivel de confiabilidad del 95 %, lo que dio como resultado una muestra de 320 empresas. La encuesta utilizada para recopilar los datos se distribuyó entre 500 empresas manufactureras de ambas industrias en México, de las cuales 378 respondieron. Esto garantizó que la muestra final representara adecuadamente a ambos sectores. La encuesta, aplicada de febrero a junio de 2023, estuvo dirigida a los directivos de las empresas, quienes, a su vez, identificaron a las personas más adecuadas para responder las distintas secciones del cuestionario. Dado su papel fundamental en la toma de decisiones, los directores generales, bien informados sobre el estudio, identificaron de manera adecuada a las personas con la experiencia necesaria para responder los diversos conjuntos de preguntas del cuestionario (Yu & Tsai, 2018; Kuo & Chang, 2021).

#### *Variables y Análisis de Datos*

10 Para medir los conceptos de I4.0, DS y EI, se realizó una extensa revisión de la literatura, identificando la escala de Gastaldi et al. (2022) como la más adecuada para medir las tecnologías digitales de la I4.0, la cual fue medida mediante cinco ítems. Para medir el DS, se utilizó la escala propuesta por D'Amato et al. (2017), compuesta por 9 ítems. Finalmente, para medir la EI, se empleó la escala propuesta por Segarra et al. (2011) y Doran y Ryan (2012), integrada por cinco ítems. Todos los ítems de las escalas fueron medidos mediante una escala tipo Likert de cinco puntos, donde 1 = totalmente en desacuerdo y 5 = totalmente de acuerdo.

Adicionalmente, dado que los datos fueron recopilados utilizando el mismo instrumento con el mismo informante (gerente de la empresa), esto puede introducir sesgos que alteren las respuestas, lo que potencialmente podría generar errores de tipo I (falso positivo) o tipo II (falso negativo). Para ello, se utilizó la evaluación de la varianza del método común (CMV), siguiendo las recomendaciones de Podsakoff et al. (2003). Tradicionalmente, el método más utilizado por los investigadores para verificar el posible efecto de la CMV es la prueba de un solo factor de Harman (Podsakoff et al., 2003), que consiste en someter prácticamente todos los ítems de las escalas a un análisis factorial exploratorio, lo que obliga a extraer un único factor.

Para verificar la idoneidad de los datos y el posible efecto de la CMV, se realizó un análisis factorial exploratorio (AFE) utilizando el método de componentes principales con rotación

varimax, y se calcularon el coeficiente de Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) y la prueba de esfericidad de Bartlett. Los resultados respaldan el uso del AFE con los datos de esta muestra, obteniéndose un valor KMO de 0.884 y una prueba de Bartlett estadísticamente significativa [ $X^2(171) = 6,459.85, p < 0.000$ ]. Si existiera un problema de CMV, el factor común extraído debería presentar un valor superior al 50 % de la varianza (Podsakoff et al., 2003); sin embargo, el factor común extraído de los datos fue de 41.96 %, valor inferior al recomendado, lo que sugiere que la CMV no representa una amenaza para los datos de la muestra de este estudio y no parece afectar significativamente las relaciones entre las variables del modelo de investigación (Podsakoff et al., 2003).

Finalmente, los datos recopilados mediante la aplicación de la encuesta fueron analizados utilizando el Modelado de Ecuaciones Estructurales por Mínimos Cuadrados Parciales (PLS-SEM) con el software SmartPLS 4.10.9 (Ringle et al., 2024). Fundamentalmente, se utilizó PLS-SEM porque este estudio se basa en un modelo compuesto de indicadores (Sarstedt et al., 2016; Rigdon et al., 2017), los cuales son esenciales en la definición operacional del constructo emergente que media todos sus efectos (Henseler et al., 2015). Además, se empleó PLS-SEM porque los indicadores carecen de términos de error estándar, a diferencia de los estudios con indicadores formativos causales (Hair et al., 2021). Comúnmente, este tipo de indicadores produce los mismos resultados incluso cuando no son unidimensionales y no comparten la misma unidad conceptual (Henseler, 2017), por lo que los indicadores compuestos pueden representar diferentes aspectos del concepto (Hair et al., 2021).

## RESULTADOS

El uso de la técnica estadística PLS-SEM para responder a las hipótesis de investigación planteadas en este estudio se debe principalmente a dos cuestiones esenciales: (1) es la técnica estadística más apropiada para el análisis de teorías que no han sido ampliamente desarrolladas en la literatura (Hair et al., 2019), en las diferentes disciplinas del conocimiento (Sarstedt et al., 2014; do Valle & Assaker, 2015; Richter et al., 2016); y (2) es la técnica estadística más adecuada cuando el objetivo principal del estudio es la predicción y explicación de los conceptos analizados (Rigdon, 2012). En este sentido, la técnica estadística PLS-SEM facilita la explicación del error de medición de los conceptos utilizados en el estudio, así como la regresión múltiple del rango de puntuaciones de la relación entre la I4.0, el DS y la EI de las empresas manufactureras (Hair et al., 2021).

### *Modelo de Medición*

Para evaluar la confiabilidad de las escalas de medición, se emplearon los cuatro indicadores más utilizados en la literatura: alfa de Cronbach, rho de Dijkstra-Henseler (2015), Índice de Fiabilidad Compuesta (IFC) y Varianza Extraída Promedio (AVE). La Tabla 1 (Panel A)

# Impact of Industry 4.0 Adoption on Eco-Innovation and Sustainable Development: The Automotive and Aerospace Manufacturing Sectors

indica que los valores del alfa de Cronbach, el rho de Dijkstra-Henseler e IFC superan el umbral de 0.80 recomendado en la literatura. Asimismo, los valores de AVE superan el valor de 0.50 recomendado, garantizando así la validez de los constructos utilizados (Hair et al., 2021). Adicionalmente, la validez discriminante fue evaluada mediante los dos criterios más ampliamente recomendados en la literatura: el criterio de Fornell-Larcker y la Relación Heterotrait-Monotrait (HTMT).

**Tabla 1**  
**Modelo de Medición. Confiabilidad, Validez y Validez Discriminante**

PANEL A. Confiabilidad y Validez						
Variables	Alfa de Cronbach	rho de Dijkstra-Henseler			CRI	AVE
Industria 4.0	0.928	0.933			0.945	0.776
Desarrollo Sostenible	0.936	0.948			0.949	0.684
Eco-innovación	0.873	0.871			0.910	0.671
PANEL B. Criterio de Fornell-Larcker				Relación Heterotrait–Monotrait (HTMT)		
Variables	1	2	3	1	2	3
1. Industria 4.0	<b>0.881</b>					
2. Desarrollo Sostenible	0.288	<b>0.827</b>		0.308		
3. Eco-innovación	0.348	0.442	<b>0.819</b>	0.377	0.489	

**Nota: PANEL B:** Criterio de Fornell-Larcker: Los elementos diagonales (en negritas) son la raíz cuadrada de la varianza compartida entre los constructos y sus medidas (AVE). Para garantizar la validez discriminante, los elementos diagonales deben ser mayores que los elementos fuera de la diagonal.

Fuente: Elaboración propia.

12

La Tabla 1 (Panel B) presenta los resultados de la evaluación de la validez discriminante, indicando que las raíces cuadradas de los valores de AVE superan las correlaciones con los demás constructos en las respectivas filas y columnas, lo que sugiere la existencia de validez discriminante para las tres escalas de medición. Además, Henseler et al. (2015) establecieron que un valor de HTMT entre 0.1 y 1.0 indica validez discriminante. Los resultados obtenidos de la validez discriminante mediante la relación HTMT sugieren que los valores mínimo y máximo oscilan entre 0.308 y 0.489, respectivamente, lo que confirma la existencia de validez discriminante (Tabla 1, Panel B) e indica que el estudio presenta un excelente ajuste a los datos (Bagozzi & Yi, 1988; Hair et al., 2019).

## *Evaluación del Modelo Externo / Modelo de Medición*

Se realizó un análisis del modelo externo para garantizar que la medición fuera adecuada para su utilización. La evaluación del modelo de medición muestra validez convergente y discriminante. Si la correlación reflexiva supera el valor de 0.70, se considera alta. Sin embargo, para investigaciones en etapas iniciales de creación de escalas, un valor de carga externa entre 0.50 y 0.60 se considera suficiente.

## *Modelo Estructural*

El modelo estructural fue evaluado mediante el coeficiente de determinación ( $R^2$  ajustada), el tamaño del efecto ( $f^2$ ), las pruebas de multicolinealidad (VIF), los estadísticos de la prueba  $t$  y los valores  $p$  (Hair & Sarstedt, 2021). Además, se utilizó el procedimiento de *bootstrapping* con 5,000 submuestras con el apoyo del software SmartPLS 4.10.9 (Ringle et al., 2024), y los resultados indican que los datos obtenidos presentan niveles estadísticos aceptables (Tabla 2), encontrándose valores de  $R^2$  ajustada (0.221 para DS y 0.124 para EI) superiores al valor recomendado de 0.10 (Henseler et al., 2014; Hair & Sarstedt, 2021). En cuanto a los valores de  $f^2$ , Cohen (2013) clasificó el tamaño del efecto en tres grupos: (1) entre 0.02 y 0.14 como pequeño; (2) entre 0.15 y 0.34 como mediano; y (3) superior a 0.35 como grande. Los resultados indican que los tamaños del efecto para las relaciones I4.0-DS (0.030) e I4.0-EI (0.146) son pequeños, mientras que para la relación EI-DS (0.179) el tamaño del efecto es mediano (Tabla 2).

La multicolinealidad fue evaluada mediante el VIF interno, y los resultados muestran que los valores mínimo y máximo fueron 1.246 y 4.979, respectivamente, confirmando la ausencia de multicolinealidad (Pallant, 2020). En cuanto a la significancia estadística, esta fue evaluada mediante la prueba  $t$  y el valor  $p$ , considerándose significativa cuando el estadístico  $t$  es superior a 1.96 y el valor  $p$  es inferior a 0.05 (Hair & Sarstedt, 2021).

Los resultados obtenidos del análisis de datos indican que los valores de los estadísticos  $t$  de todas las relaciones son superiores a 1.96 (I4.0-DS: 2.791; I4.0-EI: 7.614; EI-DS: 7.175; I4.0-EI-DS: 5.412), mientras que los valores  $p$  (I4.0-DS: 0.005; I4.0-EI: 0.000; EI-DS: 0.000; I4.0-EI-DS: 0.000) son inferiores a 0.05, lo que permite aceptar las hipótesis del modelo de investigación. La Tabla 2 muestra estos resultados con mayor detalle.

**Tabla 2**  
**Modelo de Ecuaciones Estructurales**

Relaciones	Coefficiente de trayectoria ( <i>valor t</i> ; <i>valor p</i> )	Intervalo de Confianza al 95 %	$f^2$	Apoyo	
I4.0 → SD (H1)	0.154 (2.791; 0.005)	[0.048 – 0.262]	0.030	Yes	
I4.0 → EI (H2)	0.352 (7.614; 0.000)	[0.251 – 0.430]	0.146	Yes	
EI → SD (H3)	0.392 (7.175; 0.000)	[0.286 – 0.494]	0.179	Yes	
<b>Efectos Indirectos</b>					
I4.0 → EI → SD (H4)	0.238 (5.412; 0.000)	[0.091 – 0.191]		Yes	
Variables Endógenas	$R^2$ Ajustada	Ajuste del Modelo		Valor	HI99
		SRMR	dULS	0.037	0.044
SD	0.221	dG	0.256	0.372	
EI	0.124	NFI	0.138	0.180	
			0.809		

Nota: I4.0: Industria 4.0; DS: Desarrollo Sostenible; EI: Ecoinnovación. Valores  $t$  y valores  $p$  de una cola entre paréntesis; intervalos de confianza al 95 % obtenidos mediante *bootstrapping* (basados en  $n = 5,000$  submuestras). SRMR: raíz cuadrática media residual estandarizada; dULS: discrepancia de mínimos cuadrados no ponderados; dG: discrepancia geodésica; HI99: percentiles del 99 % basados en *bootstrapping*.

Fuente: Elaboración propia.

La Tabla 2 también muestra que la evaluación del ajuste del modelo estructural se llevó a cabo mediante el SRMR, la discrepancia de mínimos cuadrados no ponderados (*dULS*) y la discrepancia geodésica (*dG*), las cuales, si presentan valores inferiores a los obtenidos en HI99, indican que el modelo estructural tiene un buen ajuste a los datos (Dijkstra & Henseler, 2015). Asimismo, se utilizó el Índice de Ajuste Normado (NFI), el cual sugiere que un valor superior a 0.70 es indicativo de un buen ajuste del modelo estructural (Hair & Sarstedt, 2021). Los resultados indican que los valores de SRMR (0.037), *dULS* (0.256) y *dG* (0.138) son inferiores a los valores de HI99 (0.044; 0.372; 0.180, respectivamente), mientras que el valor de NFI (0.809) es superior a 0.70, lo que indica que la adopción de la I4.0 mejoró tanto el DS como la EI de las empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial.

## DISCUSIÓN

14 Los resultados encontrados en este estudio respaldan nuestro argumento sobre la existencia de una relación positiva y significativa entre la I4.0 y el DS; estos resultados coinciden con los hallazgos de Ákerman et al. (2018), Birkel et al. (2019) y Ghobakhloo (2020), así como con el nivel de EI, siendo similares a los encontrados por Nayal et al. (2021), Malacina y Teplov (2022), y Bui et al. (2023). Las principales razones que podrían explicar estos resultados son, por un lado, que los directivos de las empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial tienen claridad sobre las ventajas que genera la I4.0 y, por otro lado, que su adopción no solo permite la producción de ecoproductos, sino también una mejora en el DS de las organizaciones. Esto permite caracterizar a la I4.0 no solo como un salto tecnológico, sino como un activo estratégico que reconceptualiza la dinámica de los procesos productivos al promover relaciones automatizadas e interactivas con los miembros de la cadena de suministro.

Además, los resultados respaldan nuestro argumento de que la EI está estrechamente relacionada con el DS, y coinciden con los reportados por Wang et al. (2022), Khan y Idrees (2023), e Islam (2025). Las principales razones que podrían explicar la relación entre estos dos conceptos son, por un lado, el desarrollo de ecoproductos (vehículos y componentes aeronáuticos) más respetuosos con el medio ambiente, lo que no solo permitiría cumplir con las regulaciones ambientales, sino también ser reconocidos como empresas verdes. Por otro lado, el uso de nuevas tecnologías de la I4.0 facilitaría tanto el desarrollo de nuevos ecoproductos como el logro de los objetivos de DS establecidos por las Naciones Unidas, mediante el reciclaje, la reutilización y el reaprovechamiento de materiales provenientes de vehículos y aeronaves que han concluido su ciclo de vida útil para la remanufactura de nuevos ecoproductos, reduciendo así la generación de gases de efecto invernadero.

Finalmente, los resultados también respaldan nuestro argumento de que la EI desempeña un papel mediador entre la I4.0 y el DS, y coinciden con los resultados reportados por Dev et al. (2020), Chen et al. (2021), y Ghobakhloo y Fathi (2021). Las principales razones que podrían explicar estos resultados son, por un lado, que la implementación de actividades de EI condiciona significativamente la interacción y los resultados de la I4.0 y el DS, lo que pone de manifiesto la naturaleza multifacética del papel que desempeña la EI en las empresas manufactureras. Por otro lado, la complejidad de estas interdependencias exige un análisis más profundo de las actividades mediadoras de EI que gobiernan la relación entre las tecnologías avanzadas de la I4.0 y los resultados del DS, no solo en las organizaciones de las industrias automotriz y aeroespacial, sino también en otros sectores de la economía.

Además, la principal razón de los hallazgos de este estudio podría ser que las empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial están avanzando actualmente hacia una cultura tecnológica innovadora, particularmente porque, al ser la mayoría de estas organizaciones proveedoras de las grandes empresas fabricantes de vehículos y aeronaves, se ven obligadas a transformar su cultura organizacional para permanecer dentro de la cadena de suministro. Esto ha generado la adopción de la I4.0 y de la EI como una estrategia que facilita la mejora del nivel de DS. Por lo tanto, las empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial enfrentan actualmente desafíos únicos que convierten la adopción de la I4.0 y de las actividades de EI en una estrategia necesaria, no solo para mantenerse en la cadena de suministro, sino también para alcanzar los objetivos de DS.

#### *Implicaciones Prácticas*

Los datos estimados en nuestro estudio son relevantes para directivos, responsables de políticas públicas, profesionales empresariales y administraciones públicas. En primer lugar, la relación entre la I4.0, el DS y la EI respalda la transición de las empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial desde una estrategia empresarial tradicional hacia una nueva estrategia tecnológica, lo que representa un desafío para las organizaciones industriales. Sin embargo, el nivel de dificultad varía entre las empresas manufactureras, por lo que los directivos deben implementar un modelo tecnológicamente sofisticado en la búsqueda de resultados organizacionales, con el fin de satisfacer las exigencias planteadas por las grandes empresas que les permitan continuar en la cadena de suministro, así como ser más proactivos e innovadores en la incorporación de actividades de sostenibilidad que mejoren sus estrategias empresariales orientadas al reciclaje y a la generación de una producción sostenible.

En segundo lugar, estos hallazgos respaldan aún más la idea de que las actividades de EI son esenciales para consolidar la posición competitiva de largo plazo de las empresas manufactureras. Por ello, los directivos deben fomentar un espíritu innovador que busque constantemente nuevas aplicaciones de las tecnologías digitales de la I4.0 para ampliar la

integración en todos los niveles de la cadena de suministro. Sin embargo, los gerentes de las empresas deben considerar que, aun cuando las organizaciones enfrenten diversas barreras para la adopción de tecnologías de la I4.0, esto no debería influir en los resultados y beneficios obtenidos, particularmente porque las tecnologías digitales de la I4.0 no solo son facilitadoras, sino también habilitadoras que intensifican la comunicación, la colaboración y la coherencia dentro de la cadena de suministro, permitiendo mejorar los niveles de DS y EI.

En última instancia, la integración de las tecnologías de la I4.0 en el DS y la EI genera una mayor transparencia, adaptabilidad y resiliencia, requisitos esenciales para fomentar la confianza y la creación de valor a lo largo de toda la cadena de suministro (Parviziomran & Elliot, 2023; Prativiera et al., 2023). Sin embargo, los directivos de las empresas deben enfatizar a su personal que las tecnologías de la I4.0 son un medio para alcanzar un fin, y no un fin en sí mismas. En este contexto, la adopción de tecnologías digitales de la I4.0 debe ser un tema relevante para los responsables de políticas públicas, los profesionales empresariales y la administración pública, en el desarrollo de políticas y programas de apoyo que incentiven a un mayor número de empresas manufactureras de todos los sectores industriales a adoptar nuevas tecnologías de la I4.0, así como a proporcionar la infraestructura y las políticas necesarias para acelerar la preparación de los trabajadores para la adopción y aplicación de la I4.0, el DS y la EI.

#### *Implicaciones Teóricas*

Este estudio ofrece importantes implicaciones teóricas al proporcionar evidencia sólida de que las empresas pueden fortalecer las capacidades que les otorgan una ventaja competitiva y aprovechar los beneficios derivados de la adopción de tecnologías digitales de la I4.0. Por lo tanto, esta investigación contribuye al avance de la teoría de recursos y capacidades al demostrar cómo la alineación estratégica de los recursos y capacidades de las empresas manufactureras con los objetivos organizacionales puede servir como base para alcanzar una ventaja competitiva en un entorno empresarial tecnológicamente complejo. En consecuencia, los beneficios de la adopción de la I4.0 y de las actividades de EI en las empresas manufactureras superan los costos asociados.

Asimismo, este estudio aporta evidencia teórica sustancial que contribuye a cerrar la brecha existente en la literatura al destacar el papel indispensable de la adopción de tecnologías digitales de la I4.0 en las empresas manufactureras para el logro de sus objetivos organizacionales, en un contexto marcado por el acelerado ritmo de los avances tecnológicos y la constante búsqueda de la protección ambiental y la sostenibilidad. Estos hallazgos refuerzan la idea de que la adopción de la I4.0 y de las actividades de EI es esencial para consolidar la posición competitiva de largo plazo de las empresas manufactureras. En este sentido, los resultados de este estudio validan empíricamente la teoría que promueve la búsqueda continua de nuevas aplicaciones de las tecnologías digitales de la I4.0 y la adopción

de innovaciones compatibles tanto con el desempeño económico de las empresas como con la mejora de la sostenibilidad.

Finalmente, los hallazgos teóricos de este estudio también destacan el papel fundamental de la integración interna en el fortalecimiento de las relaciones colaborativas con proveedores y clientes de las empresas manufactureras. Por lo tanto, al ir más allá de la visión tradicional, este estudio revela que la adopción de tecnologías digitales de la I4.0 y la EI impacta significativamente la integración tecnológica al alinear los objetivos económicos organizacionales con las metas de protección ambiental. Esto puede conducir a las empresas manufactureras de todo el mundo hacia una mayor transparencia, adaptabilidad y resiliencia, requisitos fundamentales para fomentar la creación de valor a lo largo de toda la cadena de suministro (Parviziomran & Elliot, 2023; Prativiera et al., 2023).

## CONCLUSIONES

La información obtenida en este estudio permite extraer diversas conclusiones, entre las cuales destacan las siguientes. En primer lugar, este estudio revela que la I4.0 ejerce un efecto transformador implícito sobre el DS de las empresas manufactureras, el cual está mediado por las actividades de EI, constituyéndose así en un eje fundamental de las actividades de innovación de las organizaciones. Esto permite a las empresas fortalecer su capacidad de innovación en el ámbito de la sostenibilidad, lo que lleva a concluir que la comunidad científica, académica y empresarial necesita orientar futuros estudios que aporten evidencia empírica sólida sobre la relación entre estos tres conceptos, particularmente en las empresas manufactureras de países en desarrollo, donde la adopción de nuevas tecnologías de la I4.0, así como el logro de los objetivos de DS, avanza de manera muy lenta.

En segundo lugar, los hallazgos de este estudio destacan la importancia de la adopción de la I4.0 no solo para fomentar una producción sostenible orientada a la innovación, sino también para desarrollar nuevos productos y procesos ecoinnovadores. Este conocimiento está llamado a servir como un valioso antecedente para las empresas manufactureras interesadas en ampliar sus resultados en sostenibilidad y el alcance de sus actividades de innovación. Por lo tanto, es posible concluir que la transición de un entorno industrial convencional hacia un entorno de industria inteligente permitirá a las empresas manufactureras de las industrias automotriz y aeroespacial desarrollar prácticas de producción sostenible, ya que esto ayudará a las organizaciones a mejorar con mayor rapidez su capacidad productiva y a desarrollar ecoproductos, incrementando tanto sus recursos financieros como el cuidado del medio ambiente y la sostenibilidad.

## REFERENCIAS

- Åkerman, M., Fast-Berglund, A., Halvordsson, E., & Stahre, J. (2018). Modularized assembly system: A digital innovation hub for the Swedish smart industry. *Manufacturing Letters*, 15(1), 143–146. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.01.004>
- Alarcon, C., Johnsson, M., Gebreyohannis Gebrehiwot, S., ... Bishop, K., & Hilding-Rydevik, T. (2021). Citizen science as democratic innovation that renews environmental monitoring and assessment for the sustainable development goals in rural areas. *Sustainability*, 13(5), 1-15. <https://doi.org/10.3390/su13052762>
- Bag, S., Yadav, G., Dhamija, P., & Kataria, K.K. (2021). Key resources for industry 4.0 adoption and its effect on sustainable production and circular economy: An empirical study. *Journal of Cleaner Production*, 281(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125233>
- Bagozzi, R., & Yi, Y. (1988). On the evaluation of structural equation models. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 16(1), 74-94. <https://doi.org/10.1007/BF02723327>
- Bai, C., & Satir, A. (2020). Barriers for green supplier development programs in manufacturing industry. *Resources, Conservation and Recycling*, 158(1), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.104756>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Beltrami, M., Orzes, G., Sarkis, J., & Sartor, M. (2021). Industry 4.0 and sustainability: Towards conceptualization and theory. *Journal of Cleaner Production*, 312(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127733>
- Bigliardi, B., Filippelli, S., & Tagliente, L. (2022). Industry 4.0 and open innovation: Evidence from a case study. *Procedia Computer Science*, 200(12), 1796–1805. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.380>
- Birkel, H., Veile, J., Müller, J., Hartmann, E., & Voigt, K. (2019). Development of a risk framework for industry 4.0 in the context of sustainability for established manufacturers. *Sustainability*, 11(2), 384-400. <https://doi.org/10.3390/su11020384>
- Blömeke, S., Rickert, J., Mennenga, M., Thiede, S., Spengler, T.S., & Herrmann, C. (2020). Recycling 4.0: Mapping smart manufacturing solutions to remanufacturing and recycling operations. *Procedia CIRP*, 90(6), 600–605. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.02.045>
- Bonilla, S.H., Silva, H.R., Terra da Silva, M., Franco Gonçalves, R., & Sacomano, J.B. (2018). Industry 4.0 and sustainability implications: A scenario-based analysis of the impacts and challenges. *Sustainability*, 10(10), 1-18. <https://doi.org/10.3390/su10103740>
- Buadit, T., Ussawarujikulchai, A., Suchiva, K., Papong, S., Ma, H., & Rattanapan, C. (2023).

- 
- Environmental impact of passenger car tire supply chain in Thailand using the life cycle assessment method. *Sustainable Production and Consumption*, 37(1), 156–168. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.02.013>
- Bui, T., Tseng, J., Tran, T.P.T., Ha, H.M., Lim, M.K., & Tseng, M. (2023). Circular supply chain strategy in Industry 4.0: The canned food industry in Vietnam. *Business Strategy and the Environment*, 32(8), 6047–6073. <https://doi.org/10.1002/bse.3472>
- Calabrese, A., Costa, R., Ghiron, N., Tiburzi, L., & Pedersen, E. (2021). How sustainable-orientated service innovation strategies are contributing to the sustainable development goals. *Technological Forecasting and Social Change*, 169(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.120816>
- Chen, M., Sinha, A., Hu, K., & Shah, M.I. (2021). Impact of technological innovation on energy efficiency in Industry 4.0 era: Moderation of shadow economy in sustainable development. *Technological Forecasting and Social Change*, 164(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2020.120521>
- Ching, N., Ghobakhloo, M., Iranmanesh, M., Maroufkhani, P., & Asadi, S. (2022). Industry 4.0 applications for sustainable manufacturing: A systematic literature review and a roadmap to sustainable development. *Journal of Cleaner Production*, 334(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.130133>
- Cohen, J. (2013). *Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences*. New York: Routledge.
- D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lahtinen, K., Korhonen, J., & Toppinen, A. (2017). Green, circular, bioeconomy: A comparative analysis of sustainability avenues. *Journal of Cleaner Production*, 168(6), 716–734. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
- Dalenogare, L., Benitez, G., Ayala, N., & Frank, A. (2018). The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. *International Journal of Production Economics*, 204(1), 383–394. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.08.019>
- Dantas, T., De-Souza, E., Destro, I., Hammes, G., Rodriguez, C., & Soares, S.. (2021). How the combination of circular economy and industry 4.0 can contribute towards achieving the sustainable development goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26(1), 213–227. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>
- De Giovanni, P., & Cariola, A. (2021). Process innovation through industry 4.0 technologies, lean practices and green supply chains. *Research in Transportation Economics*, 90(12), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2020.100869>
- De Man, J., & Strandhagen, J. (2017). An Industry 4.0 research agenda for sustainable business models. *Procedia Cirp*, 63(1), 721–726. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.315>
- Dev, N., Shankar, R., & Swami, S. (2020). Diffusion of green products in Industry 4.0: Reverse logistics issues during design of inventory and production planning system. *International Journal of Production Economics*, 223(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107519>
- Di Maria, E., De Marchi, V., & Galeazzo, A. (2022). Industry 4.0 technologies and circular economy: The mediating role of supply chain integration. *Business Strategy and the Environment*, 3(2), Year 27, N. 58, May-August 2026:1-28

619–632. <https://doi.org/10.1002/bse.2940>

- Dijkstra, T., & Henseler, J. (2015). Consistent partial least squares path modeling. *MIS Quarterly*, 39(2), 297-2316. <https://www.jstor.org/stable/26628355>
- do Valle, P., & Assaker, G. (2015). Using partial least squares structural equation modeling in tourism research: A review of past research and recommendations for future applications. *Journal of Travel Research*, 55(6), 695-708. <https://doi.org/10.1177/0047287515569779>
- Doran, J., & Ryan, G. (2012). Regulation and firm perception, eco-innovation and firm performance. *European Journal of Innovation Management*, 15(1), 421–441. <https://doi.org/10.1108/14601061211272367>
- Dubey, R., Gunasekaran, A., Childe, S.J., Papadopoulos, T., Luo, Z., Wamba, S.F., & Roubaud, D. (2019). Can big data and predictive analytics improve social and environmental sustainability? *Technological Forecasting and Social Change*, 144(1), 534–545. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.06.020>
- Dzhunushalieva, G., & Teuber, R. (2024). Roles of innovation in achieving sustainable development goals: A bibliometric analysis. *Journal of Innovation and Knowledge*, 9(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2024.100472>
- Erboz, G., Yumurtacı Hüseyinoglu, I., & Szegedi, Z. (2022). The partial mediating role of supply chain integration between Industry 4.0 and supply chain performance. *Supply Chain Management: An International Journal*, 27(4), 538–559. <https://doi.org/10.1108/SCM-09-2020-0485>
- Fakhrul, I. Awal, R., & Zaman, R. (2022). The current journey of sustainable development goals (SDGs) and fourth industrial revolution (4IR): Paradoxical or parallel? *SDMIMD Journal of Management*, 13(1), 1-14. <https://doi.org/10.18311/sdmimd/2022/29193>
- Fantini, P., Pinzone, M., & Taisch, M. (2020). Placing the operator at the center of Industry 4.0 design: Modelling and assessing human activities within cyber-physical systems. *Computers & Industrial Engineering*, 139(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.01.025>
- Frank, A.G., Dalenogare, L.S., & Ayala, N.F. (2019). Industry 4.0 technologies: Implementation patterns in manufacturing companies. *International Journal of Production Economics*, 210(1), 15–26. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.01.004>
- Fuso Nerini, F., Sovacool, B., Hughes, N., Cozzi, L., Cosgrave, E., Howells, M., Tavoni, M., Tomei, J., Zerriffi, H., & Milligan, B. (2019). Connecting climate action with other sustainable development goals. *Nature Sustainability*, 2(8), 674–80. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0334-y>
- Gastaldi, L., Lessanibahri, S., Tedaldi, G., & Miragliotta, G. (2022). Companies' adoption of smart technologies to achieve structural ambidexterity: An analysis with SEM. *Technological Forecasting and Social Change*, 174(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2021.121187>
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of*

- 
- Cleaner Production*, 252(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119869>
- Ghobakhloo, M., & Fathi, M. (2021). Industry 4.0 and opportunities for energy sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 295(1), 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126427>
- Hahn, G. (2020). Industry 4.0: A supply chain innovation perspective. *International Journal of Production Research*, 58(5), 1425–1441. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1641642>
- Hair, J., Hult, T., Ringle, C., Sarstedt, M., Castillo, J., Cepeda, G., & Roldan, J. (2019). *Manual de Partial Least Squares PLS-SEM*. Madrid: OmniaScience. <https://doi.org/10.3926/OSS.37>
- Hair, J., & Sarstedt, M. (2021). Data, measurement, and causal inferences in machine learning: Opportunities and challenges for marketing. *Journal of Marketing Theory & Practice*, 29(1), 65–77. <https://doi.org/10.1080/10696679.2020.1860683>
- Hair, J., Sarstedt, M., Ringle, C., Gudergan, S., Castillo, J., Cepeda, G., & Roldan, J. (2021). *Manual Avanzado de Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*. Madrid: OmniaScience.
- Henseler, J. (2017). Bridging design and behavioral research with variance-based structural equation modelling. *Journal of Advertising*, 46(1), 178–192. <https://doi.org/10.1080/00913367.2017.1281780>
- Henseler, J., Dijkstra, T., Sarstedt, M., Ringle, C., Diamantopoulos, A., & Straub, D. (2014). Common beliefs and reality about partial least squares: Comments on Rönkkö Y Everman (2013). *Organizational Research Methods*, 17(1), 182-209. <https://doi.org/10.1177/1094428114526928>
- Henseler, J., Ringle, C., & Sarstedt, M. (2015). A new criterion for assessing discriminant validity in variance-based structural equation modeling. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 43(1), 115-135. <https://doi.org/10.1007/s11747-014-0403-8>
- Hidayatno, A., Destyanto, A., & Hulu, C. (2019). Industry 4.0 technology implementation impact to industrial sustainable energy in Indonesia: A model conceptualization. *Energy Procedia*, 156(1), 227–233. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.11.133>
- Ibarra, D., Ganzarain, J., & Igartua, J. (2018). Business model innovation through Industry 4.0: A review. *Procedia Manufacturing*, 22(1), 4–10. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.002>
- IEA. (2022). *Industry*. IEA, Paris. License: CC BY 4.0. <https://www.iea.org/reports/industry>.
- Imaz, O., & Eizagirre, A. (2020). Responsible innovation for sustainable development goals in business: An agenda for cooperative firms. *Sustainability*, 12(17), 1-23. <https://doi.org/10.3390/su12176948>
- Isensee, C., Teuteberg, F., & Griese, K. (2023). How can corporate culture contribute to emission reduction in the construction sector? An SME case study on beliefs, actions, and outcomes. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 30(2), 1005–1022. <https://doi.org/10.1002/csr.2368>
- Islam, H. (2025). Nexus of economic, social, and environmental factors on sustainable development Year 27, N. 58, May-August 2026:1-28

goals: The moderating role of technological advancement and green innovation. *Innovation and Green Development*, 4(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.igd.2024.100183>

Jafari, S., Shokouhyar, S., & Shokoohyar, S. (2022). Producer-consumer sustainability continuum: Mutual understanding to implement extended producer responsibility. *Journal of Cleaner Production*, 374(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133880>

Jawaad, M., & Zafar, S. (2019). Improving sustainable development and firm performance in emerging economies by implementing green supply chain activities. *Sustainable Development*, 28(1), 25–38. <https://doi.org/10.1002/sd.1962>

Kamble, S., Gunasekaran, A., & Gawankar, S. (2018). Sustainable industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 117(4), 408–425. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>

Kannan, D., Shankar, K., & Gholipour, P. (2022). Paving the way for a green transition through mitigation of green manufacturing challenges: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 368(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.132578>

Khan, A., & Idrees, A. (2023). Environmental impact of multidimensional eco-innovation adoption: Empirical evidence from European Union. *Journal of Environmental Economics and Policy*, 13(1), 17–33. <https://doi.org/10.1080/21606544.2023.2197626>

22 Khan, P., Johl, S., & Akhtar, S. (2022). Vinculum of sustainable development goal practices and rms' financial performance: A moderation role of green innovation. *Journal of Risk and Financial Management*, 15(3), 1-13. <https://doi.org/10.3390/jrfm15030096>

Khan, S., Ahmad, O., & Majava, J. (2023). Industry 4.0 innovations and their implication: An evaluation from sustainable development perspective. *Journal of Cleaner Production*, 405(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137006>

Kuo, L., & Chang, B. (2021). The affecting factors of circular economy information and its impact on corporate economic sustainability-Evidence from China. *Sustainable Production and Consumption*, 27(1), 986-997. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.014>

Liu, B., & De Giovanni, P. (2019). Green process innovation through Industry 4.0 technologies and supply chain coordination. *Annals of Operations Research*, 208(1), 1-16. <https://doi.org/10.1007/s10479-019-03498-3>

Liu, L., Zhang, Z., & Wang, Z. (2021). Two-sided matching and game on investing in carbon emission reduction technology under a cap-and-trade system. *Journal of Cleaner Production*, 282(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124436>

Luo, Y., Yu, M., Wu, X., Ding, X., & Wang, L. (2023). Carbon footprint assessment of face masks in the context of the COVID-19 pandemic: Based on different protective performance and applicable scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 387(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.135854>

Luthra, S., & Mangla, S. (2018). Evaluating challenges to Industry 4.0 initiatives for supply chain

- sustainability in emerging economies. *Process Safety and Environmental Protection*, 117(7), 168–179. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.04.018>
- Malacina, I., & Teplov, R. (2022). Supply chain innovation research: A bibliometric network analysis and literature review. *International Journal of Production Economics*, 251(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2022.108540>
- Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo, S., & Barbaray, R. (2018). The industrial management of SMEs in the era of industry 4.0. *International Journal of Production Research*, 56(3), 1118–1136. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1372647>
- Mubarak, M., Tiwari, S., Petraite, M., Mubarik, M., & Rasi, R. (2021). How Industry 4.0 technologies and open innovation can improve green innovation performance? *Management of Environmental Quality*, 32(5), 1007–1022. <https://doi.org/10.1108/MEQ-11-2020-0266>
- Mukhty, S., Upadhyay, A., & Rothwell, H. (2022). Strategic sustainable development of Industry 4.0 through the lens of social responsibility: The role of human resource practices. *Business Strategy and the Environment*, 31(12), 2851-2862. <https://doi.org/10.1002/bse.3008>
- Müller, J. (2021). Industry 4.0 in the context of the triple bottom line of sustainability: A systematic literature review. In Silvestri, C., Piccarozzi, M., and Aquilani, B. (Eds.), *Customer Satisfaction and Sustainability Initiatives in the Fourth Industrial Revolution*. New York, NY: IGI Global Scientific Publishing. Pp. 1-20.
- Nankervis, A., Connell, J., Cameron, R., Montague, A., & Prikshat, V. (2021). “Are we there yet?” Australian professionals and the Fourth Industrial Revolution. *Asia Pacific Journal of Human Resources*, 59(1), 3–19. <https://doi.org/10.1111/1744-7941.12245>
- Nascimento, D., Alencastro, V., Quelhas, O., Caiado, R., Garza-Reyes, J., Rocha-Lona, L., & Tortorella, G. (2019). Exploring Industry 4.0 technologies to enable circular economy practices in a manufacturing context: A business model proposal. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 30(3), 607–627. <https://doi.org/10.1108/JMTM-03-2018-0071>
- Nayal, K., Raut, R., Narkhede, E., Priyadarshinee, P., Panchal, G., & Gedam, V. (2021). Antecedents for blockchain technology-enabled sustainable agriculture supply chain. *Annals of Operations Research*, 327(1), 293–337. <https://doi.org/10.1007/s10479-021-04423-3>
- Nogueira, C., Marques, J., & Pinto, H. (2022). Intentional sustainable communities and sustainable development goals: From micro-scale implementation to scalability of innovative practices. *Journal of Environmental Planning and Management*, 67(1), 175–196. <https://doi.org/10.1080/09640568.2022.2106553>
- Oztemel, E., & Gursev, S. (2020). Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 3(1), 127–182. <https://doi.org/10.1007/s10845-018-1433-8>
- Pacchini, A., Lucato, W., Facchini, F., & Mummolo, G. (2019). The degree of readiness for the implementation of Industry 4.0. *Computers in Industry*, 113(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2019.103125>
- Pallant, J. (2020). *SPSS Survival Manual*. London: Routledge.

## Impact of Industry 4.0 Adoption on Eco-Innovation and Sustainable Development: The Automotive and Aerospace Manufacturing Sectors

- Parvizioman, E., & Elliot, V. (2023). The effects of bargaining power on trade credit in a supply network. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 29(1), 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.pursup.2023.100818>
- Patrucco, A., Moretto, A., Trabucchi, D., & Golini, R. (2022). How do Industry 4.0 technologies boost collaborations in buyer-supplier relationships? *Research-Technology Management*, 65(1), 48–58. <https://doi.org/10.1080/08956308.2021.1999131>
- Piccarozzi, M., Silvestri, C., Aquilani, B., & Silvestri, L. (2022). Is this a new story of the ‘Two Giants’? A systematic literature review of the relationship between Industry 4.0, sustainability, and its pillars. *Technological Forecasting and Social Change*, 177(1), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121511>
- Podsakoff, P., MacKenzie, S., & Podsakoff, N. (2003). Sources of method bias in social science research and recommendations on how to control it. *Annual Review of Psychology*, 63(1), 539-569. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100452>
- Pollitzer, E. (2018). Creating a better future. *Journal of International Affairs*, 72(1), 75–90. <https://www.jstor.org/stable/26588344>
- Prataviera, L.B., Creazza, A., Dallari, F., & Melacini, M. (2023). How can logistics service providers foster supply chain collaboration in logistics triads? Insights from the Italian grocery industry. *Supply Chain Management: An International Journal*, 28(2), 242–261. <https://doi.org/10.1108/SCM-03-2021-0120>
- Qader, G., Junaid, M., Abbas, Q., & Mubarik, M.. (2022). Industry 4.0 enables supply chain resilience and supply chain performance. *Technological Forecasting and Social Change*, 185(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.122026>
- Quintana, C., Benavides, C., & Marchante, M. (2021). Does a green supply chain improve corporate reputation? Empirical evidence from European manufacturing sectors. *Industrial Marketing Management*, 92(2), 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2019.12.011>
- Raj, A., Dwivedi, G., Sharma, A., de Sousa, L., Jabbour, A. B., & Rajak, S. (2020). Barriers to the adoption of Industry 4.0 technologies in the manufacturing sector: An inter-country comparative perspective. *International Journal of Production Economics*, 224(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2019.107546>
- Rajput, S., & Singh, S. (2019). Connecting circular economy and industry 4.0. *International Journal of Information Management*, 49(1), 98–113. <https://doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2019.03.002>
- Richter, N., Cepeda, G., Roldan, J., & Ringle, C. (2016). European management research using partial least squares structural equation modeling (PLS-SEM). *European Management Journal*, 34(6), 589-597. <http://dx.doi.org/10.1016/j.emj.2014.12.001>
- Rigdon, E. (2012). Rethinking partial least squares path modeling: In praise of simple methods: In praise of simple methods. *Long Range Planning*, 45(1), 341-358. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2012.09.010>
- Rigdon, E., Sarstedt, M., & Ringle, C. (2017). On comparing results from CB-SEM and PLS- SEM:

- 
- Five perspectives and five recommendations. *Marketing Zfp*, 39(3), 4-16. <https://www.jstor.org/stable/26426850>
- Ringle, C.M., Wende, S., & Becker, J.M. (2024). *SmartPLS 4 (computer software)*. Retrieved from <http://www.smartpls.com>.
- Rosa, P., Sassanelli, C., Urbinati, A., Chiaroni, D., & Terzi, S. (2020). Assessing relations between Circular Economy and Industry 4.0: A systematic literature review. *International Journal of Production Research*, 58(6), 1662–1687. <https://doi.org/10.1080/00207543.2019.1680896>
- Rosa, W. (2017). *A new era in global health. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development*. Springer. <https://doi.org/10.1891/9780826190123.ap02>
- Sachs, J., Lafortune, G., Fuller, G., & Drumm, E. (2023). *Implementing the SDG stimulus. Sustainable development report 2023*. Paris: SDSN, Dublin: Dublin University Press. <https://doi.org/10.25546/102924>
- Sadhukhan, J., Dugmore, T., Matharu, A., Martínez, E., Aburto, J., Rahman, P., & Lynch, J. (2020). Perspectives on “Game Changer” global challenges for sustainable 21st century: Plant-based diet, unavoidable food waste biorefining, and circular economy. *Sustainability*, 12(5), 1-19. <https://doi.org/10.3390/su12051976>
- Sahoo, S., Kumar, A., Kumar Mangla, S., & Tiwari, A. (2024). Industry 4.0 adoption and eco-product innovation capability: Understanding the role of supply chain integration. *Business Strategy and the Environment*, 33(8), 8798-8814. <https://doi.org/10.1002/bse.3949>
- Sanchez, M., Exposito, E., & Aguilar, J. (2020). Industry 4.0: Survey from a system integration perspective. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 33(10/11), 1-15. <https://doi.org/10.1080/0951192X.2020.1775295>
- Sarstedt, M., Hair, J., Ringle, C., Thiele, K., & Gudergan, S. (2016). Estimation issues with PLS and CBSEM: Where the bias lies. *Journal of Business Research*, 69(10), 3998–4010. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2016.06.007>
- Sarstedt, M., Ringle, C., Henseler, J., & Hair, J. (2014). On the emancipation of PLS-SEM: A commentary on Rigdon (2012). *Long Range Planning*, 47(1), 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.lrp.2014.02.007>
- Schot, J., & Steinmueller, W. (2018). Three frames for innovation policy: R&D, systems of innovation and transformative change. *Research Policy*, 47(9), 1554–1567. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2018.08.011>
- Schroeder, P., Anggraeni, K., & Weber, U. (2019). The relevance of circular economy practices to the Sustainable Development Goals. *Journal of Industrial Ecology*, 23(1), 77–95. <https://doi.org/10.1111/jiec.12732>
- Segarra, M., Peiró, A., Albors, J., & Miret, P. (2011). Impact of innovative practices in environmentally focused firms: moderating factors. *International Journal of Environmental Research*, 5(2), 425-434.
- Shahzad, M., Qu, Y., Rehman, S., & Zafar, A. (2022). Adoption of green innovation technology to Year 27, N. 58, May-August 2026:1-28

## Impact of Industry 4.0 Adoption on Eco-Innovation and Sustainable Development: The Automotive and Aerospace Manufacturing Sectors

accelerate sustainable development among manufacturing industry. *Journal of Innovation & Knowledge*, 7(4), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jik.2022.100231>

Silvestre, B., & Tirca, D. (2019). Innovations for sustainable development: Moving toward a sustainable future. *Journal of Cleaner Production*, 208(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.244>

Silvestri, L., Forcina, A., Introna, V., Santolamazza, A., & Cesarotti, V. (2020). Maintenance transformation through Industry 4.0 technologies: A systematic literature review. *Computers in Industry*, 123(12), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103335>

Srhir, S., Jaegler, A., & Montoya, J. (2023). Uncovering Industry 4.0 technology attributes in sustainable supply chain 4.0: A systematic literature review. *Business Strategy and the Environment*, 32(7), 4143–4166. <https://doi.org/10.1002/bse.3358>

Strazzullo, S., Moro, S., & Cricelli, L. (2023). Unveiling the relationship between sustainable development and Industry 4.0: A text mining literature review. *Sustainable Development*, 31(1), 2851-2862. <https://doi.org/10.1002/sd.2552>

Tripathi, V., Chattopadhyaya, S., Mukhopadhyay, A.K., Sharma, S., Li, C., & Singh, S. (2022). A sustainable productive method for enhancing operational excellence in shop floor management for industry 4.0 using hybrid integration of lean and smart manufacturing: An ingenious case study. *Sustainability*, 14(12), 1-17. <https://doi.org/10.3390/su14127452>

26 UN General Assembly. (2015). Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable Development, A/RES/70/1. <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html>.

UN DESA. (2020). World Social Report 2020. United Nations

UN. (2021). *The Paris Agreement*. United Nations. Link: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>.

UN News. (2021). *Tipping Point' for Climate Action: Time's Running Out to Avoid Catastrophic Heating*. United Nations Retrieved from. <https://news.un.org/en/story/2021/09/1099992>.

Upadhyay, A., Mukhuty, S., Kumar, V., & Kazancoglu, Y. (2021). Blockchain technology and the circular economy: Implications for sustainability and social responsibility. *Journal of Cleaner Production*, 293(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126130>

Upadhyay, A., Mukhuty, S., Kumari, S., Garza, J., & Shukla, V. (2020). A review of lean and agile management in humanitarian supply chains: Analyzing the pre-disaster and post-disaster phases and future directions. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 33(6/7), 641-654. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1834133>

Venanzi, R., Dahdal, S., Solimando, M., Campioni, L., Cavalucci, A., ... & Stefanelli, C. (2023). Enabling adaptive analytics at the edge with the Bi-Rex Big Data platform. *Computers in Industry*, 147(1), 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2023.103876>

Wang, X., Khurshid, A., Qayyum, S., & Calin, A.C. (2022). The role of green innovations, environmental policies and carbon taxes in achieving the sustainable development goals of

- 
- carbon neutrality. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(6), 8393–8407. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16208-z>
- Wei, C., Cai, X., & Song, X. (2023). Towards achieving the sustainable development goal: Analyzing the role of green innovation culture on market performance of Chinese SMEs. *Frontiers in Psychology*, 13(1), 1-14.
- Yikun, Z., Woon, L., Cong, P., Abu-Rumman, A., Al Shraah, A., & Hishan, S. (2022). Green growth, governance, and green technology innovation. How effective towards SDGs in G7 countries? *Economic Research*, 36(2), 1-15. <https://doi.org/10.1080/1331677X.2022.2145984>
- Younas, S., Shoukat, S., Awan, A., & Arslan, S. (2023). Comparing effects of green innovation and renewable energy on green economy: The metrics of green economy as nucleus of SDGs. *Pakistan Journal of Humanities and Social Sciences*, 11(2), 1-18. <https://doi.org/10.52131/pjhss.2023.1102.0415>
- Yu, H., & Tsai, B. (2018). Environmental policy and sustainable development: an empirical study on carbon reduction among Chinese enterprises. *Corporate and Social Responsibility and Environmental Management*, 25(5), 1019–1026. <https://doi.org/10.1002/csr.1499>
- Yu, Z., Khan, S., & Umar, M. (2022). Circular economy practices and industry 4.0 technologies: A strategic move of automobile industry. *Business Strategy and the Environment*, 31(3), 796–809. <https://doi.org/10.1002/bse.2918>
- Zhang, A., Venkatesh, V., Liu, Y., Wan, M., Qu, T., & Huisingh, D. (2019). Barriers to smart waste management for a circular economy in China. *Journal of Cleaner Production*, 240(1), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118198>
- Zhou, M., Govindan, K., & Xie, X. (2020). How fairness perceptions, embeddedness, and knowledge sharing drive green innovation in sustainable supply chains: An equity theory and network perspective to achieve sustainable development goals. *Journal of Cleaner Production*, 260(3), 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120950>

