

ANALISIS DEL ALCANCE ACTUAL DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA
TOMA DE DECISIONES EN LA LOGISICA INVERSA DEL E-WASTE UNA REVISIÓN
SISTEMICA DE LITERATURA.

LAURA ISABEL SUAREZ AVILA

Código:430066630

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

SECCIONAL DEL ALTO MAGDALENA

FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y EMPRESARIALES

PROGRAMA DE ADMINISTRACIÓN LOGISTICA

GIRARDOT, CUNDINAMARCA, 1-2024

ANALISIS DEL ALCANCE ACTUAL DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL PARA LA
TOMA DE DECISIONES EN LA LOGISICA INVERSA DEL E-WASTE UNA REVISIÓN
SISTEMICA DE LITERATURA.

Trabajo de grado para optar al título de Administrador Logístico

LAURA ISABEL SUAREZ AVILA

Código:430066630

ASESORA: CLAUDIA PATRICIA VARON DOMINGUEZ

Ing. Logística – Esp. Logística de Producción y Distribución

UNIVERSIDAD PILOTO DE COLOMBIA

SECCIONAL DEL ALTO MAGDALENA

FACULTAD DE CIENCIAS SOCIALES Y EMPRESARIALES

PROGRAMA DE ADMINISTRACIÓN LOGISTICA

GIRARDOT, CUNDINAMARCA, 1-2024

Nota de aceptación

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Girardot, fecha de sustentación (día, mes y año)

Tabla de contenido

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	7
1.1. Planteamiento del problema.....	7
1.2. Identificación y formulación del problema.....	12
1.2.1. Pregunta general.....	16
1.2.2. Preguntas específicas	17
2. JUSTIFICACIÓN	18
3. OBJETIVOS	27
3.1. Objetivo General.....	27
3.2. Objetivos Específicos.....	27
4. MARCOS DE REFERENCIA.....	28
4.1. Marico Teórico.....	28
4.2. Marco conceptual.....	31
4.3. Estado del arte.....	35
5. METODOLOGÍA	56
5.1. Aspectos metodológicos	56
5.2. Proceso metodológico.....	56
5.3. Adquisición de información.....	58
6. DESARROLLO DE FASES.....	60
6.1. Fase 1: Determinación del tema de investigación.....	60
6.2. Fase 2: Recapitulación de bibliometría de la logística inversa y la inteligencia artificial en ScienceDirect:	63
6.3. Fase 3: Caracterizar las principales actividades de la logística inversa que se utilizan en el E-Waste enfocado en las 6R de la logística inversa.	67
6.4. Fase 4: Determinar las principales actividades de logística inversa en la que interviene los modelos de la inteligencia artificial en la supply chain del E-waste.....	75
6.5. Fase 5: Destacar el impacto de los modelos de inteligencia artificial en la toma de decisiones en la logística inversa del E-waste.....	85
7. Conclusiones y recomendaciones	92
8. Referencias.....	94

INTRODUCCIÓN

La logística inversa se ha convertido en un elemento fundamental para la sostenibilidad y eficiencia en la gestión de la cadena de suministro, especialmente en el contexto del creciente desafío que representan los residuos electrónicos (E-Waste). Con el aumento exponencial en la producción y desecho de dispositivos electrónicos, se hace necesario desarrollar estrategias que no solo minimicen el impacto ambiental, sino que también maximicen el valor recuperado de estos productos al final de su ciclo de vida. Este artículo de investigación se propone examinar las interacciones entre la logística inversa del e-waste y la inteligencia artificial (IA), desglosando el análisis en varias fases que permiten una comprensión integral de estas dinámicas.

Se detecto la oportunidad de investigación debido al incremento del interés en áreas de la logística como son la logística inversa, y un tipo de productos como son los EEE, altamente producidos, utilizados y desechados, los cuales permiten que visualicemos como este sistema con flujo de diferente información y materiales tiene un gran impacto en nuestra actual sociedad.

Al mapear la producción académica y los patrones de citación, se establecerá un marco teórico robusto que apoyará las fases posteriores del estudio de forma aplicada a la logística inversa del e-waste, desarrollando un alcance correlacional con los métodos de integración de las tecnologías como las inteligencias artificiales y destacando el beneficio de implementación para la toma de decisiones dentro de una cadena de suministros circular.

1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1. Planteamiento del problema

El dinamismo con el cual se mueve el crecimiento global exige a las empresas un cambio de tendencias comerciales y una eficiente toma de decisiones para lograr el objetivo de alcanzar una mayor competitividad en el mercado, por lo tanto, las empresas han tomado conciencia sobre que, la mejor forma de evolución interna es el desarrollo de su red de logística mediante el uso de herramientas tecnológicas que permitan agilizar todo tipo de procesos en la red de suministros (Sourabh , Kannan , Surajit Ghosh , & Preeti , Abril de 2024).

Actualmente son muy populares los sistemas de Inteligencia Artificial (IA), y su implementación en la logística es ampliamente reconocida debido a su facilidad con el cual se puede integrar a los sistemas de gestión integral (SGI) con los que la mayor cantidad de empresas de logística y similares cuentan.

Como se ilustra en la gráfica uno, entre las futuras direcciones de investigación de la IA, se encuentra la predicción de demanda, predicción de volúmenes de devoluciones y las estrategias de disposiciones (transporte), los cuales impactan el desarrollo de la logística inversa.

Ilustración 1: AI in CLSC: Future Framework



Fuente: (Sourabh , Kannan , Surajit Ghosh , & Preeti , Abril de 2024)

Al presentarse la logística inversa como una ventaja competitiva con gran significado comercial y ético, se identifican tres motivos bien diferenciados que promueven el desarrollo y puesta en marcha de esta práctica, y estos son los legales, los sociales y los económicos (Sourabh , Kannan , Surajit Ghosh , & Preeti , Abril de 2024).

La logística inversa, se trata de la tarea de recuperar productos desechados; esto puede incluir embalajes y materiales de envío, y el acarreo regresivo de ellos hacia un punto central de recolección para su reciclado o remanufacturado, con el propósito de capturar valor y realizar una disposición final apropiada de los mismos.

Es importante diferenciar en la red de suministros, la logística inversa y la logística directa, debido a que la logística directa tiene una metodología lineal, pero la logística inversa puede ser

implementada en cualquier parte de la red de suministros (Cabeza, 2014), desde los procesos de selección de proveedores, en los procesos de producción y afecta sustancialmente los movimientos de transporte de material, como también la distribución dentro de los inventarios y los sistemas de información. En general encontramos lo siguiente puntos que diferencian la logística de inversa y la logística directa:

Tabla 1: Diferencias entre la logística directa y la inversa

Logística Directa	Logística Inversa
Estimación de la demanda relativamente cierta	Compleja estimación de la demanda
Transporte de uno a muchos	Transporte de muchos a uno
Calidad del producto uniforme	Calidad del producto no uniforme
Importancia de la entrega rápida	Poca importancia de la entrega rápida
Costos definidos y monitorizados por sistemas contables	Costos menos visibles y rara vez contabilizados
Gestión de inventarios relativamente sencilla	Gestión de inventarios compleja
Ciclo de vida de un producto gestionable	Ciclo de vida de un producto más complejo
Métodos de marketing conocidos	Marketing complejo de implementar

Fuente: (Cabeza, 2014)

Por lo tanto, para lograr una logística integral, no es suficiente con las estrategias, sistemas e información recopilada y analizada desde la logística directa, sino que también es deber de la organización hacer una planeación y proyección de como adoptar la logística inversa en cada uno de sus procesos y con cada uno de sus actores involucrados, ya sea en pronósticos, elección de proveedores, producción, inventarios, distribución o atención al cliente y responsabilidad

ambiental, pues se implica recursos financieros, personal capacitado y con experiencia en la logística inversa, tiempo y un espacio diferenciado.

Los actores involucrados en la logística inversa se componen primero por actores internos (o económicos) que serían: la misma organización y sus elementos Administrativos, financieros, RH, Diseño y producción, Marketing y logística, los cuales limitan el alcance y posibilidad de implementación de nuevos procesos y nuevas herramientas informáticas; y en segundo lugar como actores externos encontramos: el gobierno, que cada día impulsa nuevas leyes para que las empresas adopten practicas más sostenibles, también están los proveedores (recicladores o devoluciones), los operadores logísticos, los sistemas informáticos y la opinión del público en relación a el nivel de responsabilidad ambiental que tiene una empresa.

Se han previamente estudiado las ventajas que trae la implementación de una logística inversa, las cuales incluyen: “principalmente la disminución de incertidumbre en la devolución de productos defectuosos, la posibilidad de reutilización de materiales y el incremento de confianza del consumidor en la toma de decisiones” (Cabeza, 2014), generando un flujo adicional de información del producto en post venta y disminuye desperdicios y obsolescencia.

En la gráfica dos podemos observar las debilidades, oportunidades, fortalezas y amenazas (DOFA) que debe tener una organización antes de considerar implementar la logística inversa.

Ilustración 2: DOFA de la logística inversa



Fuente: (Cabeza, 2014)

Las debilidades y amenazas que pueden llegar a afectar a las empresas en el momento de implementar la logística inversa se presentan en las fases iniciales de su desarrollo, debido a que es un proceso adicional que requiere de una planeación detallada y enfocada a unos objetivos definidos, ya que la competencia siempre puede tener sus procesos más desarrollados como tecnificados, lo importante es enfocarse en las necesidades específicas de la organización para poder desarrollar sus propios métodos que funcionen para ellos, según sus alcances y limitaciones.

Una vez la logística inversa ya sea implementada y se establezca de forma funcional y eficiente en la organización, se pueden percibir las ventajas en las cuales encontramos, adquisición de conocimiento y alcance a nuevos mercados, ya que la información que se logra recolectar abre nuevas oportunidades de negocio y alianzas comerciales (Maruphy R & Knemeyer A, 2015).

Uno de los mercados que hace un mayor número de investigación para la gestión y mejoramiento, es el sector del E-waste o desechos electrónicos, los cuales, con el paso de los años se vuelven obsoletos; desde el 2014 hasta el 2023, se ha aumentado la producción de estos desechos globalmente en un promedio de 20 millones de toneladas anuales, pero sus niveles de reciclaje a pesar de aumentan fuertemente en los últimos 9 años solo llegan a procesar cerca del 50% de este tipo de desechos. Por esta razón muchas materias de alto valor se pierden y no pueden volver a la cadena de suministro de manera adecuada por lo que estos recursos primarios nuevos están cerca de llegar a su límite (Ouro-Salim, 2024).

1.2. Identificación y formulación del problema

El reto de la logística inversa es lograr integrar la mayor cantidad de información disponible de la cadena de suministros, consolidando una base de datos que permita el desarrollo de programas integrales para la toma de decisiones, y esto se ha venido desarrollando mediante la integración de las diferentes inteligencias artificiales, como el “Machine Learning”, “Swarm Intelligence”, “genetic argorih” y simulaciones, que son las más utilizadas (Sourabh , Kannan , Surajit Ghosh , & Preeti , Abril de 2024).

Dentro del artículo de revisión sistemática de la literatura titulado “Aplicaciones de la inteligencia artificial en cadenas de suministro de circuito cerrado” (Sourabh , Kannan , Surajit Ghosh , & Preeti , Abril de 2024), se ilustran los siguientes tres ejemplos de la implementación de las inteligencias Artificiales dentro de la Supply chain.

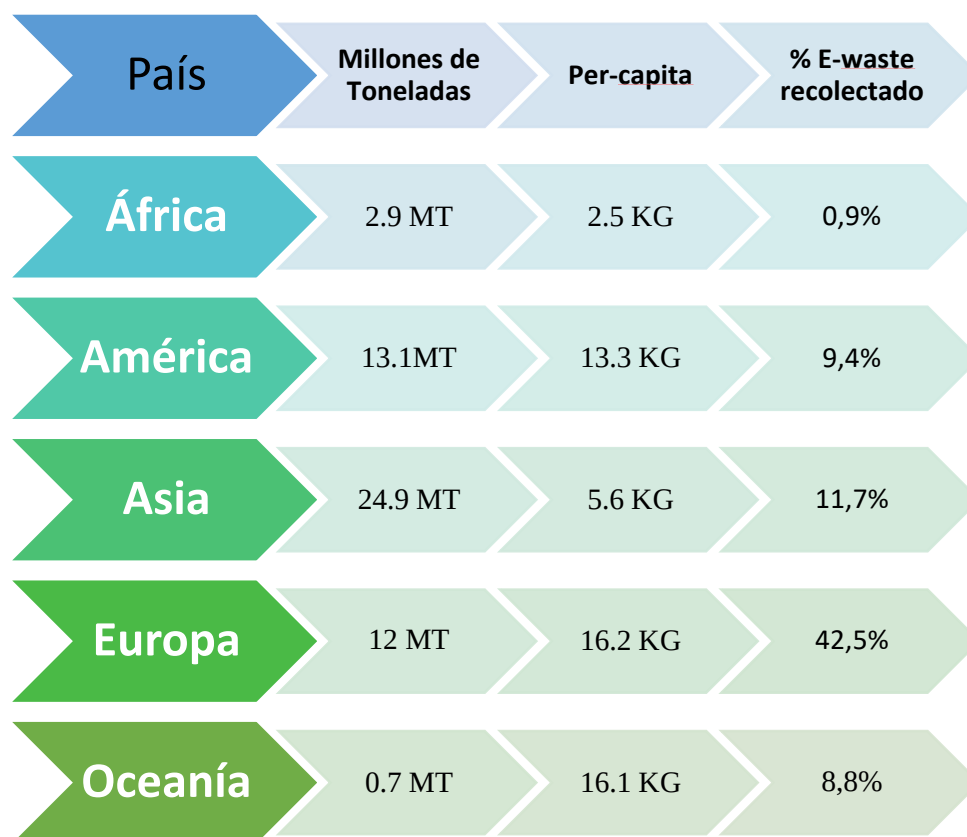
IKEA es un primer buen ejemplo, esta empresa Finlandesa, utiliza un software logístico que mejora la logística inversa gracias a una IA con el objetivo de realizar predicciones de las devoluciones con base a los datos recopilados en el proceso de clasificación donde se evalúan las condiciones físicas de los productos que fueron devueltos y las causas de esta devoluciones, lo

cual sirve para decidir qué hacer con la mercancía, como volverlo a integrar en el mercado y definir un nuevo precio de venta dentro de los mismos locales de IKEA, venderlo a un tercero o donarlo a la caridad, removiendo esta tarea de las personas, y logrando una optimización de los recursos al indicar oportunamente que acciones se deben de efectuar.

En USA, la Fuerza Aérea de los estados unidos en trabajo conjunto con IBM, permiten que las IA integradas en sus sistemas hagan la evaluación de sus proveedores imparcialmente antes de realizar contratos con ellos, y de esa forma lograr una calificación eficiente de más de 2000 postulantes en promedio, permitiendo que los mejores proveedores continúen con la selección, también este sistema, redirecciona a proveedores altamente potenciales a proyectos con los cuales tengan mayor afinidad y una alta probabilidad de ganar los contratos y evita la corrupción en el proceso de contratación y asignación de licitaciones.

Mientras que en India “Myntra” empresa de venta de ropa e-retailer, implementa las capacidades de la IA para reducir exponencialmente el porcentaje de retorno de los productos adquiridos en su portal web, en este caso implementan el programa de redes neuronales profundas, el cual analiza el comportamiento de sus consumidores dentro de la APP y logra predecir el volumen de devoluciones que puede llegar a tener un material según cada tipo de consumidor, por lo tanto comienza a modificar al cliente sus opciones de recomendados y ofrece cupones en productos con política de cero devolución.

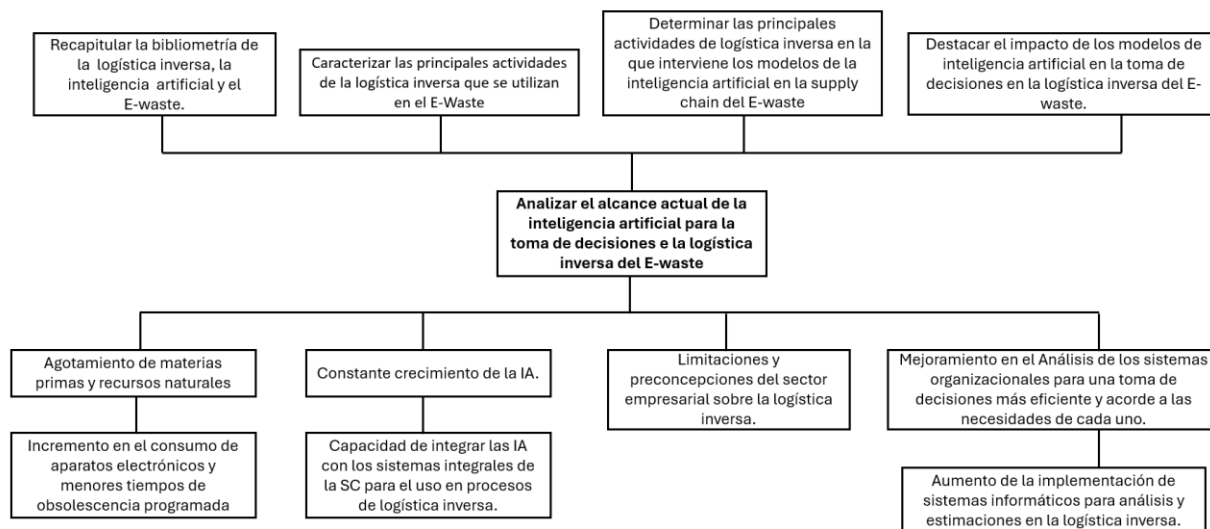
Ilustración 3: Estado de generación per-cápita y recolección de e-waste en el mundo
para 2019



Fuente: Elaboración propia (Forti, Balde, Kuehr, & Bel, 2020)

Gracias a los ejemplos anteriores e información global, podemos concluir que esta es una gran oportunidad en las organizaciones para desarrollar de manera integral sus sistemas y procesos en relación con la IA y la logística Inversa del E-waste; gracias a eso logramos adquirir el siguiente árbol de oportunidades, el cual es comprendido desde la parte inferior hasta la superior en secciones nombrada de la siguiente manera: Oportunidades de estudio, Propósito de estudio y Objetivos de estudio.

Ilustración 4: Árbol de oportunidad



Fuente: Elaboración propia

En las oportunidades de estudio, encontramos el panorama global y se entiende que hay cuatro sectores principales, que son, el impacto del E-waste en el medio ambiente y la cadena de suministros pues influye de forma homogénea y simultánea en los dos ámbitos, pues si las materias primas se reducen afecta al medio ambiente en su sostenibilidad y limita la capacidad de producción y venta en la cadena de suministros; el segundo es el crecimiento de la tecnología y la inteligencia artificial y el aumento en la capacidad de los sistemas integrales de gestión dentro de la cadena de suministros pueden adoptarlos; tercero, las limitaciones de conocimiento de las empresas en relación con la logística inversa, también, como el mercado ha adoptado esta nueva tecnología y la ha convertido en una ventaja comercial; y por último, el avance en las organizaciones que permite que cada vez sea más eficiente el análisis de la información y la toma de decisiones estratégicas mejorando sus procesos de pronósticos y velocidad de reacción.

Continúa con el propósito de estudio, el cual está enfocado esencialmente a investigar la información actual disponible sobre estas herramientas de IA desarrolladas en la Logística inversa

del E-waste, y de esa forma poder analizar cuál es el alcance de estas inteligencias para poder alimentarlas por las diferentes bases de datos construidas por las organizaciones y como esto afecta la toma de decisiones estratégicas de las organizaciones.

Y finalmente se proponen cuatro objetivos de estudio compuestos por: una recapitulación de la información bibliométrica de la implementación de la inteligencia artificial en la logística inversa del E-waste, que logra detectar los temas con más relevancia para el sector, como, los que han sido ampliamente investigados a lo largo de los años. Caracterizar las principales actividades de la logística inversa que se utilizan en el E-Waste, incluyendo las 6R de la logística inversa y como se aplica al campo de los desechos electrónicos. Determinar las principales actividades de logística inversa en la que interviene los modelos de la inteligencia artificial en la supply chain de los electrodomésticos y sus desechos. Concluyendo en destacar el impacto de los modelos de inteligencia artificial en la toma de decisiones en la logística inversa del E-waste, pues dependiendo de la eficiencia de la toma de decisiones dentro de estos complejos sistemas se logrará un procesamiento más eficaz del E-waste, analizando datos, tendencias y comportamientos devoluciones y desechos de los productos, para la elaboración de pronósticos y planes estratégicos en las organizaciones lo cual los beneficiara comercial y sosteniblemente.

1.2.1. Pregunta general

¿Cuál es el alcance actual de la inteligencia artificial para la toma de decisiones en la logística inversa del E-waste?

1.2.2. Preguntas específicas

¿Cuánto se está investigando sobre el uso de la inteligencia artificial dentro de la logística inversa?

¿Qué métodos de automatización están siendo usados en la logística inversa en el E-waste?

¿Cómo el proceso de la logística inversa optimiza la eficiencia dentro la Supply Chain del E-waste?

¿Cuáles son los modelos de automatización más usados en la logística inversa dentro de la Supply Chain del E-waste?

2. JUSTIFICACIÓN

Un efecto secundario de la implementación de la logística inversa es la construcción de procesos sostenibles, innovadores y socialmente responsables (Claudio , Garza-Reyes, Liu, de Jesus Pacheco, & Luthra, 2023), y la logística inversa puede proporcionar las soluciones requeridas en diferentes áreas ya que se enfrentan a los retos presentes en la organización como la selección de proveedores, producción, inventarios y devoluciones. (Ebrahimi Bajgani, Saberi, & Toyasaki, 2023).

Mediante la logística inversa y con la ayuda de herramientas tecnológicas, podemos participar en la economía circular (Abdul-Hamid, Helmi Ali, Osman, Tseng, & Lim , 2022) la cual consiste en hacer una re-introducción de valor de los productos a el mismo nivel comercial en la cadena de suministros en la que se encontraba antes de ser considerado un desecho, reactivando el ciclo de vida del mismo producto (Walter, Braun, & Louw, Development of a product return process in the context of the Circular Economy with the help of Machine Learning, 2023).

En la logística inversa tenemos 6 alternativas para tratar con los materiales según Domingo Cabeza (Logística inversa en la cadena de suministro, 2014):

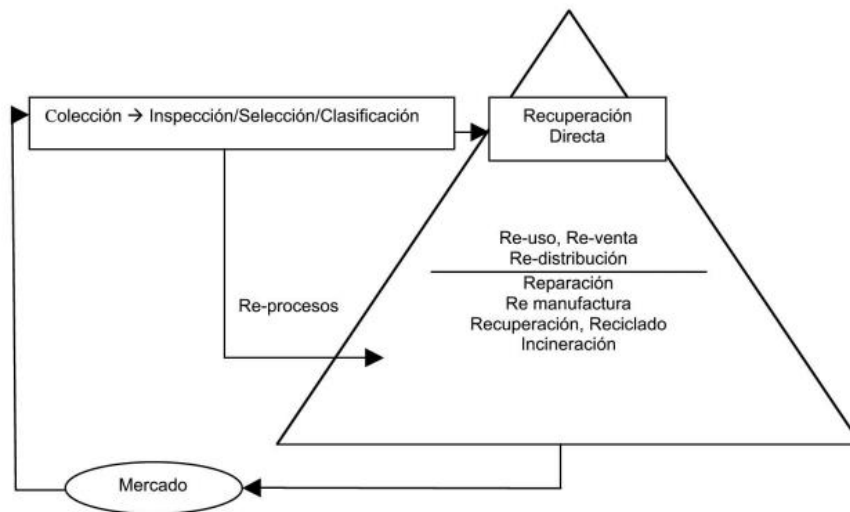
- Reutilización o reventa, recuperación de un producto para darle un nuevo uso ya que contine escaso deterioro, se clasifica limpia y aprovecha en su totalidad.
- Reparación o servicio técnico, producto usado es sometido a reparación para ponerlo de nuevo en funcionamiento.

- Restauración, devuelve a el producto mediante diferentes técnicas y tecnologías para alargar su vida útil.
- Re-fabricación o canibalización, los materiales recuperados tiene un mediano deterioro, pero le pueden ofrecer a las empresas un beneficio (caso de las baterías de computadores viejos) y reduce costos de adquirir materia prima, Se puede adquirir casi hasta el 50 % de los materiales requeridos para fabricar un nuevo producto. Cuando el producto ya tiene una descomposición alto, se logra recuperar una parte mínima pero que son muy valiosos.
- Reciclaje, recuperar material residual de un producto para usarlo como materia prima principal para la elaboración de uno nuevo y estos pueden alcanzar la calidad del producto original,
- Eliminación, clasificación y destinamiento responsable de los materiales inutilizables (incineración, compostaje, etc..), esto puede producir una degradación de los desechos que puede volver a utilizarse nuevamente como materia.

Como podemos ver en la gráfica 5, los flujos de los procesos de la logística inversa tienen su inicio en la colección del material o los artículos a reintegrar en la cadena productiva, no se nos indica desde que punto de la red de suministros sucede pues puede aplicarse en muchos momentos de esta, tanto en la producción como en la post venta con el consumidor final con las devoluciones o el reciclaje mediante recolectores, por lo cual luego siguen todos un proceso de inspección, selección y clasificación pues hay que asegurar la calidad, ya sea buena o mala, con la que se integra el material en la red de suministro y de esta manera comprender si es necesaria una recuperación directa como con artículos por devolución o material reciclado, o en un re-proceso cuando el material ya se encuentra dentro de la misma

cadena, como el aprovechamiento de material desperdicios productivos; y en ambos casos se debe de decidir cuál de las alternativas de la logística inversa implementar al material; una vez terminado y el valor recuperado el material puede volver a ser reintegrado al mercado y volver a iniciar el ciclo.

Ilustración 5: Procesos logísticos de retorno



Fuente: (Cabeza, 2014)

Entre las barreras que puede encontrar una empresa a la hora de aplicar la logística inversa en un inicio son según Domingo Cabeza (Logística inversa en la cadena de suministro, 2014):

- Estudios previos de factibilidad de la logística inversa, ya que este proceso no solo se desarrolla al final de la cadena, sino que por su complejidad involucra a todos los procesos y actores de la cadena logística directa.
- Entradas en el proceso de logística inversa, en la mayoría de los casos pueden ser impredecibles en un determinado nivel.

- La rentabilidad de las devoluciones, esto depende de cada producto, algunas empresas consideran más rentable fabricar productos no retornables, permitiendo comprender que la economía es un factor determinante para la implementación de la logística inversa.
- Percepciones desactualizadas que perciben la logística inversa como una amenaza para la organización, un retrabajo o una carga adicional en vez de una oportunidad de valor agregado y una estrategia de competitividad.

Por esa razón, es correcto afirmar que “los sistemas de recuperación económica de los productos fuera de uso varían dependiendo de diferentes características de dichos productos, como de la operación de recuperación de estos, como tanto de la empresa, de su estructura de distribución, etc...por ello cada empresa debería de adoptar el sistema de logística inversa que mejor se adapte a sus circunstancias” (Maruphy R & Knemeyer A, 2015).

Por ejemplo, el diseño y clasificación de inventario influencia la metodología de trabajo dentro de esta área de la organización, pues la gran cantidad de los casos en el momento de incluir en el flujo la logística inversa hay que realizar modificaciones y adaptaciones.

Entre las clasificaciones encontramos “las existencias de ciclo (base), existencias de seguridad (amortiguamiento), existencia de línea (transito) o existencias especulativas (demanda estacional)” (Cabeza, 2014), entre los cuales debemos de diseñar un espacio adecuado para el almacenamiento e inventario por devoluciones, los cuales deben de ser estudiados con detenimiento para poder detectar las razones de devolución, el estado y funcionalidad en el que se encuentra el producto, y de esta forma volver a integrarlo al sistema de gestión que maneja la empresa o el tipo de tratamiento a recibir para productos perecederos, pues se debe priorizar que este material no se termine convirtiendo en materia muerta dentro de la organización que

produzcan costos a nivel físico y financiero, con el objetivo que estos productos mediante la toma de decisiones abandonen nuevamente el flujo físico de la organización, ya sea volviendo a ubicarlos en el flujo de venta (los productos devueltos en buen estado), generando una re-fabricación (el material sobrante o materia adquirida para reacondicionamiento) o siendo desechado o eliminado (productos perecederos).

Las IA particularmente el machine learning, ha demostrado tener un gran potencial beneficioso, pero además debe lidiar con diferentes estrategias de aprendizaje (Meng p. , Xu , Peng, Youcef-Toumi , & Li, 2022), por esta razón es complejo de implementar y se sustituye por uno de los modelos más populares de la IA que tiene base en un sistema de algoritmo genético (GA) (Gołębiewski, Trajer, Jaros, & Winiczenko, 2013).

Al poder integrar la logística inversa en gran parte de toda la Supply Chain, sectores económicos, como el sector automotriz, ya están empezando a implementarlos, por ejemplo, en BWM se están implementado las IA en el estimación del costo y cotizaciones (Spreitzenbarth, Bode, & Stuckenschmidt, 2024), se incluye en el análisis de la IA, los descuentos que pueden llegar a aplicarse de acuerdo a las características específicas de cada cliente que viene a cotizar, esto es útil para remover tareas repetitivas a un personal humano con conocimiento y experticia, permitiéndole concentrarse en la toma de decisiones y representación de la marca.

Las organizaciones productoras, los proveedores y los aliados estratégicos de las organizaciones, producen unas cantidades masiva de datos que ofrecen un potencial sustancial de valor añadido que anterior mente no había logrado ser aprovechado y gracias a que esta big data actualmente logra ser digerida por inteligencias artificiales su análisis es realmente veloz y precioso, esencial para la resolución de problemas y toma de decisiones (Spreitzenbarth, Bode, & Stuckenschmidt, 2024).

Por otro lado, en Estados Unidos, mediante redes sociales hacen análisis de comportamiento de sus consumidores para obtener la probabilidad de las devoluciones de los productos según sus hábitos de consumo y sus comportamientos en redes sociales (Mohammad Hossein Shahidzadeh, Shokouhyar, Javadi, & Shokoohyar, 2022).

“Sin la necesidad de intervención humana, las organizaciones pueden usar la big data para examinar inteligentemente los comentarios y sentimientos de sus clientes y tomar decisiones estratégicas de logística inversa para reducir los bienes devueltos, los desechos, los niveles de inventario y los costos, al tiempo que aumentan la productividad” (Mohammad Hossein Shahidzadeh, Shokouhyar, Javadi, & Shokoohyar, 2022), obteniendo grandes beneficios como la mejora en la sostenibilidad de la cadena de suministro y la lealtad del cliente, lo que resulta en un movimiento más efectivo con el marketing, por lo tanto, esta herramienta se puede identificar como una ventaja competitiva y abre las posibilidades a mayores ganancias para la corporación.

También, Ford Motors, implementa la logística inversa dentro de su proceso de producción aprovechando las herramientas de simulación con inteligencia artificial que les permite reducir el costo y tiempo de producción mediante la utilización de material sobrante destinadas a ser usadas para partes nuevas y generando nuevas alternativas y variables de producción (Kumar, Raut, Mangla, Chowdhury, & Choubey, 2024).

No solo es la recuperación de valor comercial y financiero en relación con el material, es un hecho que el problema de la contaminación ambiental y el desperdicio de materiales vírgenes tiene un fuerte impacto en la sostenibilidad de la vida en el planeta y la sostenibilidad del desarrollo económico (Bildirici & Ömer Ersin, 2023). En Argentina se utilizan estas herramientas IA con modelos de simulación, para concluir las ubicaciones óptimas de los basureros en las ciudades para una recolección más eficiente, al incluirse todas las limitaciones ambientales y legales, logra

definir cuantos contenedores utilizar y los lugares donde instalarlos, retirando esta tarea a los trabajadores y personal humano (Rossit, Toutouh, & Nesmachnow, Exact and heuristic approaches for multi-objective garbage accumulation points location in real scenarios, 2020), y esto contribuye a un mejor desarrollo social que beneficia a la comunidad.

En el sector de la construcción en Australia, se propone la implementa una red de contactos con diferentes empresas con el mismo o similar rubro comercial, para permitir un flujo constante de información útil e implementar la logística inversa y fortalecer la economía circular donde para su prueba inicial tomaron de ejemplo el sector de la construcción y acabados, la cual se define en este caso, como una fusión de material y herramientas al final de su vida útil principalmente como resultado de procesos de construcción, demolición o deconstrucción, para reutilizar, reciclar y remanufacturar.

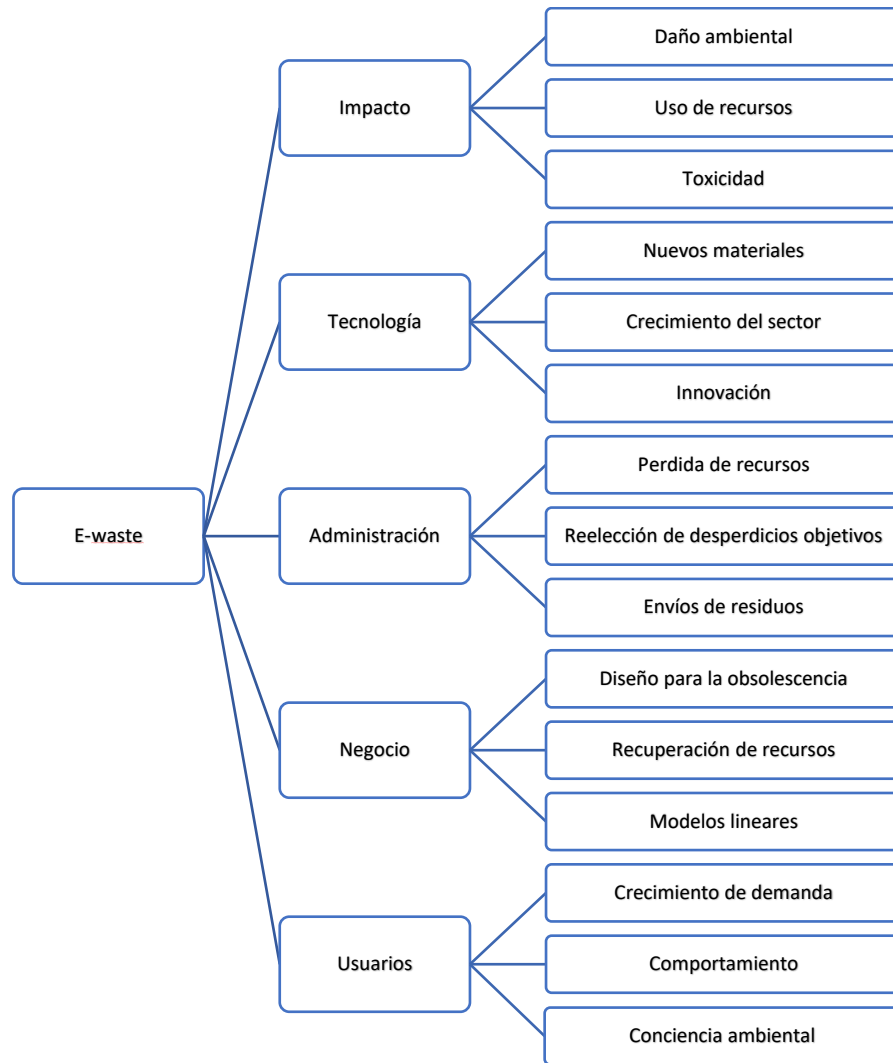
Pero el sector con mayor interés es el E-waste, incluso su aplicación a la inteligencia artificial es mucho más compleja debido a su sistema circular que maneja su cadena de suministros.

Uno de las técnicas propuesto son los sistemas de blockchain que permiten una forma distribuida digitalmente, descentralizada y altamente segura de registrar transacciones y rastrear activos en una red empresarial, esta propuesta tiene el objetivo de reducir costos y consumo de materiales vírgenes en el sector de la construcción que es muy contaminante (Elghaish, Hosseini, Kocaturk, Arashpour , & Bararzadeh Ledari, 2023), lo cual estaría contribuyendo a la economía circular, el cual tiene como meta el aprovechamiento total de los materiales, casi que, entrando en un flujo infinito de reutilización, Re manufacturación y reciclado (Majumdar, Mithun Ali, Agrawal, & Srivastava, 2022).

La importancia de desarrollar técnicas como la anterior para combatir el E-waste, es debido a la influencia que tiene en diferentes áreas como se menciona en la gráfica 6. De acuerdo con esto

encontramos que el impacto ambiental es generado principalmente por el daño ambiental por el uso de recursos naturales y materias primas escasas, y adicionalmente en su proceso de desecho y eliminación produce residuos tóxicos que puede llegar a afectar a las comunidades. En las tecnologías, encontramos que la influencia en el e-waste permite la investigación y desarrollo de nuevas alternativas con diferentes materiales reusables y con mayor facilidad de adquisición, también las nuevas tecnologías permiten la innovación en nuevos diseños de productos tradicionales lo cual beneficia el crecimiento dentro del sector económico de los electrodomésticos. En la Administración, mediante su correcta operación con la integración de mejores sistemas de gestión de la cadena de suministros tiene los beneficios de evitar la pérdida de recursos que produce el e-waste, mejora el proceso de recolección de desperdicios objetivos, que serían aquellos que contienen materiales de alto valor y mejorar la trazabilidad de los envíos de los residuos mencionados de alto valor. En el negocio de los electrodomésticos se encuentra la tendencia de disminuir los tiempos de obsolescencia de los productos por lo tanto sus tiempos de uso son menores y aumenta el volumen de desechos de estos productos, lo cual se supone que beneficia a las empresas ya que impulsa y aumenta la recurrencia de los nuevos modelos de los productos, por esta misma razón las organizaciones deben procurar que este volumen de e-waste sea recuperado en el mejor estado posible y en periodos de tiempo más estándares que permitan tener un nivel de recursos valiosos disponibles para una segunda vida, por esta razón los negocios deben de pasar a tener un modelo de comercialización lineal a pasar a modelos de economías circulares. Con los usuarios, existe un comportamiento de demanda creciente que requiere tecnología más actualizada y con precios más accesibles, y mediante el análisis del comportamiento de consumo y sus tendencias sociales, las cuales están solicitando cada vez más una conciencia ambiental mayor tanto para las empresas como para los usuarios.

Ilustración 6: Influencia del E-waste en diferentes áreas



Fuente: Elaboración propia (Islam, y otros, 2021)

3. OBJETIVOS

3.1.Objetivo General

Analizar el alcance actual de la inteligencia artificial para la toma de decisiones e la logística inversa del E-waste mediante una revisión sistemática de literatura.

3.2.Objetivos Específicos

- Caracterizar las principales actividades de la logística inversa que se utilizan en el E-Waste.
- Determinar las principales actividades de logística inversa en la que interviene los modelos de la inteligencia artificial en la supply chain del E-waste.
- Destacar el impacto de los modelos de inteligencia artificial en la toma de decisiones en la logística inversa del E-waste.

4. MARCOS DE REFERENCIA

4.1. Marico Teórico

Teoría de la industria 4.0: El término de la industria 4.0 se empezó a utilizar en Alemania en el 2011, descrita por Luis Joyanes Aguilar como "la digitalización de sistemas y procesos industriales, y su interconexión mediante la Internet de las cosas e Internet de los Servicios para conseguir una mayor flexibilidad e individualización de los procesos productivos" (Industria 4.0. La cuarta revolución industrial, 2017), compuesto por la integración de 3 elementos fundamentales para su desarrollo:

- Sistemas ciber físicos
- Internet de las Cosas
- Fabricación aditiva

Llegando a ser implementada con un soporte activo de la big data, y en estos últimos años, con la inteligencia artificial.

Esta teoría la vemos aplicada en el proyecto de investigación con el proceso de recolección de información, indagando el cómo mediante el uso de las inteligencias artificiales podemos optimizar el proceso de logística inversa en las organizaciones mediante la adaptación de sistemas ciber físicos, el desarrollo interno de las empresas, el internet de los casos y la adaptación de nuestra producción para recuperar un valor de los materiales retornados.

Teoría general de los sistemas: esta teoría se comprende como el proceso de estudio interdisciplinario para lograr entender, describir y analizar diferentes y completos grupos dentro de un campo de estudio (von Bertalanffy, 1968). En la investigación está presente esta teoría con el estudio del campo de las ciencias tecnológicas con el análisis de las inteligencias artificiales, el

estudio logístico de la logística, la cadena de suministros y la logística inversa, y con el sector económico por considerar como esta economía circular puede influenciar la toma de decisiones de las empresas de acuerdo con un análisis de datos.

Machine Learning (ML): o aprendizaje automático es una rama de la Inteligencia Artificial que se centra en el desarrollo de algoritmos y modelos capaces de aprender y mejorar su rendimiento a partir de datos, su teoría se basa en lograr utilizar datos y algoritmos para imitar la forma en que los humanos aprenden, mejorando gradualmente su precisión con el tiempo, se utilizan tres tipos de aprendizaje en ML: supervisado, no supervisado y por refuerzo, según el tipo de ML se puede procesar con mayor o menor precisión datos para la obtención de información y posteriormente analizarlo dando conclusiones o tomando decisiones con base a la información que el mismo programa desarrolló (Zhang, 2022).

Teoría del Lean Manufacturing: Esta metodología propone desarrollar una “maximización del valor del producto ofrecido al cliente mediante la reducción y eliminación de desperdicios en los procesos de producción llegando a construir un sistema eficiente y flexible” (Imai, 1986). Esta teoría se ve reflejada en el artículo de investigación debido que uno de los objetivos de la logística inversa es la recuperación y disminución de desperdicios que se da antes, durante y después del proceso productivo dentro de toda la cadena de suministros.

Teoría del método Kaizen: “Filosofía japonesa donde se practica la gestión centralizada a la mejora continua dentro de cualquier aspecto administrativo deseado; el desarrollo de esta metodología requiere la participación de todos los empleados en cada área para cumplir la tarea de identificar oportunidades de mejora continuas” (P. Womack & T. Jones, 1996). Dentro de nuestra propuesta de implementación de inteligencias artificiales en los procesos de logística inversa, se evidencia esta metodología ya que mediante el análisis de situación actual de las organizaciones

se logra identificar puntos de fuga durante los diferentes procesos de la cadena de suministros, en donde se va lograr un reaprovechamiento de los materiales y productos secundarios, y del mismo modo mejorar los procesos por la posibilidad de disminuir sus desperdicios, y sugerir nuevos métodos de proceso de acuerdo al análisis de la información y datos suministrados por los productos devueltos y desarrollo de pronósticos que permitan lograr una disminución de esas ocasiones reduciendo los costos por devolución.

Teoría de la contingencia: “Propone que la efectividad en la toma de decisiones no se limita a un método ni herramienta única, sino que varía según las condiciones particulares del contexto, que incluyen aspectos como el entorno, la configuración organizativa y la tecnología empleada en las diferentes organizaciones” (Fiedler, 1964). Uno de los principales direccionamientos que compone esta investigación es la evaluación de como las herramientas tecnológicas como la inteligencia artificial puede ayudar con la toma de decisiones dentro del área de la logística inversa dentro de múltiples entornos y contextos.

Teoría de las Restricciones: esta teoría funciona entorno a la identificación y gestión de limitaciones y restricciones de diferentes sistemas operativos dentro de la cadena de suministro, con el objetivo de mejorar el flujo de los procesos y evitar que estas restricciones retrasen las actividades, y se logra mediante el estudio, exploración y subordinación de las decisiones tomadas con anterioridad y evaluar su funcionamiento contra las limitaciones de los procesos, para la propuesta y ejecución de nuevas alternativas que puedan dar resultados más óptimos y repetir el proceso (Goldratt & Cox, 1984). En la logística inversa, se encuentran siempre muchas restricciones no solo cuando se evalúan los flujos de recuperación y reintegro de material a las organizaciones ya sea por devoluciones o por recuperación de materia con valor productivo, porque hay una mayor complejidad de acceso a los puntos de origen que su complejidad proviene

de que estos puntos de origen cambian constantemente, pero también se presentan restricciones cuando se desea hacer logística inversa en el proceso productivo, como la solicitud que estos procesos adicionales de logística inversa no interfieran con el flujo actual de los procesos productivos, por lo tanto esta teoría de la metodología de restricciones es de gran influencia y funcionalidad en esta investigación.

4.2. Marco conceptual

Logística: “Es el proceso de planificación, implementación y control eficiente del flujo y almacenamiento de bienes, servicios e información desde el punto de origen hasta el punto de consumo para satisfacer las necesidades del cliente, mediante la coordinación de diferentes áreas y stakeholders” (Bureau Veritas Formación, 2015).

Cadena de suministro: “Es un sistema interconectado de organizaciones, actividades, información y recursos que participan en la creación y entrega de productos o servicios a los consumidores, su gestión y liderazgo pretende agiliza los flujos entre los nodos de la cadena para aumentar la eficiencia del flujo desde el origen hasta el consumidor final, mediante la interacción y cooperación entre las diferentes empresas para que todas ellas trabajen como una, basándose principalmente de la coordinación logística y los sistemas integrales de información” (Chopra & Meindl, 2020).

E-waste: “los Equipos Eléctricos y Electrónicos (EEE) abarcan una amplia gama de productos con circuitos o componentes eléctricos que funcionan con energía o baterías, como electrodomésticos, juguetes, herramientas, dispositivos de música, y productos de TIC como teléfonos móviles y laptops. Además de los usos cotidianos en hogares y negocios, los EEE se utilizan cada vez más en sectores como transporte, salud, seguridad y generación de energía. Productos tradicionales como ropa y muebles ahora incluyen componentes eléctricos. Los EEE se

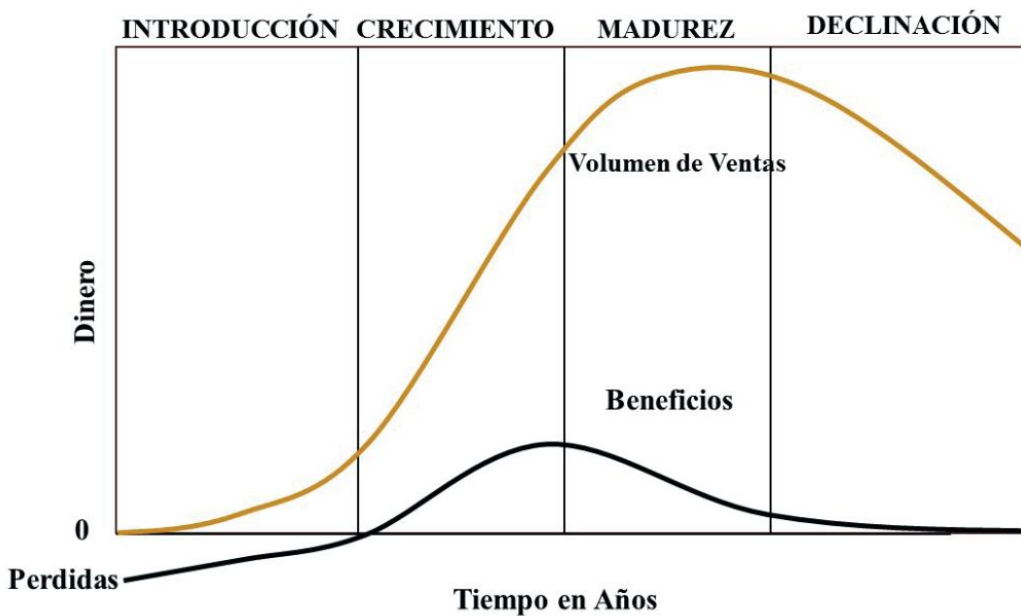
convierten en e-waste cuando son desechados sin intención de reutilización” (Forti, Balde, Kuehr, & Bel, 2020), entre sus principales categorías encontramos a: unidades de control térmico, pantallas y monitores, lámparas y luces led, tecnología y accesorios inteligentes, grandes y pequeños electrodomésticos desde lavadores y neveras hasta aspiradoras y ventiladores.

Logística verde: también conocido como logística ambiental o sostenible, se trata de las “diferentes estrategias logísticas utilizadas para minimizan el impacto negativo en el medio ambiente, algunas de las estrategias comunes en la logística verde incluyen la optimización de rutas e implementación de nuevas tecnologías para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, el uso de embalajes biodegradables o reciclables y la recuperación del mismo para ser transformado” (McKinnon, 2010), por esta última razón la logística verde puede ser confundida o asimilada a la logística inversa, pero realmente el área de logística inversa trata de mejorar y optimizar los flujos de material e información desde el consumidor hasta la empresa, con el objetivo que los costos por desperdicio y devoluciones se reduzcan y adicional que la organización adquiera ganancias mediante el tratamiento de materia de segundo uso con alto valor productivo, al contrario de la logística verde que puede apoyarse en sus actividades mediante la logística inversa pero que su objetivo es meramente por responsabilidad ambiental.

Ciclo de vida: nos referimos al ciclo de vida de un producto dentro del mercado, y se comprende como “ las etapas de crecimiento de un producto en el mercado, el ciclo de vida de un producto es importante para las estrategias de marketing y gestión empresarial, ya que ayuda a planificar y a controlar el crecimiento y declive de un producto, estas etapas de crecimiento son: la introducción al mercado, el crecimiento, la madurez y su declive, englobando la marca de dicho producto” (Golder & Mitra, 2012); de la misma forma es importante en la logística inversa debido a que mediante el análisis de esta big data a analizar se puede anticipar y pronosticas los volúmenes

de devoluciones altos o bajos junto también a el proceso de mejora continua de su red de producción y suministros en la cual es necesaria la intervención de la logística inversa. Sin embargo, el término “ciclo de vida” de un producto también es implementado en una gran cantidad de investigación como tiempo de utilidad que puede llegar a tener un producto como herramienta, y el cómo al final de su vida útil (EoL), puede ser destinado a la logística inversa dependiendo el estado en el cual ha llegado el objeto para el reintegro de sus componentes a la cadena de suministros.

Ilustración 7: Fases Ciclo de vida de un producto



Fuente: (Loaiza Torres, 2018)

Big data: “Conjuntos de datos altamente complejos, debido a su variedad y alto volumen de generación, los datos cuantitativos pueden venir estadísticas de páginas webs de venta, sistemas de atención al cliente, sensores de dispositivos IoT (internet de las cosas), registros de transacciones, etc... Para trabajar y analizar big data se utilizan tecnologías especializadas, como

sistemas de almacenamiento distribuido, plataformas de procesamiento de datos en tiempo real y técnicas de análisis avanzado como el aprendizaje automático” (Mayer-Schönberger & Cukier, 2013), la finalidad de desarrollar esta ciencia de datos es identificar patrones, tendencias y correlaciones, generar pronósticos y proponer decisiones informadas basadas en toda la información encontrada.

Inteligencia artificial: o (IA) se define como el estudio de agentes inteligentes que interactúan con su entorno mediante la percepción y la acción, estos agentes son sistemas diseñados para recibir una bigdata a través de sensores, procesarla en información para su apoyo en el análisis y tomar decisiones que permitan alcanzar objetivos específicos de un proyecto (Russell & Norvig, 2016), adicionalmente, los agentes inteligentes destinados a sistemas teóricos de decisiones, llegan a considerar la incertidumbre y las recompensas esperadas, que les permite a las IA tomar decisiones óptimas en contextos complejos.

Bibliometría: se considera una metodología científica de la información que utiliza métodos cuantitativos y estadísticos para analizar y medir la producción bibliográfica y el impacto de la literatura científica, con un enfoque sistemático que permite estudiar patrones de publicación, su difusión y la utilización de la información contenida en documentos científicos o académicos, esto permite a los investigadores y comunidad académica evaluar la relevancia y la influencia de las investigaciones, así como identificar tendencias y áreas de interés dentro de una disciplina o diferentes áreas de estudio (Roemer & Borchardt, 2017).

4.3. Estado del arte

La logística inversa es mucho más compleja, la cual tiene diferentes regresiones a la cadena de suministro (Krause, Fischer, & Igel , 2020) y requiere para su operación y gestión de los diferentes sistemas de inversos de retorno una considerable infraestructura, tecnología, información y experiencia. (Krause, Fischer, & Igel , 2020).

En este momento la logística inversa ha sido presentada como una tendencia global que ha afectado desde entornos macro hasta entornos micro socio-económicos, un ejemplo es el efecto que causa desde los gobiernos, organizaciones globales, el sector privado y los sectores académicos (Nobre & Tavares, 2021), ya que la logística inversa es la base para un nivel de economía circular que permite potenciar de manera sostenible, e inicialmente, rentable pero mayormente ligada al valor agregado que las empresas proporcionan con estos procesos de manera económica, social y la degradación ambiental por el agotamiento de la materia prima y recursos en las industrias (Prochatzki, y otros, 2023).

Pues en realidad, no deja de ser una tendencia por que hasta el 2023 la economía global solo ha implementado el 8,6% de la economía circular mediante la logística inversa, en todo el material que podría haber sido recuperado (Walter , Braun, & Louw, Development of a product return process in the context of the Circular Economy with the help of Machine Learning, 2023). Y esta teoría de la economía continúa contradiciéndose debido al rápido crecimiento del consumo de productos y su mínimo porcentaje de recuperación de los productos que se encuentran al final de su vida útil (Walter , Braun, & Louw, Development of a product return process in the context of the Circular Economy with the help of Machine Learning, 2023).

Sin embargo, se debe de encontrar nuevas maneras para que las industrias y gobiernos apliquen con mayor urgencia y eficiencia una economía circular impulsando la logística inversa

debido a que la economía lineal es insostenible por la gran cantidad de residuos generados después de la producción y consumo de bienes (Lahane, Kant, & Shankar, 2020).

Esto implicaría que es necesario una fundamental del diseño técnico de los productos y las actividades económicas, de esta manera alejarnos de un flujo lineal a proporcionar productos que puedan cumplir con múltiples ciclos de vida antes de ser dispuestos para su eliminación, un ejemplo de esto son las baterías las cuales una vez sean recolectadas, repuestas y recargadas pueden volver a entrar en la cadena de suministro con un valor económico (Wesselkämper & Delft, 2024); sin embargo, se estimó que el mercado mundial de reciclaje de baterías alcanzó para 2022 los 8 mil millones de dólares, con un margen de material reciclado alcanzará los 600 \$/tonelada en 2025 y se estiman 20 mil millones de dólares en 2028 (Wesselkämper & Delft, 2024).

Como tal, en el mundo se estima la producción anual para 2023 fue de aproximadamente 1.300 millones de toneladas de residuos y se espera que esta cifra continúe en aumento hasta llegar a 2.200 millones de toneladas para el 2025 (Tushar, y otros, 2023). Esto ha levantado alertas en las principales ciudades y centros urbanos globalmente, debido a que estos residuos crean graves impactos ambientales, y socio económicos; así como los residuos han aumentado, pasa lo mismo con la población, la incrementación de urbanización y un crecimiento económico más acelerado, y es una problemática que controlar principalmente los países en desarrollo ya que sus sistemas de gestión de residuos son principalmente ineficientes o directamente inexistentes (Hashemi-Amiri, y otros, 2023), y se han llegado a proponer metodologías de la logística inversa para solucionarlo con las conocidas 6R's (Reutilización, Reparación, Restauración, Re-fabricación, Reciclaje y Eliminación) (Logística inversa en la cadena de suministro, 2014).

No obstante, las tasas de reciclaje en Europa varían desde un 10% en países como Malta y Montenegro, en Portugal con un 30%, en España un 40% y hasta un 65% en Alemania (Scott, Neto, & Pinheiro, 2023).

La logística inversa es una ventaja competitiva que las empresas han empezado adoptar tanto por maximizar su beneficio individual y reducir costos integrándolo dentro de su cadena de suministros, pero también, están buscando cumplir con una responsabilidad social (Huang, Chen, Chih, Chang, & Lien, 2023) y ambiental, lo que puede impulsar la reducción de consumo significativo de recursos y materiales vírgenes, como también una optimización de la energía usada y la reducción de desechos no aprovechados (Bhattacharya, Govindan, Dastidar , & Sharma, 2024).

A medida que se amplían de las cadenas de suministro con redes globales (Gölgeci, Gligor, Bayraktar , & Delen, 2023), las empresas han notado que el flujo de información se hace más importante se han implementado herramientas informáticas como el almacenamiento en la “nube” que permite tener la información actualizada en vivo, por lo que ha surgido la necesidad por parte de los empleados de encontrar una mejor manera de analizar grandes volúmenes de datos para poder orientar estos análisis a la toma de decisiones estratégicas (Massari, Nacchiero, & Giannoccaro, 2023) permitiendo adquirir un nuevo valor agregado a las cadenas de suministros globales.

Spreitzenbarth, Bode, y Stuckenschmidt, detectaron que mediante las tecnologías inteligentes e inteligencias artificiales el procesamiento de información en la cadena de suministros agiliza la negociación sobre las ventas, ya que analiza las solicitudes mediante el procesamiento de datos y de lenguaje humano, lo que ha permitido la eliminación de entradas duplicadas de parte de los proveedores y clientes, logrando clasificar todas las ordenes, permitiendo que la facturación

y los plazos de entrega sean más cortos (Artificial intelligence and machine learning in purchasing and supply management: A mixed-methods review of the state-of-the-art in literature and practice), así mismo la implementación de estas inteligencias artificiales pueden aumentar la calidad de las operaciones de logística inversa adquiriendo una mayor agilidad y costo-eficiencia (Bajgani, Saberi , & Toyasaki, 2023).

La economía circular puede entenderse como todas las actividades relacionadas con la reducción, reutilización, reciclaje y distribución de productos/componentes/materiales a lo largo del ciclo de vida (Chouinard , Pigosso , McAloone , Baron , & Achiche, 2019), pero hay casos muy específicos donde esto no puede aplicarse, por ejemplo, la cadena de suministro de aceite de palma, es considerada un sistemas económicos insostenibles, debido a su complejidad y controvertidas prácticas en su operación y proceso de producción que llegan provoca una contaminación ambiental masiva durante todo el ciclo de vida del producto (Abdul-Hamid , Ali, Osman, Tseng, & Lim, 2022). Para optimizar estos tipos de sistemas, donde también podemos encontrar a la industria agroalimentaria, se deben eliminar los cuellos de botella que no permiten un correcto procedimiento de la logística inversa y su cadena de valor (Spreitzenbarth, Bode, & Stuckenschmidt), concretamente estas dos industrias, desperdician toneladas de aceites y grasas que no son aptas para el consumo inmediato, su recolección depende en gran parte de la experiencia de los gestores de logística inversa, lo que se traduce en visitas imprecisas por parte de los transportistas y de los equipos de operaciones; de hecho, la medición de los residuos de subproductos es compleja y, por tanto, la información es imprecisa, lo que hace que las operaciones de recogida sean ineficientes _ (Montecinos, Ouhimmou, Chauhan, & Paquet , 2018).

Por lo tanto, resulta esencial comprender cómo los recursos de la Industria 4.0 y tecnología inteligente influyen en la logística inversa y la cadena de suministros, es decir, una la logística

instrumentada e interconectada, permite que los procesos de fabricación ecológica, remanufactura dinámica y logística empresarial generen alto impacto positivo en la capacidad de fabricación ecológica (Bag , Yadav, Wood, Dhamija , & Joshi, 2020),

Por otra parte, La implementación de tecnologías inteligentes sostenibles se consideran deliberadamente inversiones a corto plazo, pero los beneficios serán visibles a largo plazo con el diseño de las estrategias apropiadas, pues esta innovación en los procesos de la logística inversa sirve para planificar, supervisar, optimizar o minimizar el uso de recursos y puede mejorar la sostenibilidad ambiental y la rentabilidad de la empresa (Chiang, 2024), usando técnicas como la medición del ciclo de vida de los productos dentro de los sistemas de la cadena de suministro y el manejo de los desperdicios o desechos con procesos de optimización (Sassanelli, Garza-Reyes , Liu, Pacheco, & Luthra, 2023).

En la era de la Industria 4.0, utiliza métodos como el seguimiento del mercado, investigación de la competencia, y retroalimentación de clientes, los fabricantes deben tomar decisiones estratégicas sobre la reutilización y el reciclaje de productos devueltos para minimizar los residuos, integrando las prácticas industriales con el comportamiento social. La insatisfacción del cliente es la principal razón detrás de las devoluciones, independientemente del estado del producto o su ciclo de vida, los gerentes deben decidir si reutilizan o reciclan productos insatisfactorios, considerando la perspectiva del cliente, involucrar a los consumidores en estas decisiones puede ofrecer una ventaja competitiva a las organizaciones, por lo que se propone un marco para la toma de decisiones que involucra a los consumidores en la cadena de suministro, lo que resulta en una logística inversa centrada en el cliente mediante la "toma de decisiones por consenso descentralizado" (Shahidzadeh , Shokouhyar, Javadi, & Shokoohyar, 2022).

Y la nueva tecnología de tecnología inteligente cada vez mas implementa la inteligencia artificial, y en el aprendizaje automático (machine learning) se utilizan algoritmos para extraer conocimiento de los datos, identificando patrones y regularidades a partir de datos de entrenamiento previamente ingresados.

En la implementación de la IA, se han identificado desafíos clave como la falta de conocimientos técnicos, la escasez de datos y la seguridad de estos, y al iniciar la implementación de IA, los algoritmos reciben datos de entrenamiento para desarrollar una estructura generalizada don hay tres clases principales de algoritmos de aprendizaje automático que se manejan según el tipo de retroalimentación recibida: supervisado, no supervisado y reforzado. Ya que no todas las organizaciones tienen una necesidad y complejidad diferente es necesario probar varios algoritmos para validar su rendimiento en función del conjunto de datos y el objetivo de aprendizaje (Lickert, Wewer, Dittmann, Bilge, & Dietrich, 2021).

En particular, los beneficios de las estrategias circulares podrían verse reducidos por efectos rebote (RE), que pueden ser definidos como el uso circular excesivo de recursos debido a una mayor eficiencia en un sistema con la negativa de no mantener la calidad original de los productos ofertados, y el mecanismo de factores cruzados la mejora en los procesos de producción puede aumentar la demanda y mejorar el crecimiento económico de la organización y mediante los mecanismos de precios de mercado aumentan las ganancias y los ingresos y generan efectos de reinversión (Ferrante, Vitti , Facchini, & Sassanelli, 2024).

Según Simonetto, Sgarboss, Battini y Govindan, entre los riesgos de la logística inversa encontramos (Simonetto, Sgarboss, Battini, & Govindan , 2022):

- I. Riesgos relacionados con la demanda de productos finales: Cuando la demanda de los clientes no puede satisfacerse debido a imprecisiones en el inventario.
- II. Riesgos relacionados con la demanda de productos usados: Se presentan cuando la demanda de productos de segunda mano no puede satisfacerse debido a imprecisiones en el inventario.
- III. Riesgos relacionados con productos devueltos: Ocurren cuando la cantidad y la calidad de los productos devueltos no son las esperadas, o cuando el tiempo de devolución y recolección es impredecible.
- IV. Riesgos relacionados con el re-procesamiento de productos devueltos: El re-procesamiento puede ser variable en términos de tiempo, costo, eficiencia e impacto ambiental, afectando tanto los flujos de materia e información inversos como el flujo directo de la operación.
- V. Riesgos relacionados con la eliminación de productos devueltos: Los costos de eliminación pueden minimizarse mediante el re-procesamiento, que debe optimizarse para evitar desechar productos que aún tienen componentes útiles.
- VI. Riesgos relacionados con los proveedores: La calidad y confiabilidad de los proveedores pueden variar significativamente, haciendo difícil la selección para logística inversa que trabaja con materiales reciclados o re-fabricación con materias recuperadas.
- VII. Riesgos relacionados con la fabricación: Aparecen cuando el proceso de producción es poco confiable o ineficiente, la productividad no es la esperada, o hay un impacto ambiental no medido al usar materiales reciclados. Es crucial conocer la cantidad de componentes que se pueden recuperar de productos devueltos para determinar la cantidad de materia prima a adquirir.

VIII. Riesgos relacionados con la distribución: Las empresas deben optimizar la distribución tanto para el flujo directo como para las actividades del flujo inverso. Una mala gestión de la distribución puede afectar todas las actividades de la cadena de suministro, por lo que estudiar la ubicación de instalaciones y monitorear condiciones meteorológicas es esencial para optimizar la distribución y reducir emisiones.

En particular, las tasas de recuperación de las acciones de reciclaje existentes en los EE. UU. y el Reino Unido podrían ser tan bajas como el 22,9% y el 21,8%, respectivamente, concretamente, los desperdicios en el sector farmacéutico en Estados Unidos alcanzan a dos tercios de los medicamentos vendidos lo que causa una pérdida financiera de hasta \$5.4 mil millones anuales. China no se queda atrás, donde debido a una costumbre cultural de almacenar medicamentos , provoca que se generaron anualmente más de 15.000 toneladas de medicamentos caducados (Luo & Wan, 2022) por lo que este país ha tenido que constante mente armar campañas con el gobierno, fabricantes de medicamentos, farmacias y el público, de concientización y de recolección de desechos médicos, como con el procesamiento de dispositivos de protección como sucedió en la pandemia del Covid-19 (Morjéne, Ndhaief, & Rezg, 2022).

Por lo observado, las cadenas de suministros de las farmacéuticas también cuentan con una gran problemática en su logística inversa principalmente en la recolección y disposición de muchos de estos productos que en la mayoría de los casos tienen materiales bastante valiosos, donde los medicamentos caducados se dividen en tres clases: deben eliminarse, pueden remanufacturarse y pueden reciclarse, para lograr el objetivo de manejar correctamente estos productos caducados se desarrolla la estrategia denominada “definir-medir-analizar-mejorar-controlar” la cual es contralada con una base de machine learning (Luo & Wan, 2022)

Adicionalmente los residuos dentro de la cadena de suministro pueden clasificarse como residuos pre-consumo y residuos posconsumo; donde los primeros son generados durante los procesos de fabricación y son fáciles de reciclar, ya que se pueden recolectar y separar fácilmente; sin embargo, los residuos posconsumo, plantean serios desafíos durante la recolección, la separación y el reciclaje o re-fabricación (Majumdar, Ali , Agrawal, & Srivastava, 2022).

Para este proceso de re-fabricación, que son materias que ya se han reintegrado a otro nivel de la cadena de suministros a un nivel de producción y enfrentan muchos desafíos que no se encuentran normalmente en los sistemas de fabricación tradicionales, adicionalmente, este proceso se considera más exclusiva, debido a que la mayoría del valor de producto aún se conserva y su vida útil puede extenderse. Pero estos productos con un nuevo ciclo de vida resultan complejos de ser nuevamente vendidos por las creencias de los consumidores sobre pérdida de calidad y falta de confianza a los procesos de reacondicionamiento (Teixeira, Tjahjono, Beltran, & Julião, 2022). Por esa razón es importante reconocer a que tiempo de mercado se van a reintroducir estos productos, sustentar la viabilidad económica pues su menor demanda produce que estos productos se perciban como un producto más barato sin calidad (Beducci, Acerbi, Pinzone, & Taisch, 2024).

Pero adicionalmente se enfrenta a una incertidumbre de suministro de materia reciclada, por lo que la capacidad de desarrollar una planificación de producción flexible para abordar el desmontaje y el manejo de componentes remanufacturados se convierte en esencial para, y las habilidades técnicas más importantes incluyen las de limpieza, que son fundamentales para las empresas de re-fabricación las habilidades en el desmontaje son útiles para tratar con componentes de calidad desconocida, especialmente cuando estos no han sido diseñados para ser desmontados (Beducci, Acerbi, Pinzone, & Taisch, 2024).

El reciclaje de productos al final de su vida útil solo sería económicamente viable para grandes volúmenes de materiales, lo que requiere altas tasas de recolección. Sin embargo, la larga vida útil de algunas tecnologías bajas en carbono retrasa el retorno de materiales al flujo de reciclaje, pues las tecnologías de clasificación y reciclaje aun no son competitivas con los bajos precios de las materias primas. Sin embargo, si los precios de las materias primas aumentaran, la situación económica de la logística inversa de re-fabricación podría cambiar (Karali & Shah, 2022).

Un ejemplo de esto es el reciclaje de cobalto, que se volvió económicamente viable cuando los precios del cobalto subieron debido a la restricción de la oferta, y la opción más viable fueron los materiales recuperados de los productos que ya habían cumplido su ciclo de vida, pero, la mayoría de los materiales con un alto valor son peligrosos, como el selenio, el cual requiere un tratamiento térmico adicional o el uso de solventes orgánicos costosos. Sin embargo, el telurio y el cadmio son excepciones, ya que alcanzan eficiencias de reciclaje superiores al 65%, por ejemplo, la plata de los paneles fotovoltaicos casi no se recicla, a pesar de tener una tasa de reciclaje general del 30% al 50% hasta el 20250, alcanzando el máximo nivel de recuperación, y la plata representa casi el 50% del valor material de los paneles fotovoltaicos (Karali & Shah, 2022).

El diseño de las baterías dificulta la separación de otros metales sin emplear reactivos orgánicos costosos para la extracción con solventes. Iniciativas como los proyectos de reciclaje de baterías de litio del Instituto de Materiales Críticos del Departamento de Energía de los EE. UU. buscan recuperar el litio de equipos al final de su vida útil. Además, algunas grandes empresas mineras de litio están colaborando con fabricantes de equipos automotrices para reciclar este material (Karali & Shah, 2022), donde anteriormente, la selección de materias primas se ha basado en parámetros que consideran datos tanto precisos como ambiguos (Haq, y otros, 2022), pero

actualmente los fabricantes deben ser responsables de todo el ciclo de vida del producto e identificar que materias primas o de segunda vida serán las más convenientes y si van a continuar siendo aprovechadas después de su consumo o que sean amigables al medio ambiente en su proceso de eliminación para que sus desechos no se conviertan en componentes tóxicos (Islam & Huda, Reshaping WEEE management in Australia: An investigation on the untapped WEEE products, 2022) pues a pesar de estas partes tienen muy medido su ciclo de vida se debe de procurar su proceso de recolección sea lo más fluido posible tratando de llegar a no tener un impacto ambiental (Meng K. , Xu, Peng, & Youcef-Toumi, 2022).

El problema de los residuos es que la mayoría de estos al terminar su ciclo de vida, en su proceso de descomposición llegan a contaminar el ambiente y a afectar las comunidades, otro ejemplo de esto es el sector del transporte en la logística, el cual se intensifica en conjunto con el crecimiento urbano del mundo. A pesar de saber que La logística es fundamental para la prosperidad económica de cualquier país, como se presencié durante la pandemia del covid-19 (Kulshreshtha & Sharma, 2022), y continúa siendo un punto fundamental en la cadena de suministros, sin embargo, este sector es uno de los mayores contribuidores con el impacto socio ambiental en la sociedad (Vikilal , y otros, 2024) con grandes emisiones de carbono (Haq, y otros, 2022) y mediante la optimización del plan de distribución para reducir al mínimo los costos de transporte, los gastos operativos y la huella de carbono (Hashmi, Jalil, & Javaid, 2022).

A mayor desarrollo urbano en un sector mayores servicios logísticos van a ser requeridos, como por ejemplo en Estambul donde más del 99% de su población vive en áreas metropolitanas, se genera una mayor demanda de transporte de mercancías (Deveci, y otros, 2022) y de la misma manera aumenta la complejidad del desarrollo de una cadena logística sostenible y la aplicación de una eficiente logística inversa.

Esto es una problemática que implica directamente a la logística inversa debido a que muchas otras sociedades a lo largo del mundo presentan un desarrollo como el de Estambul, y dicho sistema es insostenible ya que a 2020 la producción de residuos sólidos llegó a 1.300 millones de toneladas cada año (Lahane, Kant, & Shankar, 2020) y continua en aumento.

En paralelo, Egipto, para 2023, generó aproximadamente de 28 millones de toneladas de residuos sólidos urbanos anuales, pero su comunidad académica ha decidido intervenir, mediante la implementación de un algoritmo genético para solucionar el problema de ubicación de centros de recuperación de material en la ciudad y tener una recolección más eficiente (Alsobky, Ahmed, Agroudy, & Araby, 2023) facilitando el trabajo de la logística inversa, y la gestión de residuos sólidos representan también una problemática gubernamental ya que requieren una gran proporción del presupuesto público y, cuando se gestionan de forma inadecuada, pueden dar lugar a problemas ambientales y sociales, y posiblemente multiplicando los modelos algorítmicos ya existentes se podría llegar a mejorar la accesibilidad al sistema (como medida de calidad de servicio), reducir el coste de inversión y la frecuencia requerida de retirada de residuos de los contenedores reduciendo las rutas (Rossit, Toutouh, & Nesmachnow, Exact and heuristic approaches for multi-objective garbage accumulation points location in real scenarios, 2020).

En Sicilia Italia, se están evaluando las posibles medidas de smartificación en la movilidad urbana, mediante modelos de conjuntos esféricos difuso (SF), lo cual ha generado como resultado un aumento de competitividad a través de una reducción de los costos comerciales y de transacción (Ghoushchi, Haghshenas, Vahabzadeh, & Guido, 2024). Puesto que el transporte urbano de mercancías requiere una gestión inteligente, se ha intentado intervenir el sector para reducir la mayor parte de los problemas como la congestión del tráfico con los vehículos terrestres, la reducción del consumo de energías y el manejo de sus consecuencias. Actualmente, el transporte

urbano de mercancías enfrenta un reto que son los servicios post venta, donde el número de trayectos por solicitudes de devolución o de recolección aumentan mientras continúan prestando del servicio la entrega de mercancías última milla en tiempo record (Deveci, y otros, 2022), impulsado por la compras en línea de los consumidores, por otro lado, estas tendencias de consumo impulsados por las redes sociales y picos de devoluciones, han logrado ser pronosticados y medidos mediante diversos factores en base a El análisis del mapa de importancia-rendimiento (IPMA) (Kulshreshtha & Sharma, 2022)

Esta fase conductual de los consumidores incluso es ilustrada entre la fase de introducción del ciclo de vida de un producto pues estos pueden ser una tendencia en el mercado y ser susceptible a una gran cantidad de devoluciones, la empresa debe tener bien establecida su política interna sobre las devoluciones para todos los productos ofrecidos. De hecho, informes recientes muestran que el 66% de los consumidores verifican la política de devolución antes de comprar y que el 92% de los consumidores repetirían la compra al mismo minorista si el proceso de devolución es fácil, hoy en día la mayoría de los consumidores priorizan una política relajada de devoluciones favorable al cliente, como la posibilidad de devolución de dinero y devoluciones gratuitas; por lo que a empresas minoritas no son perspectivas favorables ya que muy pocos cuentan con políticas internas tan amplias al consumidor (Serravalle, Vannucci, & Pantano, 2022).

El manejo de productos devueltos es una tarea compleja que implica numerosas decisiones que dependen de la calidad del producto devuelto. Dependiendo del resultado de las evaluaciones de calidad, se pueden emplear diversas estrategias de las 6Rs de la logística inversa (Bhattacharya, Govindan, Dastidar , & Sharma, 2024) pero, según el artículo “A global review of consumer behavior towards e-waste and implications for the circular economy”, en Estados Unidos, que los

consumidores no estaban dispuestos a transferir los desechos a instalaciones de reciclaje adecuadas a menos que fueran productos que ellos devolvieran por garantía, debido a que no recibirían una compensación monetaria o algún tipo de bono de compra, lo cual tienen implicaciones negativas al no manejar con precisión la eliminación de cada uno de los componentes de los productos que ya están al final de su vida útil, debido a su conocimiento limitado sobre la toxicidad de los desechos, principalmente electrónicos u automovilísticos, por lo que a menudo genera barreras para la adopción de productos respetuosos con el medio ambiente y de tecnología más avanzada (Islam, y otros, 2021).

La reutilización, el reacondicionamiento y la re-fabricación de productos devueltos están motivados por la necesidad de preservar el valor del producto, crear oportunidades de ingresos, permitir la reventa del producto “similar a uno nuevo” en el mismo mercado o en mercados secundarios y promover el desarrollo sostenible; El reciclaje, por otro lado, facilita la recuperación de materias primas y componentes de productos usados, lo que da como resultado la disponibilidad de más materias primas y piezas, y la consiguiente realización de ahorros de costos (Bhattacharya, Govindan, Dastidar, & Sharma, 2024).

El direccionamiento de las futuras investigaciones y desarrollo de un marco económico circular está centrado en este momento en el consumidor y la recuperación de materiales valiosos (Islam, y otros, 2021).

En 2019 se generaron 54 millones de toneladas de desechos electrónicos, el cual, menos del 18 % fue recuperado a través de las entidades legales autorizadas para el tratamiento de estos dispositivos (Pollard, y otros, 2023), por estos volúmenes tan bajos de recuperación se ha exigido a los fabricantes hacer una revisión técnica de los productos para que estos puedan ser propiamente eliminados o recuperados según se tenga planeado el ciclo de vida de un producto, esto también

puede ayudar a facilitar el proceso de clasificación y re-fabricación en su estado de post consumo de esta manera adquirir un ciclo de vida circular.

Un caso similar a este es el área de los productos mecatrónicos, en los cuales encontramos desde sistemas de cómputo como DVD hasta subsistemas complejos de aviones o maquinaria de construcción. Estos sistemas al tener partes con materiales altamente valiosas, complejos y poco reemplazables, se requiere que toda la maquinaria tenga una construcción circular (Chouinard , Pigosso , McAloone , Baron , & Achiche, 2019). Muchos de estos importantes componentes de ingeniería o construcción (Chen & Hammad, 2022) sometidos rutinariamente a duras condiciones como calor intenso, ciclo térmico rápido, sobrecarga, contactos dinámicos, alto impacto, vibraciones, fatiga, fricción, erosión, etc. Por lo tanto, numerosos componentes de ingeniería y maquinaria se dañan y pierden su funcionamiento cada año debido a rayones, peladuras, grietas y picaduras, fracturas parciales, corrosión y pierden su funcionamiento (Kanishka & Acherjee, 2023) Sin embargo, desechar los componentes o la maquinaria una vez que están dañados no es una medida sensata, ya que muchos de ellos se pueden restaurar [11], y restaurarlos generalmente permite una extensión de su vida útil.

En Australia, el Plan Nacional de Reciclaje de Televisores y Computadoras (NTCRS) considera como desechos electrónicos únicamente los televisores, computadoras, impresoras y periféricos de TI usados, donde en 2014 la generación de desechos electrónicos per cápita fue de 33 kg/persona en Australia, casi 1,7 veces mayor que la generación de desechos electrónicos per cápita en los estados miembros de la Unión Europea para el mismo año (Islam & Huda, Reshaping WEEE management in Australia: An investigation on the untapped WEEE products, 2022).

la generación global de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) alcanzó los 44,7 millones de toneladas métricas (Mt) en el año 2016, para 2021 alcanzo aproximadamente las

52,2 Mt (Islam & Huda, Reshaping WEEE management in Australia: An investigation on the untapped WEEE products, 2022).

Países que tienen un proceso más complejo en la de gestión de desechos electrónicos son India y Nigeria, debido a los altos volúmenes de importación ilegal de estos artículos, o como en china donde el sector informal tiene una mayor cobertura de recolección que los puntos de reciclaje regulados (Islam & Huda, Reshaping WEEE management in Australia: An investigation on the untapped WEEE products, 2022), el problema con la recolección informal y los puntos de reciclaje y de los electrodomésticos que ya cumplieron su ciclo de vida, es cantidad significativa de elementos tóxicos que se empiezan a generar y a soltar en el ambiente, los cuales terminan afectando la salud de a las personas que manejan los desechos sin las medidas de precaución adecuadas, algunos de estas toxinas son, el plomo (Pb), cadmio (Cd), mercurio (Hg), bifenilos policlorados (PCB) y retardantes de llama bromados (Islam & Huda, Reshaping WEEE management in Australia: An investigation on the untapped WEEE products, 2022).

Debido al creciente volumen de residuos electrónicos y la complejidad de su gestión, muchas empresas están optando por externalizar sus actividades de logística inversa a proveedores especializados (3PRLP) (Zarbakhshnia, Soleimani, & Ghaderi, 2018). Esto ha llevado al desarrollo de nuevos modelos integrados basados en principios de sostenibilidad para seleccionar socios eficientes en la configuración de redes de logística inversa (Kafa, Hani, & Mhamedi, 2015)

En china, los puntos de reciclaje legal, en 2023 procesaron 2.74 toneladas de residuos electrónicos, en comparación con los centros de reciclaje ilegales, los cuales se estima que llegan a procesar hasta 19.5 toneladas de estos desechos electrónicos, lo cual complica la tarea de adquisición de las empresas que desean utilizar materiales reciclados debido a esta informalidad lo cual convierte a los proveedores formales en inconsistentes con la cantidad y volúmenes

ofertados (Ni, Zhang, Hao, & Liu, 2024). Pero, como en el caso del sector automovilístico que paso de recolectar el 70% al casi 90% para el 2023 únicamente aumentando su red de centro de reciclaje legales, provoco que la confianza de los consumidores incrementara y acudieran a ellos y no al sector informal; esto podría ser implementado en el sector de los electrodomésticos (Xia, Chen, Milisavljevic-Syed, & Salonitis, 2024).

Unión Europea ha establecido un marco normativo integral para la gestión de pilas, acumuladores y residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Estas directivas exigen que los países miembros implementen sistemas eficaces para la recolección, disposición y recuperación ambientalmente responsable de estos productos una vez que llegan al final de su vida útil o uso. El objetivo es maximizar el aprovechamiento de los materiales valiosos que contienen, promoviendo su reutilización, reacondicionamiento, remanufactura o reciclaje (Bhattacharya, Govindan, Dastidar , & Sharma, 2024).

Existen diferentes posibilidades para tratar el final de la vida útil de los electrodomésticos, cada una con impactos positivos y negativos en las 3 esferas del desarrollo sostenible. El procesamiento del final de la vida útil incluye 4 pasos principales: descontaminación, desmontaje de piezas reutilizadas o remanufacturadas, desmantelamiento de la carcasa restante, recuperación y valorización de materiales y/o vertido (Mascle, Baptiste, Beuve, & Camelot, 2015).

Otro Estimulante a la adopción de la logística inversa con los electrodomésticos es el avance acelerado de la tecnología ha provocado una reducción significativa en los ciclos de vida de los dispositivos electrónicos de consumo, como teléfonos móviles, computadoras portátiles, tabletas y dispositivos portátiles. Esta tendencia ha resultado en una creciente necesidad de reemplazo y eliminación de estos productos, superando a otros sectores (Tang, Zhou, & Warkentin, 2022).

En respuesta a esta situación, ha surgido un nuevo modelo de negocio conocido como Cliente a Empresa (C2B), que contrasta con el tradicional modelo de Empresa a Cliente (B2C) en el comercio electrónico. En el modelo C2B, los consumidores venden sus dispositivos antiguos a las empresas a un precio justo, fomentando la reutilización y el reciclaje (Tang, Zhou, & Warkentin, 2022).

4.4.Marco sostenible:

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), adoptados por la ONU en 2015, son un conjunto de 17 metas globales que buscan erradicar la pobreza, proteger el medio ambiente y promover la paz y prosperidad para todos antes del 2030 y se hace énfasis en apoyar a las poblaciones más vulnerables.

Ilustración 8: Objetivos de desarrollo sostenible globales



Fuente: (United Nations Development Program, 2015)

De los objetivos a desarrollar en este proyecto de investigación encontramos los siguientes:

3 ODS. Salud y bienestar: el e-waste y la logística inversa influyen al prevenir riesgos para la salud asociados con la mala gestión de residuos electrónicos; estos desechos contienen sustancias tóxicas, como plomo y mercurio, que pueden causar enfermedades respiratorias, neurológicas y crónicas si no se gestionan adecuadamente para las comunidades cercanas. La logística inversa garantiza el manejo seguro de estos residuos, evitando la exposición de las personas a contaminantes peligrosos y al formalizar la gestión del e-waste, se reducen las desigualdades sociales, ya que muchas personas en países en desarrollo trabajan en condiciones peligrosas reciclando residuos electrónicos.

6 ODS. Agua limpia y saneamiento: una logística inversa efectiva ayuda a recolectar, procesar y reciclar correctamente el e-waste, evitando que los contaminantes lleguen a cuerpos de agua, al prevenir esta contaminación, se mejora la calidad del agua potable y se protege la seguridad hídrica, particularmente en comunidades vulnerables que ya carecen de acceso adecuado a agua limpia. Además, al recuperar y reutilizar materiales, se disminuye la necesidad de actividades mineras y de fabricación intensivas en recursos, que también son grandes fuentes de contaminación hídrica por lo que su correcta gestión es clave para garantizar agua limpia y segura.

8 ODS. Trabajo decente y crecimiento económico, el área de la logística inversa y el E-waste produce una alta cantidad de trabajo informal y no regulado, las empresas al exigir que los proveedores de materiales de segunda vida sea procedentes de recolectores y empresas de procesamiento formales, estos residuos impulsaran el crecimiento económico sostenible al aumentar la productividad y fomentar la innovación tecnológica en procesos de recuperación de materiales, y adicionalmente permite que este sector logre avanzar en su regulación y seguridad que las personas dedicadas a estas actividades aumenten su calidad de trabajo y de vida beneficiando el crecimiento económico de sus familias y comunidades.

9 ODS. Industria, innovación e infraestructura, el conjunto de la implementación de inteligencias artificiales en la logística inversa del e-waste, impulsa la creación de industrias sostenibles y tecnológicas, fomentando la innovación en todas las actividades de la logística inversa y la ingeniería de los electrodomésticos. La IA impulsa la creación de industrias sostenibles y tecnológicas, tanto en el procesamiento de big data, análisis de información, pronóstico de tendencias y toma de decisiones fomenta una infraestructura física y tecnológica capaz de soportar los cambios por la oferta y la demanda.

11 ODS. Ciudades y comunidades sostenibles: promueve una gestión urbana eficiente y con responsabilidad ambiental. Para evitar que por el mal manejo del e-waste genera residuos peligrosos que afectan la salud pública, especialmente en áreas marginales, la implementación de herramientas tecnológicas como las inteligencias artificiales fortalece logística inversa la cual tienen como objetivo ayudar a reducir la acumulación de e-waste en las disminuyendo la contaminación y mejorando la calidad de vida urbana. La IA fomentan el desarrollo de nuevas industrias verdes que impulsan la creación de empleos sostenibles formales en las ciudades y comunidades.

12 ODS. Producción y consumo responsable: la logística inversa promueve los sistemas de producción y economías circulares, y la logística inversa es el vehículo para alcanzar el objetivo de un consumo responsable e incita a las empresas a una producción sostenible, además, la IA puede ayudar a las empresas a predecir la demanda, minimizando el exceso de producción y el desperdicio de recursos y la implementación de ingeniería ambientalmente responsable.

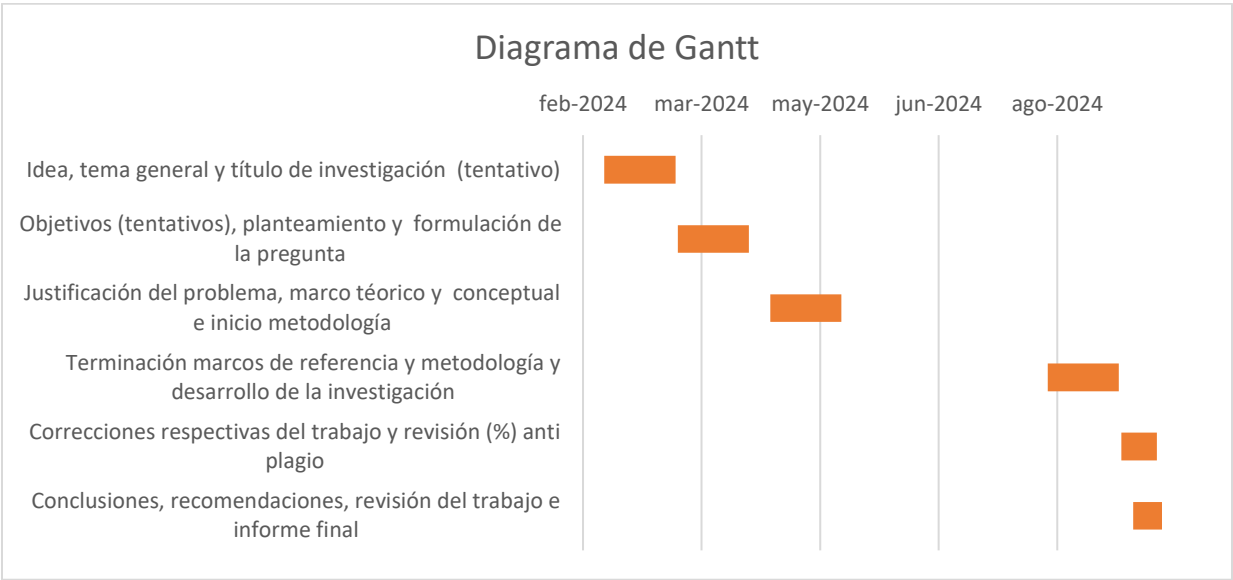
14 ODS. Vida submarina: ya conocemos los peligros de una deficiente gestión del e-waste que puede llegar a producir diversos agentes tóxicos como el mercurio o el plomo, que contaminan el medio ambiente, las fuentes hídricas y los mares, y las ciudades costeras también deben ser

plenamente conscientes que la realización de planes estratégicos de logística inversa para el e-waste son alta mente necesarios para evitar que estos desechos terminen, ya sea el e-waste de origen de las ciudades costeras como de las partes centrales de los países, en los océanos a través de ríos y escorrentías, afectando la biodiversidad marina, los ecosistemas costeros y mitigando la contaminación.

4.5.Marco temporal

El tiempo comprendido para el desarrollo de la presente revisión sistemática de literatura, inició en el primer semestre del presente año 2024, cursando la materia de Alternativa de Grado I y teniendo como resultado inicial la presentación del anteproyecto al docente respectivo. Posterior a ello, se finalizó el trabajo en el segundo semestre del presente año 2024, cursando la materia de Alternativa de Grado II y culminando la revisión de literatura como trabajo de grado (Ver grafica 9).

Ilustración 9: Cronograma de trabajo, diagrama de Gantt.



Fuente: Elaboración propia.

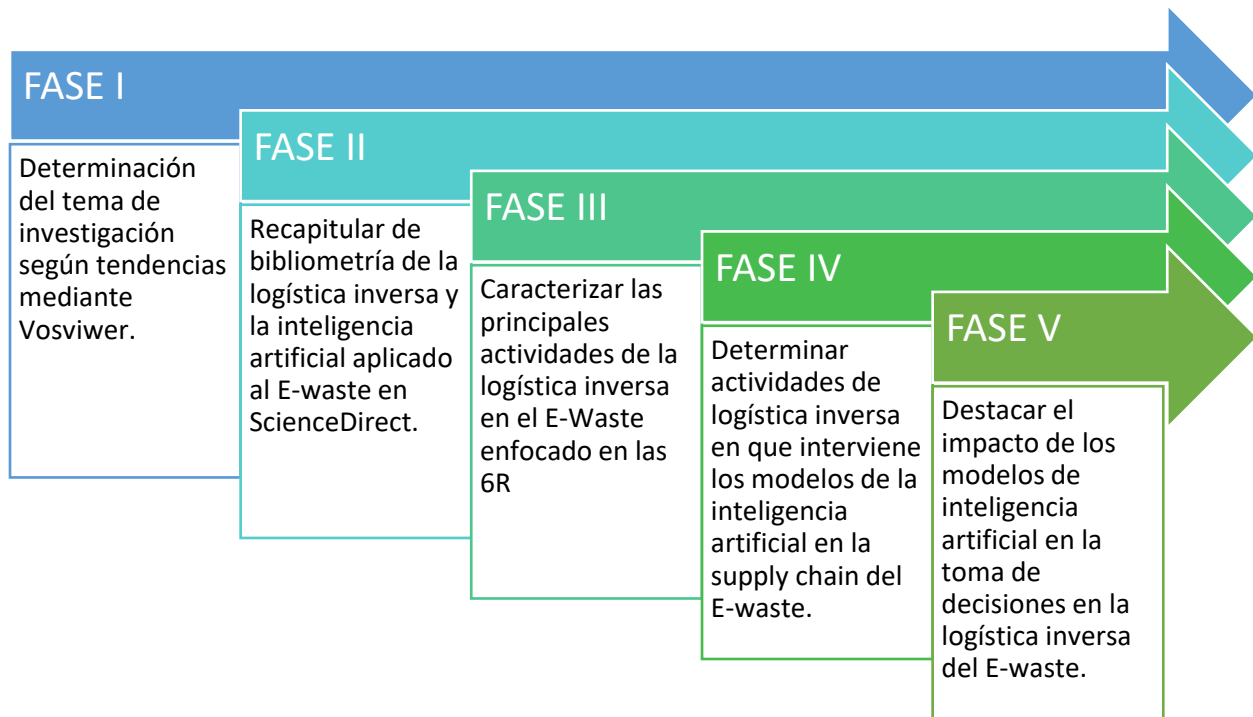
5. METODOLOGÍA

5.1.Aspectos metodológicos

Esta investigación se realiza de forma aplicada, debido a que se cuestiona cómo mediante las herramientas de la inteligencia artificial puede mejorar la eficiencia en la toma de decisiones para la mejora continua según lo revisado en las teorías de kaisen, lean manufacturing y teoría de restricciones. De tipo descriptiva con alcance correlacional, este tipo de investigación estudia la información actual de la logística inversa y la integración que ha tenido con la inteligencia artificial, como la relación entre áreas administrativas y datos cuantitativos promueven el uso de herramientas tecnológicas. Con un enfoque cuantitativo, debido a que la gran mayoría de la información presentada va a ser numérica además de teórica, y también se presentan los diferentes resultados cuantitativos que han tenido las empresas al implementar estas tecnologías.

5.2.Proceso metodológico

Ilustración 10: Fases de desarrollo de la metodología



Fuente: Elaboración propia.

Fase 1:

Determinación del tema de investigación mediante el uso de la herramienta Vosviwer, se pretende buscar información general sobre la logística inversa para focalizar la revisión de literatura según tendencias para el proyecto de investigación.

Fase 2:

Recapitulación de bibliometría de la logística inversa y la inteligencia artificial aplicado al E-waste dentro de la base de datos de la universidad Piloto ScienceDirect, para justificar y respaldar la importancia de la implementación de las herramientas tecnológicas como la

inteligencia artificial en la logística inversa e identificar su alcance en integración dentro de sus procesos de ejecución.

Fase 3:

Caracterizar las principales actividades de la logística inversa que se utilizan en el E-Waste enfocado en las 6R de la logística inversa, con la finalidad de identificar las diferentes técnicas de procesamiento dentro de la logística inversa y como se aplica cada una al E-waste.

Fase 4:

Determinar las principales actividades de logística inversa en la que interviene los modelos de la inteligencia artificial en la supply chain del E-waste. Para revisar un horizonte mayor sobre el e-waste dentro de la cadena de suministros y comprender los flujos de información y flujos físicos en los cuales podemos encontrar la logística inversa de estos desechos en los que se pueden aplicar modelos de IA.

Fase 5:

Destacar el impacto de los modelos de inteligencia artificial en la toma de decisiones en la logística inversa del E-waste. Con la información anteriormente revisada podemos destacar que estrategias podemos usar en la toma de decisiones con las herramientas tecnológicas como la IA.

5.3. Adquisición de información

La información y referencias utilizadas para la construcción del proyecto de investigación se utilizaron las siguientes fuentes secundarias que están compuestas principalmente por la base de datos de ScienceDirect y de Google Academic y libros físicos, implementado la información

inicial para la revisión bibliográfica del objeto de investigación, el segundo y tercero para aspecto teóricos y conceptuales donde se desea sustentar la investigación.

Tabla 2: Adquisición de información secundaria

Adquisición de información	
Tipo	Cantidad
ScienceDirect	91
Google Academic	10
Libros Fisicos	5

Fuente: Elaboración propia

6. DESARROLLO DE FASES

6.1.Fase 1: Determinación del tema de investigación

La llave de búsqueda de esta investigación finaliza siendo la indicada en la tabla 3 según la explicación a continuación:

Tabla 3: Ecuación de búsqueda final

Ecuación de búsqueda
(TITLE-ABS-KEY (Reverse logistic) AND TITLE-ABS-KEY (artificial intelligence) OR TITLE-ABS-KEY (E-waste) OR LIMIT-TO (2014-2024)

Fuente: Elaboración propia con base en información revisada

Para el planteamiento de la oportunidad de la investigación se utilizó la herramienta VosViwer, para reconocer un tema novedoso relacionado y con gran proximidad a la logística inversa, pues es el principal objeto de investigación. Por lo cual para ampliar nuestro objeto de investigación y enfocarlo se desarrollaron tres análisis diferentes.

Inicialmente se obtuvo el siguiente mapa co-ocurrencia, donde logramos visualizar a la logística inversa como el foco mayor en azul, seguida por la temática del desarrollo sostenible en amarillo, optimización y redes de valor en verde, economía y efectos sociales en morado, y reciclado administración de los desperdicios e inteligencia artificial en rojo.

Ilustración 11: Mapeo de red de co-ocurrencia en la herramienta bibliográfica VosViewer

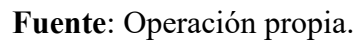
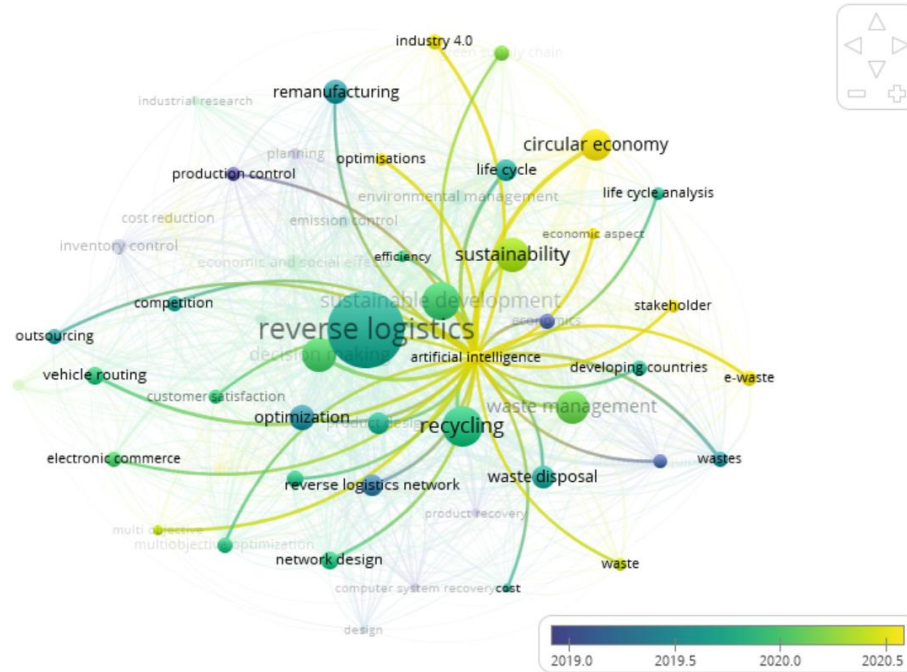


Ilustración 12: Mapeo de red de superposición temporal en la herramienta bibliográfica

61



Fuente: Operación propia.

Adicionalmente, se percibe que el tamaño esférico pequeño de este tema de investigación nos indica que el volumen de investigaciones aún no es masivo y que próximamente va a ser un tema de conversación dentro de la logística de retorno. Adicionalmente para complementar la investigación se amplía el campo de la investigación no solo a los procesos dentro de la logística inversa sino también a la aplicación de esta en la cadena de suministros y los colaboradores (stakeholders), y resaltando como segundo objeto de investigación al E-waste, pues es el elemento material y relacionado a el consumo más contemporáneo.

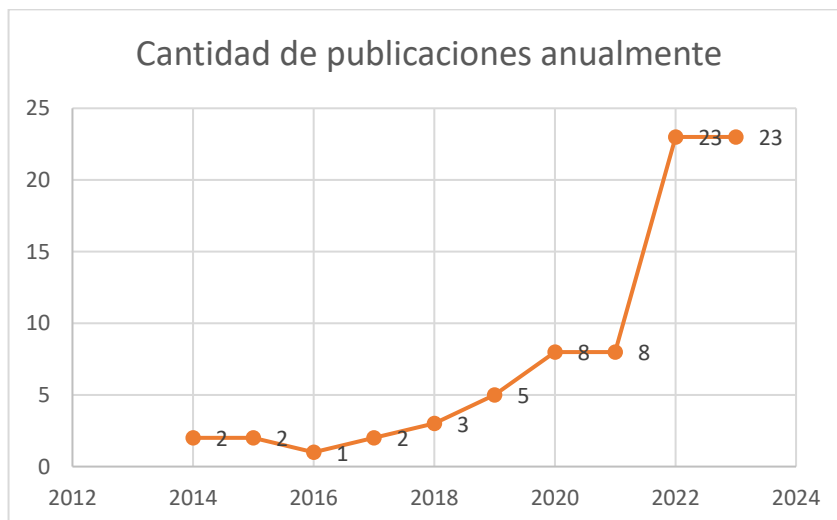
De esta forma se adquiere el mapa final con la bibliometría del proyecto de investigación, con un enfoque más segmentado, que nos releva las áreas más relevantes a profundizar.

6.2.Fase 2: Recapitulación de bibliometría de la logística inversa y la inteligencia artificial en ScienceDirect:

Con el objetivo de analizar las tendencias de publicaciones bibliográficas de las temáticas se obtuvieron las siguientes graficas con la información cuantitativa disponible dentro de la base de datos de ScienceDirect creando las siguientes graficas que miden la producción e ilustran los patrones de publicación contenida en diferentes tipos de documentos científicos y académicos.

En la gráfica número 13 “Cantidad de publicaciones anualmente”, podemos determinar que durante los años del 2014 al 2024 se haba estado publicando un muy bajo volumen de documentos investigativos relacionados con la logística inversa y la inteligencia artificial; hasta el 2022, la tendencia de publicaciones casi se triplica en comparación al año anterior 2021, y su volumen es contante en el 2023. Esto indica que la relevancia y su difusión ha sido mayor en los últimos años gracias a los avances tecnológicos que lograron ser visibles después de la pandemia.

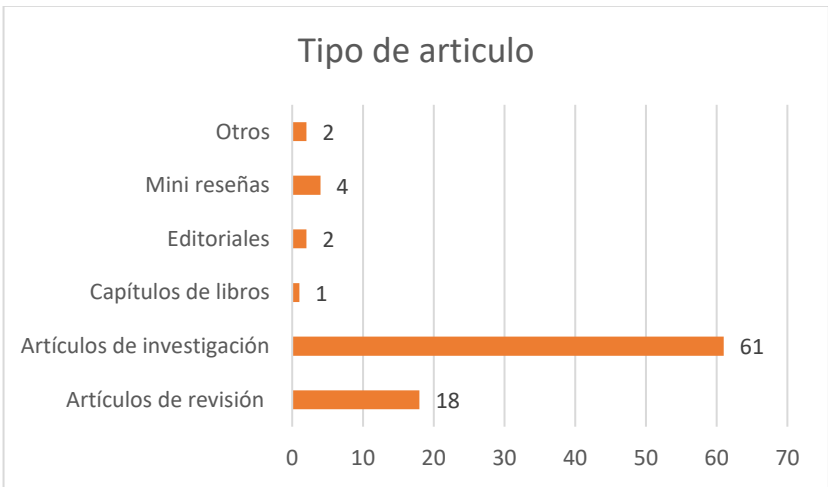
Ilustración 13: Cantidad de publicaciones anualmente



Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 14 “Tipo de artículo” podemos ver que predomina en el sector académico los artículos investigativos y los artículos de revisión, esto implica que es una temática aun en desarrollo y en prueba que está en constante investigación y revisión gracias a que en los últimos años a aumentado la relevancia del uso de las tecnologías de inteligencia artificial en la logística inversa como se representa en la gráfica anterior.

Ilustración 14: Tipo de artículo



Fuente: Elaboración propia.

Los autores repetidos con mayor número de artículos de investigación publicados en ScienceDirect son los siguientes presentados en la tabla 4.

Tabla 4: Autores con mayor número de publicaciones entre el 2014 y el 2024

Autores	Número de publicaciones
Makarova, I.; Shubenkova, K. & Pashkevich, A.	2
Yang, Y.	2

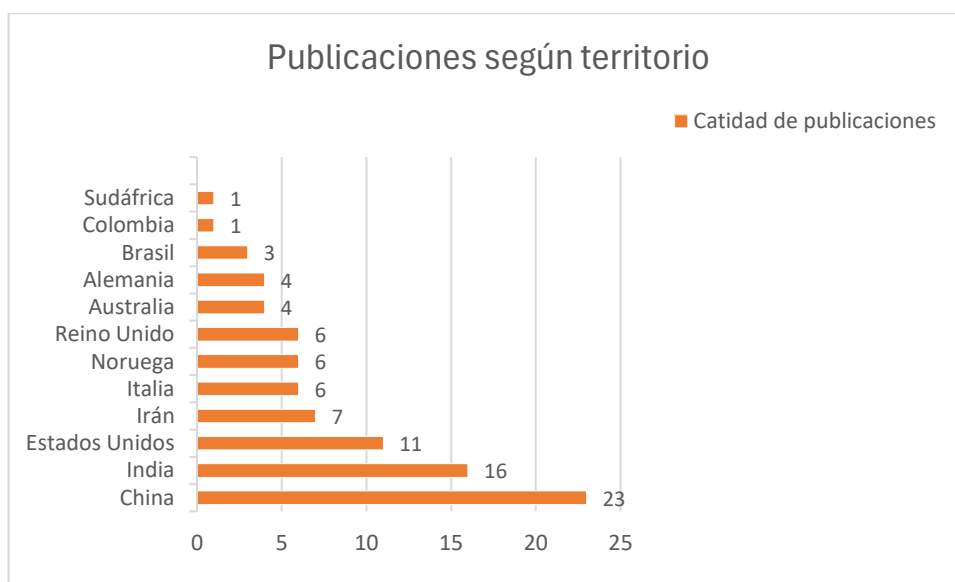
Fuente: Elaboración propia

Makarova, I.; Shubenkova, K. & Pashkevich, A., con dos publicaciones relacionadas, donde los tres estuvieron participando, el artículo con su título traducido al español “El concepto del sistema de apoyo a la decisión para planificar la logística inversa en la industria automotriz”, habla de cómo los modelos de producción deben de pasar a ser modelos lineales a convertirse en modelos circulares y que esta gestión de los sistemas debe de realizarse en cada etapa del producto o servicio comercializado, la información debe ser integral con todos los procesos de esta forma fortalecer el sistema de apoyo de toma de decisiones (Makarova, Shubenkova, & Pashkevich, The Concept of the Decision Support System to Plan the Reverse Logistics in Automotive Industry, 2018) mientras que el artículo “Mejora de la entrega de repuestos para automóviles en el contexto de la globalización de los mercados”, explica en un caso práctico el impacto que ocasiona en las empresas automotoras las devoluciones de repuestos dañados y proponen un algoritmo para el apoyo de la toma de decisiones en las operaciones de predicción, planificación y coordinación de entrega de los remplazos (Makarova, Pashkevich, Shubenkova, & Lenik, 2018). En segunda instancia tenemos a Yang, Y. quien generó dos investigaciones donde se evalúa el impacto ambiental que generan los desechos tecnológicos y como mediante de la logística inversa y modelos sistemáticos de toma de decisiones puede fortalecer el proceso de recuperación y gestión (Yang & Wu, 2017), y como superar las restricciones de los límites apropiados de emisión de carbono en el área de la logística inversa (Guo, Huang, & Yang, 2015).

Adicionalmente, en la gráfica 15 “publicaciones según territorio”, vemos que la investigación del tema es liderada por principalmente por China, India y Estados Unidos, siendo estos tres los mayores productores de documentos académicos. En Latinoamérica también encontramos publicaciones que son provenientes de Brasil y Colombia, Brasil esta principalmente

enfocado en el (desarrollo de nuevas tecnologías en la logística inversa para el cumplimiento de las políticas nacionales de residuos de Brasil y que mediante estos procesos optimizados lograr potenciar la sostenibilidad de las organizaciones (Duarte Castro, y otros, 2022), formulación e implementación de simulaciones y algoritmos genéticos para promover la economía circular y optimizar la cadena de logística inversa con un objetivo ambiental (Oliveira Neto, y otros, 2023), junto con la gestión de residuos sólidos en países en vía de desarrollo, mediante la implementación de modelos circulares y proponer una responsabilidad de decisiones compartida (Silva & Moraes, 2021); y Colombia presenta como con los últimos años la cadena de suministros ha logrado una aceleración en su trazabilidad y procesos gracias a los avances tecnológicos, y como de las misma forma estas tecnologías recolectan cada vez más un volumen mayor de datos y proporciona un mayor apoyo a la toma de decisiones y presenta a la logística inversa como uno de los cuatro grupos principales de la logística, donde además también se encuentran la gestión de almacenamiento, procesos y sistemas de producción y redes de transporte (Henao-Hernández, Muñoz-Villamizar, & Solano-Charris, 2021).

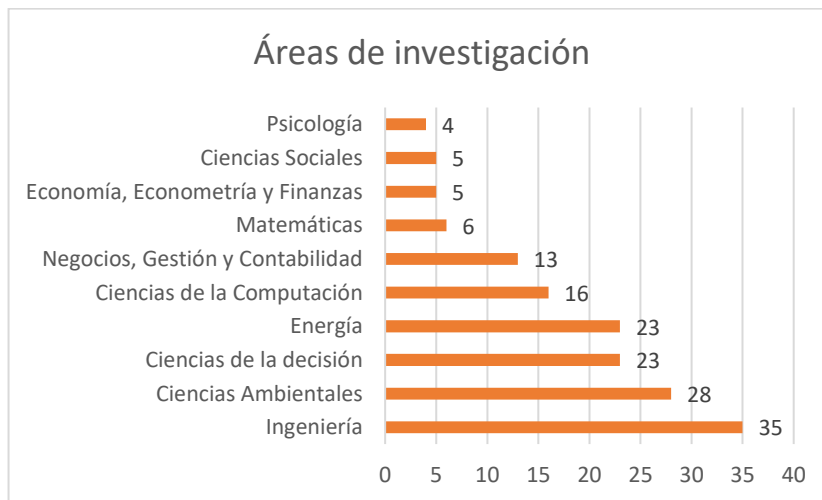
Ilustración 15: Publicaciones según territorio



Fuente: Elaboración propia.

Finalizamos con las áreas de investigación en las que podemos visualizar que las principales áreas de investigación están compuestas por, área de ingeniería, por la formulación de diferentes métodos de implementación de la inteligencias artificiales en la logística inversa, las ciencias ambientales por ser uno de los principales objetivos de la logística inversa, las ciencias de la decisión, pues dependiendo de esto los procesos pueden ser agilizados y alcanzar un mayor nivel de precisión y reducción de costos, energía, ya que la logística inversa también influye en cómo podemos reducir al máximo recursos como el consumo de combustibles y la optimización de tiempos de recorrido.

Ilustración 16: Áreas de investigación.



Fuente: Elaboración propia.

6.3.Fase 3: Caracterizar las principales actividades de la logística inversa que se utilizan en el E-Waste enfocado en las 6R de la logística inversa.

La logística inversa se ha convertido en un componente esencial en la gestión de residuos electrónicos (E-Waste), dado el creciente volumen de productos tecnológicos que llegan al final de su vida útil. Este enfoque no solo busca optimizar el retorno de materiales al ciclo productivo, sino también minimizar el impacto ambiental asociado con la eliminación de dispositivos electrónicos. En este contexto, las 6R de la logística inversa (reutilización, reparación, restauración, refabricación, reciclaje y eliminación) ofrecen un marco conceptual que guía las estrategias para manejar el E-Waste de manera sostenible.

A grandes rasgos la gestión de estos residuos, requieren diferentes operaciones anteriores, tales como una planificación de puntos de recolección mediante estrategias de ubicación mejorando la accesibilidad en las actividades de recolección, transporte de retorno, clasificación y procesamiento (Hashemi-Amiri, y otros, 2023) de acuerdo con el tipo de 6R más adecuado para el producto o material.

Para una ágil y correcta gestión de residuos se debe de implementar un sistema colaborativo entre diversas partes involucradas, entre ellas tales como: los gobiernos o entidades locales, organizaciones privadas y el sector público como consumidor, y mediante su colaboración diseñar e implementar un sistema de gestión adaptado a las necesidades y optimizado para la logística inversa lo cual promueva beneficios económicos, sociales y sostenibles, esto puede tener como rendimiento un aumento en la eficacia en la tasa de reciclaje y la reducción de residuos en los vertederos (Hashemi-Amiri, y otros, 2023).

Estos sistemas colaborativos implementan modelos de optimización multi objetivos, por lo cual sus estrategias de recuperación deben ser apoyadas mediante la recolección de datos, trazabilidad y pronóstico, por lo tanto, es de suma importancia la inclusión de la tecnología inteligente en estas estrategias. Actualmente se está volviendo más popular el seguimiento y la

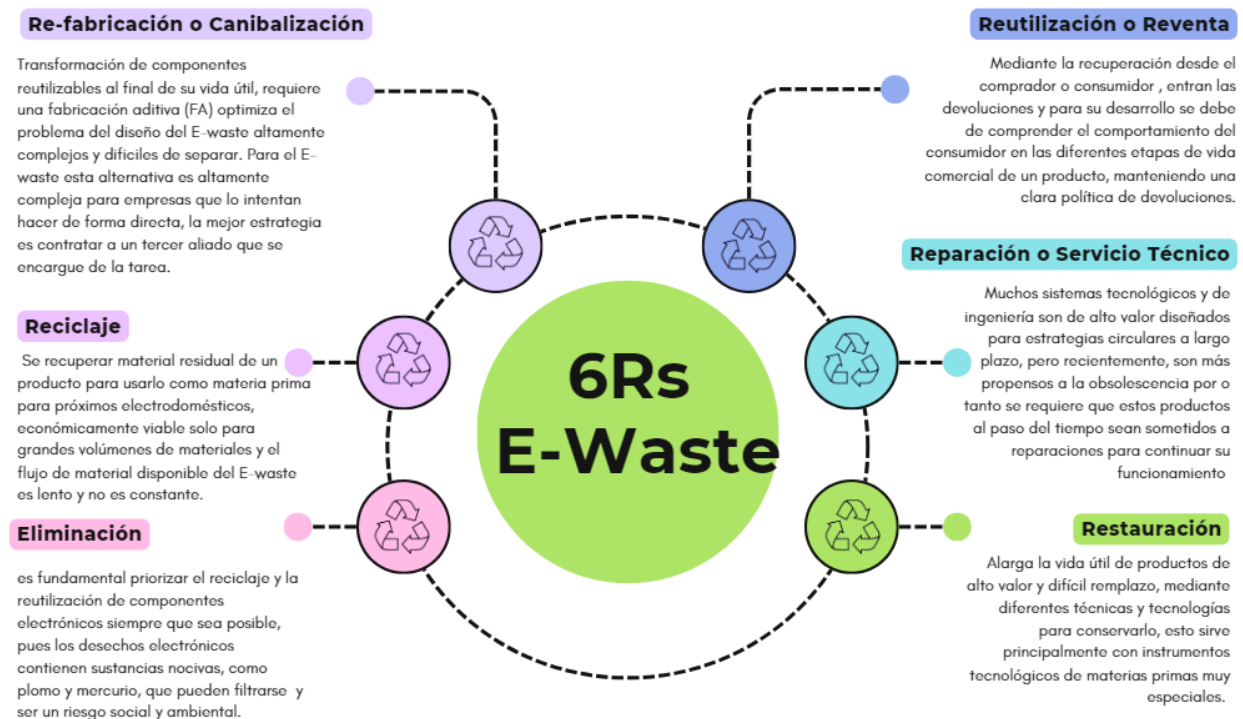
identificación de los productos electrodomésticos a lo largo de su ciclo de vida, permitiendo un monitoreo constante y trazabilidad de todos estos productos con un alto valor de retorno para las empresas y agilizar la recuperación de estos productos justo en el momento de su obsolescencia programada, gracias a esto, el flujo de material a reutilizar puede llegar a mantener un flujo constante y su recolección lograría ser controlada (Keivanpour & Kadi , 2019), reduciendo la incertidumbre en las operaciones regulares entre la oferta y la demanda de estos productos y materiales (Feitó-Cespón, Costa, Pishvaei, & Cespón-Castro, 2021).

El punto de partida de la logística inversa son los consumidores, de los cuales deben su destinación final, por lo tanto para mejorar el proceso de recuperación del E-waste, es necesario estudiar y comprender los comportamientos de los consumidores, de esta forma lograr reducir los impactos negativos ambientales y aumentar la oportunidad de una economía circular, por esta razón, diversos sistemas de gestión de residuos animan a las organizaciones a mejorar sus políticas de devolución, educación de las correctas formas de eliminación posterior al término de la vida de los electrodomésticos e innovando en los modelos de negocios circulares que puedan beneficiar al sistema (Islam, y otros, 2021).

Teniendo en cuenta que estos sistemas deben de luchar constantemente ante la comparación con los materiales vírgenes y los productos nuevos por sus bajos precios, llegan a igualar los productos de una segunda vida o retornados, haciendo que estos que provienen de una economía circular pierdan competitividad, y para que la viabilidad de estos procesos sean exitosos se presencia principalmente cuando se tratan de grandes volúmenes, lo que impone altas tasas de recuperación de e-waste que realmente por sus vidas extensas tienen un bajo retorno a la cadena de suministros (Karali & Shah, 2022).

Entre los residuos como el e-waste, se pueden clasificar entre dos categorías dentro de la logística inversa, el primero son los residuos pre-consumo que son generados durante los procesos de fabricación y son fáciles de reciclar y posteriormente eliminar, y en segundo lugar, están los residuos post-consumo, estos plantean mayores desafíos pues requieren de procesos adicionales como la recolección, clasificación, separación y reciclaje (Majumdar, Ali , Agrawal, & Srivastava, 2022), son para estos residuos que se desarrollan a profundidad las 6R de la logística inversa las cuales estaremos revisando en la siguiente imagen:

Ilustración 17: 6Rs E-Waste,



Fuente: Elaboración propia

Entre las técnicas de las 6R de la logística inversa, evidenciamos como el e-waste puede ser procesado por cualquiera de ellas, de esto depende principalmente el estado de los materiales y su valor comercial.

En el caso de la reutilización o reventa encontramos tanto las opciones que tiene el consumidor final como los procesos de devolución por garantía, inconformidad o tendencias en el mercado (etapas de vida de un producto), en este caso el comerciante debe de tener muy claras y definidas sus políticas y procesos internos para la recuperación y cambio o reembolso. Durante la toma de decisión de compra efectiva, se encuentra que el 66% de los compradores en línea finalizan su compra después de verificar las políticas de devoluciones de la empresa, y que el 92% de los compradores finales que tuvieron que hacer una devolución, repetirían su compra en la empresa después de experimentar un proceso de devolución satisfactorio y fácil (Serravalle, Vannucci, & Pantano, 2022).

Para afrontar la última milla de productos devueltos se encuentra tres oportunidades de mejora que consisten en: “la digitalización de la logística en un modelo circular para optimizar el seguimiento principalmente para las operaciones de última milla, también, mayor inversión en el desarrollo de vehículos sostenibles y flexibles que permitan agilizar estos recorridos, y finalmente, la opción de automatizar las operación de la última milla” (Bachofner, Lemardelé, Estrada, & Pagès, 2022), la primera oportunidad de mejora puede ser posible usando sistemas de enrutamiento para todos los niveles de la red de suministro, un algoritmo compuesto por multiniveles que sea analizados individualmente por sub-niveles, esto permitiría que el programa se alimente de toda la información disponible para agilizar los procesos en conjunto (Hashemi-Amiri, y otros, 2023). Existen herramientas tecnológicas flexibles multiobjetivo, que permiten la implementación en modelos sistémicos que ofrecen mayor accesibilidad, ofrecen optimización de costos y volumen de residuos recolectados dentro de las estrategias de la logística inversa, pueden llegar a ser utilizadas en un modelo E2E o de fin a fin, completando el circuito de la logística inversa y acompañando a las empresas durante estos procedimientos, un ejemplo de estos es el algoritmo

web ranking PageRank (Rossit , Toutouh, & Nesmachnow, Exact and heuristic approaches for multi-objective garbage accumulation points location in real scenarios, 2020).

En el proceso de la reparación tiene el objetivo de alargar la vida útil de un producto, acciones usualmente realizadas en EEE con alto valor, como lo son computadoras, lavadoras, neveras, etc.. en el cual el usuario final está dispuesto a pagar un servicio adicional por volver a tener su electrodoméstico en buenas condiciones y funcional, muchas empresas tecnológicas ofrecen este servicio ya que a pesar de ser un proceso post venta, de esto depende la satisfacción del consumidor y su lealtad hacia la marca y su recurrencia de compra.

La restauración difiere del servicio técnico del que hablamos anteriormente, ya que usualmente se implemente en equipos de alto valor y difícil remplazo como equipos de ingeniería, que no son sencillos de conseguir sus repuestos ni tampoco cuentan con un servicio técnico continuo ya sea porque el equipo fue importado desde otro país o por la antigüedad del equipo y que probablemente ya se encuentre discontinuado de la marca y el mercado.

A diferencia de los EEE los sistemas mecatrónicos son diseñados con tiempos de vida más largos que los electrodomésticos ya que usualmente estas herramientas son para trabajos pesados técnicos o para almacenar grandes volúmenes de información, por lo que su valor en el mercado son más altos y de difícil adquisición por lo tanto se ha decidido que estos dispositivos sean diseñados a partir de estrategias de vida circulares a largo plazo, para satisfacer tanto a las industrias que adquieren los equipos con también para cumplir las normas de seguridad establecidas para cada país (Chouinard , Pigosso , McAloone , Baron , & Achiche, 2019), siendo positivo de muchos aspectos ya que son estrategias más sostenibles ambiental y económicamente pero al mismo tiempo en el momento en el que una herramienta de estas se destina a ser desechada, todas sus partes son aprovechadas desde partes como respuestas completas como la Re fabricación

de nuevos equipos a partir del material de segunda vida que ya no puede volver a utilizarse para su objetivo inicial.

Un ejemplo con las baterías de litio de los vehículos, las cuales tienen su ciclo de vida medido para su rápida recuperación y procesamiento (Meng K. , Xu, Peng, & Youcef-Toumi, 2022), pues sus materiales, son de alto valor y su vida útil es de aproximadamente 10 a 15 años, por lo tanto, se debe de garantizar su reciclaje para no tener impactos ambientales (Wesselkämper & Delft, 2024).

Una de las técnicas más estudiadas en las 6Rs de la logística inversa es la re-fabricación, la cual depende de muchos procesos como la recolección de datos y procesamiento información, la medición y trazabilidad del ciclo de vida de los productos y comunicación entre los stakeholder de la cadena de suministros (Mejía-Moncayo, Kenné, & Hof, 2023), y procesos más técnicos como la clasificación y separación de materiales de alto valor, y separación para su eliminación (Beducci, Acerbi, Pinzone, & Taisch, 2024)

Dentro de los sistemas para la re-fabricación existen grandes complicaciones ya que estos sistemas son impulsados por la necesidad de tener una mayor adaptabilidad a las particularidades de los materiales recuperados y las implicaciones de usarlos (Teixeira, Tjahjono, Beltran, & Julião, 2022), esta práctica se ha convertido en un elemento esencial para los sectores con el uso eficiente de los recursos, este concepto se conoce como fabricación adaptativa, refiriéndose a los materiales disponibles. Las problemáticas de aplicar este sistema de re-fabricación en el e-waste encierran: al diseño de los productos (para poder utilizar partes en buen estado de diferentes electrodomésticos) e ingeniería, optimización de procesos, inspecciones de calidad y desarrollo de modelos comerciales que promuevan los artículos sostenibles (Kanishka & Acherjee, 2023) los cual requiere de una amplia planificación y diseño.

A pesar de eso, no es la más eficiente por su alta complejidad de ejecución de forma directa. Se detecta que el 30% de los hogares prefieren vender sus EEE como desechos a recolectores de chatarra informales o tirarlos directamente junto a los desechos orgánicos que tener que gastar tiempo en ir a puntos de recolección formales a entregar sus dispositivos por la distancia, la falta de remuneración o en varios casos el desconocimiento de estos mismos puntos formales de recolección (Islam, y otros, 2021).

Con respecto al reciclaje, Su principal objetivo es recuperar los materiales residuales del e-waste, para usarlos como materia prima para próximos electrodomésticos, pero realmente solo es económicamente viable para grandes volúmenes de materiales y tenemos la problemática que limita este flujo de reciclaje por la durabilidad de estos productos y que su recuperación no es constante, la alternativa más ágil y eficaz, tanto para el reciclaje como para la re-fabricación, es la contratación con terceros y dejar las tareas de logística inversa y procesamiento sostenible, como la recolección, separación, clasificación y reprocesamiento para volver el e-waste en materias primas nuevamente con el objetivo de satisfacer las necesidades específicas de cada organización aliada.

En los EEE la principal alternativa de recolección de estos desechos domésticos es una correcta separación y la disposición de los mismo en centros de tratamiento formales, pero es un modelo que se basa en la conciencia ambiental de cada hogar y que comúnmente se ve afectado por fraude y manipulación debido a sus altos procesos manuales y los bajos niveles de control y clasificación según su calidad. (Scott, Neto, & Pinheiro, 2023)

Enfocándonos en la optimización de los procesos de recolección, separación y clasificación, se podría lograr, según Karaly y Shah que “los materiales de una segunda vida cubran entre el 37% al 91% de la demanda en las materias primas para 2050 en las tecnologías bajas en

carbón” (Bolstering supplies of critical raw materials for low-carbon technologies through circular economy strategies, 2022).

Y por último, el proceso de eliminación el cual es altamente controlado por las diferentes sustancias químicas que contienen estos productos los cuales sin su debido tratamiento llegan a desprender sustancias nocivas como el plomo o el mercurio que pueden llegar a filtrarse en el suelo y llegar ser un riesgo social y ambiental, estos tratamientos no son usualmente realizados por los centros de reciclaje informales razón por la cual no es recomendable hacer la disposición del E-waste con ellos, ya que pueden contribuir con materias de alto valor para las organizaciones pero no completan de forma satisfactoria el ciclo de tratamiento de los productos.

6.4.Fase 4: Determinar las principales actividades de logística inversa en la que interviene los modelos de la inteligencia artificial en la supply chain del E-waste.

Es necesario que dentro de la Supply Chain de los EEE se creen estrategias de logística inversa y estas pueden ser apoyadas con la implementación de machine learning y diferentes SW de inteligencias artificiales con el objetivo de optimizar y solucionar problemas objetivos específicos (Xia, Chen, Milisavljevic-Syed, & Saloniitis, 2024). Una planificación sistemática multi objetivo podría ser como los métodos AHP y TOSIS que propone Kafa, Hani y Mhamedi, que proponen una planificación óptima de costo, tiempos, calidad y evaluación ambiental dentro de la logística inversa (An integrated sustainable partner selection approach with closed-loop supply chain network configuration, 2015)

Para sistemas que funcionan como circuitos, como la economía circular, es necesario tener una trazabilidad en la SC, pues es un elemento clave para reducir, agilizar y cerrar los ciclos sostenibles

de los recursos, estos sistemas afectan los procesos de fabricación, donde los flujos de información son igual de importantes de que los flujos de materiales, pues en las actividades y procesos de la logística inversa que contienen una gran incertidumbre su estabilidad depende del control de riesgos y manejo que se dé dentro de la mayor cantidad de stakeholders en la cadena de suministros (Massari, Nacchiero, & Giannoccaro, 2023), por esa razón es recomendable tener socios para tercerizar (3PRPL) los procesos operativos claves de la logística inversa (Zarbakhshnia, Soleimani, & Ghaderi, 2018), y su papel es fundamental debido a que presentan servicios de clasificación e información técnica de los materiales de segunda vida suministrado (Bajgani, Saberi, & Toyasaki, 2023).

Hoy en día se está hablando de redes de suministros virtuales, se trata de SC mucho más complejas que se pueden encontrar en industrias como la manufactura y se considera que un planificación y estructuración previa ofrece un valor competitivo, en donde se encuentra como prioridad la comunicación entre nodos, los sistemas inteligentes, el flujo del tiempo y el flujo de materia (Long, 2024).

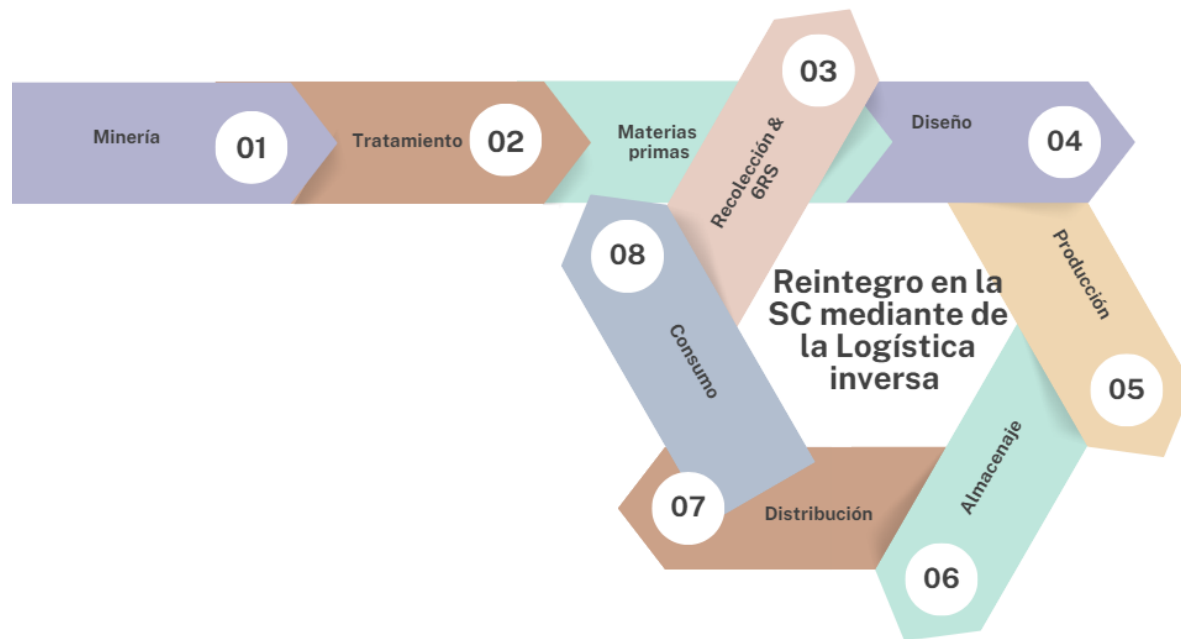
La integración de tecnología en la cadena de suministro es necesaria, a pesar de los complejos sistemas operativos y flujos, los cuales presentan una alta complejidad para integrar y hacerlos sensibles al tiempo real e integración a gran escala para aumentar la automatización dentro de la SC y la trazabilidad (Simonetto, Sgarboss, Battini, & Govindan, 2022). Por ejemplo, el software de inteligencia artificial DEA o Data Enveloping Analysis, ayuda con la selección de proveedores, además de examinar criterios de gestión y operativos, le dan una alta valoración a sus procesos sostenibles y conciencia medio ambiental; que es altamente decisivo pues esto puede significar una ventaja competitiva en el mercado (Dobos & Vörösmarty, 2019).

La incertidumbre de la logística inversa para la SC se origina por la falta de información, y un método de programación de IA para solucionar la deficiencia es a través métodos de lógica difusa y conjuntos aproximados, la evaluación de los impactos ambientales y sociales se consideran factores complejos (Zakeri , Konstantas, Bratvold, & Chatterjee, 2024). MOPSO es un sistema de cooperación para la cadena de suministros, el cual permite mediante programaciones probabilísticas analizar datos e información para el pronóstico de riesgos para mejorar el diseño de la SC (Govindan , Paam, & Abtahi, A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design, 2016).

Es importante saber cuáles son los procesos de la cadena de suministros que inicia como directa pero se convierte en una comercialización circular, lo cual podemos ver en la ilustración 18, en primer lugar tenemos la adquisición de los materiales mediante nuestros proveedores y su tratamiento para poder ser manipulados y convertidos en materias primas óptimas para su transformación, posterior va el diseño e ingeniería del producto los cuales hacen los planos del producto a vender junto a sus empaques y contenedores y eligen cada uno de los componentes del producto, para posteriormente pasar con producción el cual debe tener una medición clara de la oferta y la demanda, no solo dejarse llevar de las tendencias sociales para hacer su producción sino implementar una producción responsable y consciente medio ambientalmente evitando todos los desperdicios, continuamos con el proceso de almacenamiento del cual pasa a la distribución y consumo o devoluciones, en donde se da inicio a servicios post-compra, los cuales deben ser correctamente atendidos para no dañar las relaciones y confianza con sus consumidores y una vez el producto llega al final de su vida aplicar cualquier otra de las técnicas de las 6Rs de la logística inversa de acuerdo al estado de cada uno de los materiales, la ventaja de la implementación de una

economía circular es el la disminución de consumo de materias primas las cuales bien se sabe que para los electrodomésticos son de alto valor y están empezando a escasear.

Ilustración 18: Reintegro en la Supply Chain mediante la logística inversa



Fuente: Elaboración propia (Popa & Szabó, 2025)

Estrategias a largo plazo son necesarias como un factor de mejora continua para permitir que la producción de un artículo sea sostenible y pueden tener una recuperación post consumo que pueda ser más fácilmente reintegradas a la cadena de suministros, lo cual debe ser planeado y diseñado por ingeniería antes de lanzar el producto al mercado, y extraer el máximo valor de las materias usadas asegurando la calidad y seguridad futura y el uso de inteligencias artificiales es una gran ventaja para las empresas la cual agiliza el trabajo de los profesionales en la ingeniería. (Popa & Szabó, 2025).

Una SC puede ser centralizada o descentralizada con niveles verticales y horizontales para permitir los ciclos de información y materiales de una logística inversa, implementando algoritmos genéticos (GA) multiobjetivo con la finalidad de optimizar los tiempos de entrega e intervalos de almacenamiento en los inventarios (Huang, Chen, Chih, Chang, & Lien, 2023).

Los sistemas ciber-físicos, tienen a capacidad y mitigar los riesgos relacionados con las devoluciones de productos y mediante la integración de IA les permite tomar decisiones de acuerdo con la condición de los productos para determinar su procesamiento inverso.

Podemos entender que dentro de los flujos de producción y distribución de la cadena de suministro encontramos el ingreso inicial de las materias primas, que es la primera columna horizontal del flujo hasta llegar a los minoristas y los consumidores donde inicia el flujo de retorno como vemos en la ilustración 19, que puede ser por devoluciones o desechos de los productos usados.

Ilustración 19: flujos de la mercancía dentro de la supply chain directo e inverso

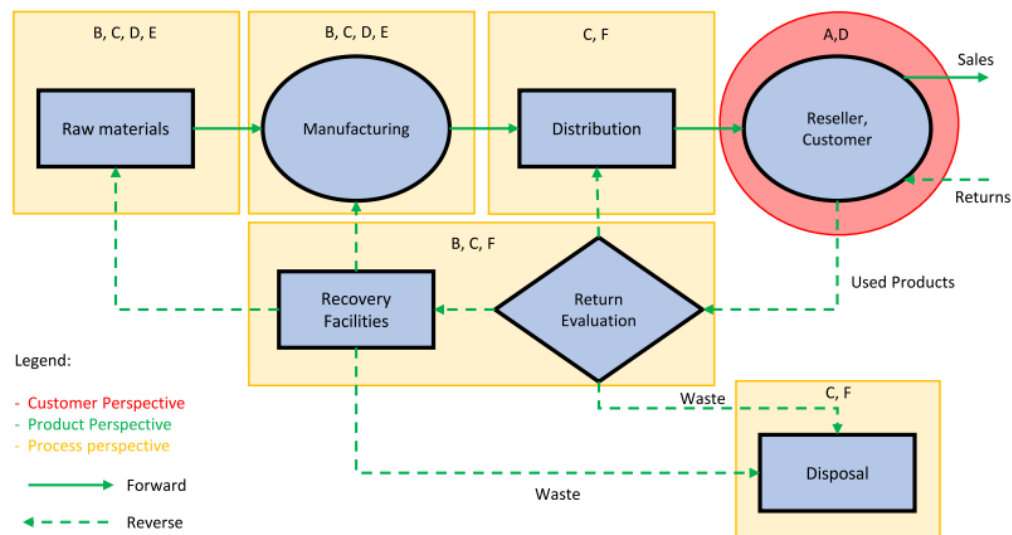


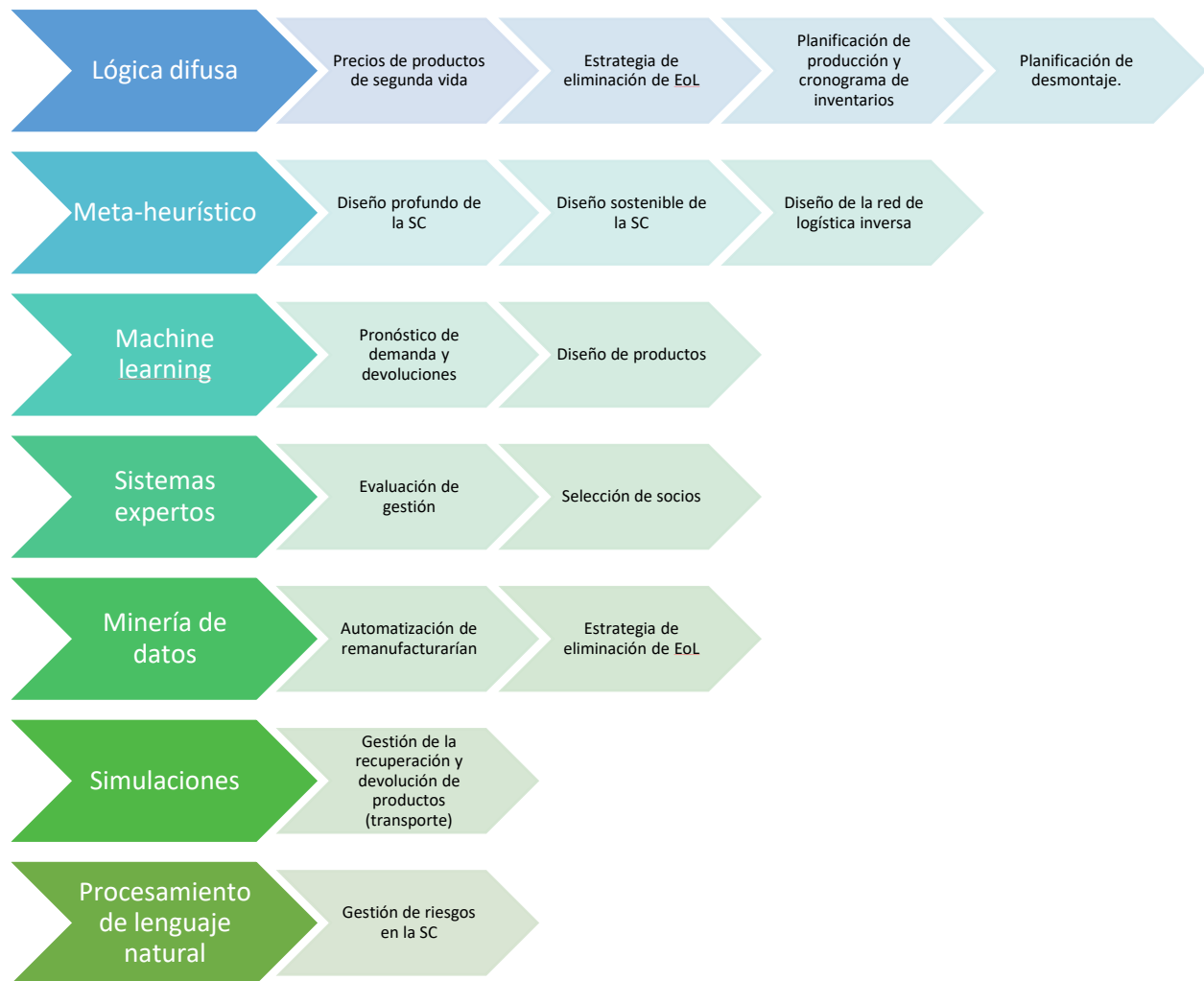
Fig. 6. Integrated framework of CLSC with the respective benefits.

Fuente: (Simonetto, Sgarboss, Battini, & Govindan , 2022)

En la segunda columna horizontal de la ilustración, nos indican dos de los principales procesos de la logística inversa, la evaluación y clasificación de los desechos recuperados, en los cuales se debe de tomar la decisión sobre qué tipo de proceso cada uno de los materiales debe seguir, si desecharlos o recuperar el producto o materia, en ocasiones se puede llegar a recuperar los productos enteros sin mayor daño que pueden volver a venderse, o partes de ellos para convertirlos en nuevos que remplazaran a las materias primas mediante un proceso de re-rabricación para ser adaptados nuevamente; en el último caso de que no se pueda recuperar más material, asegurar su correcta eliminación, ya que este último eslabón de la cadena de suministros es esencial para un proceso circular (Simonetto, Sgarboss, Battini, & Govindan , 2022).

Según la información de la revisión sistemática de literatura “Aplicaciones de la inteligencia artificial en cadenas de suministro de circuito cerrado”, se explican los principales métodos de sistemas de inteligencias artificiales en la cadena de suministro y actividades dentro de la misma, que podemos ver ilustrados a continuación:

Ilustración 20: Marco de integración de la red de suministros con la inteligencia artificial



Fuente: Elaboración propia (Bhattacharya, Govindan, Dastidar , & Sharma, 2024).

Para explicar el marco de integración entre la cadena de suministros y las inteligencias artificiales podemos encontrar que los principales métodos usados en las operaciones son:

La lógica difusa, siendo integrada para solucionar problemáticas en los procesos de estrategia de eliminación y planificación del desmontaje de EoL, asignación de precios para los productos de segunda vida, planificación de producción y cronograma de inventarios, siendo preferido ya que este método opera sin información exacta ni precisa y se enfoca en el desarrollo

de conjuntos difusos que procesan información donde se emplean entradas subjetivas, permitiendo la optimización multiobjetivo, evaluación y toma de decisiones.

Los métodos meta-heurísticos, en los cuales podemos encontrar los sistemas de algoritmo geneático (GA) e Inteligencias de enjambre (SI), los cuales han sido ampliamente implementados en operaciones como el diseño profundo y sostenible de la SC y la logística inversa, su importancia recae en la complejidad y cantidad de decisiones estratégicas a realizar para poder tener una SC optima y sostenible importantes para el E-waste, su cálculo se da a través del análisis del comportamiento colectivo de los agentes naturales descentralizados y autoorganizados, seleccionando un conjunto inicial de respuestas de una población de soluciones potenciales y se codificado como cadena binaria.

El machine learning; utilizada principalmente para el pronóstico de demandas, tanto demanda de los productos con una segunda vida o refabricado como también del volumen y temporadas de oferta del material recuperado; y el proceso de diseño de productos, no solo los productos nuevos sino también el rediseño de productos sostenibles en los cuales se puedan integrar materiales o elementos remanufacturados. Este sistema que detecta patrones complejos y desarrolla predicciones según la información recolectada entre diferentes nodos de la cadena de suministro mediante los sistemas de gestión de información interconectada. Mediante técnicas de regresión como el bosque aleatorio (RF), que funcionan como arboles de decisión para la predicción de demanda de un producto remanufacturado tomando en cuenta factores como el mercado en línea y las tendencias de compra de los clientes, también existen las técnicas como redes neuronales artificiales (ANN) que son capaces de reconocer complejas interrelaciones de variables de información entrante y saliente, llegando incluso a realizar análisis del ciclo comercial de vida de un producto y la duración de la vida del mismo, conociendo una estimación del tiempo

de su remplazo estimando la calidad de los productos y así mismo calcular una oferta estimada para la organización de adquisición de material reciclado ya que este no es contante.

Los sistemas expertos (ES): es implementada principalmente para la selección de socios en la cadena de suministros y la evaluación de la gestión de esta, realiza una medición de calidad, califica la eficiencia y las oportunidades dentro del sistema de SC, para finalmente realizar la toma de decisiones. Esta es una técnica recientemente aplicada a la cadena de suministro, ya que, a pesar de ser capaces de desarrollar una toma de decisiones dentro de escenarios complejos de resolución mediante la imitación de habilidades cognitivas humanas, su desarrollo es limitado debido a la complejidad de su implementación y cantidad de información requerida.

La minería de datos (DM), el uso de técnicas de minería de datos ha experimentado un crecimiento considerable en los últimos años, este método permite analizar conjuntos de datos grandes y complejos de manera que las empresas puedan extraer información valiosa que impulse decisiones estratégicas, en la ilustración se menciona su implementación dentro de una cadena de suministros circular, principalmente en la automatización de los procesos de Re fabricación, el cual es posible mediante el análisis de datos de técnicas como el mapeo de procesos para identificar cuellos de botella o puntos de mejora de tiempos, desarrollando nuevas opciones de automatización (como la automatización en el proceso de clasificación o en el proceso de desensamblaje), junto a la predicción de la viabilidad de los cambios a generar; también se menciona el desarrollo de estrategias de eliminación del EoL, logrado a través de diferentes técnicas de maximización el valor de los productos después de su uso, anticipación del comportamiento de devolución de los clientes y predicción de la demanda de los productos remanufacturados que terminan contribuyendo a una optimización en la reducción de generación de residuos.

Simulaciones: Es utilizado principalmente como un método de apoyo para la toma de decisiones mediante la evaluación de diferentes escenarios, en la SC circular es implementado principalmente para simular escenarios de transporte de entrega y recuperación de productos retornados de esta forma ayudar con la gestión determinando las mejores rutas de transporte, a pesar de eso no es solamente usada en esta área, sino que también puede ser utilizada en ámbitos tradicionales como en la planificación de producción, diseño de productos, diseño de red de suministro lineal y control de inventario; sin embargo este método requiere la evaluación de múltiples escenarios para proporcionar decisiones óptimas, por lo tanto desarrollarlo de forma aislada con poca información es ineficiente.

Procesamiento de lenguaje natural: Es uno de los métodos menos explorados, se centra en la extracción de texto, clasificación, traducción y resolución de preguntas, dentro de la SC, se encontró que es posible aplicarlo a la interpretación del comportamiento de compra de devolución de los productos por parte de los clientes de acuerdo a los comentarios en las páginas web de compras y el análisis de los comentarios en redes sociales relacionadas a la marca, por lo tanto brinda una gran ayuda en la estimación de posibles condiciones de los artículos devueltos lo cual facilita los proceso de evaluación, clasificación y des-ensamblaje (si es necesario) de los EEE y estimación de posibles errores en producción.

Las técnicas de inteligencia artificial y analítica avanzada son esenciales de implementar para optimizar la gestión del e-waste en una cadena de suministro circular, de los anteriores métodos vistos encontramos que en conclusión, la lógica difusa permite tomar decisiones en condiciones de incertidumbre; los métodos meta-heurísticos ayudan en el diseño de una cadena sostenible; el machine learning predice la demanda y oferta de productos y materiales de segunda vida, también, facilita el rediseño de productos sostenibles, mientras que los sistemas expertos mejoran la

selección de socios y la evaluación de la cadena. La minería de datos identifica mejoras y facilita la automatización en el reciclaje; adicional las simulaciones optimizan el transporte y la recolección de productos devueltos, y el procesamiento de lenguaje natural analiza comentarios de clientes para predecir devoluciones y clasificar productos. En conjunto con los sistemas de gestión o tecnología inteligente, estas técnicas fomentan un desarrollo más eficiente y sostenible de la SC del e-waste, promoviendo la reducción de residuos y el aprovechamiento de recursos.

6.5.Fase 5: Destacar el impacto de los modelos de inteligencia artificial en la toma de decisiones en la logística inversa del E-waste.

Los sistemas de apoyo para la toma de decisiones se emplean para identificar las acciones adecuadas que permitan alcanzar los resultados esperados, a la vez que se busca un equilibrio entre los intereses de las diferentes partes involucradas (Kanishka & Acherjee, 2023)

Dentro de la integración del e-waste a la SC, es primordial asegurar decisiones que permitan que los procesos sean más fáciles y eficientes, por esta razón aprovechando las nuevas tecnologías se prioriza la integración de estas a las practicas industriales según su necesidad y oportunidades de mejora detectadas.

Por eso inicialmente, se debe de identificar cual es el objetivo de implementar una de estas inteligencias artificiales; encontramos que las principales decisiones estratégicas para tener en cuenta una organización a la hora de querer integrar las IA, son las que se visualizan en la ilustración 21, las cuales al estudiarse y optimizarse nos da como resultado un movimiento más efectivo en la SC, mejora la sostenibilidad de los sistemas, aumenta tanto la competitividad como las ganancias y mejora la imagen de la empresa con sus consumidores.

Ilustración 21: principales decisiones estratégicas al integrar IA



Fuente: Elaboración propia (Shahidzadeh , Shokouhyar, Javadi, & Shokoohyar, 2022)

Dentro de los principales desafíos que enfrentan los métodos de toma de decisiones en la gestión de la logística inversa, es el elevado nivel de incertidumbre en ciertos parámetros de entrada de información y materia, y la dificultad de integrar las operaciones con las inteligencias artificiales, su éxito radica en la creación de métodos capaces de generar diferentes combinaciones de valores para los parámetros inciertos (Feitó-Cespón, Costa, Pishvae, & Cespón-Castro, 2021). El impacto de las herramientas tecnológicas en la toma de dediciones recae en que se desea lograr una mayor estandarización de los procesos en la logística inversa para poder reducir al mínimo la incertidumbre y optimizar los recursos, siendo las decisiones tomadas la elección de las diferentes

opciones que afectan a la organización de manera positiva o negativa, por lo que esta acción carga con un gran riesgo asociado.

La compleja relación entre los elementos de toma de decisión y la capacidad de aplicar de aplicar atributos cuantitativos y cualitativos simultáneamente, es la razón por lo cual se debe mantener un seguimiento y control de estos sistemas (Kheybari, Rezaie, & Farazmand, 2020). Los KPI (Indicadores Clave de Rendimiento) son herramientas esenciales para medir la efectividad de las estrategias en la gestión del e-waste, pueden ser utilizados mediante el análisis de datos en tiempo real, lo que permite a las organizaciones reaccionar rápidamente ante desviaciones de los objetivos establecidos. Asimismo, la elaboración de informes periódicos basados en estos indicadores ayuda a comunicar el rendimiento a todas las partes interesadas.

Permiten cuantificar el rendimiento en áreas críticas, como la tasa de reciclaje y la eficiencia operativa, lo que facilita la identificación de áreas que requieren mejora. Además, cuentan con datos precisos permite a las organizaciones tomar decisiones más informadas sobre sus procesos y estrategias (Sheykin, 2024), contribuyendo así a una gestión más eficiente del e-waste. Los KPI también ayudan a garantizar el cumplimiento de regulaciones sobre residuos electrónicos, lo que reduce el impacto ambiental de las empresas. Por último, el seguimiento regular de estos indicadores permite identificar tendencias y oportunidades para implementar mejoras continuas en los procesos. Por lo tanto, en la tabla 5 se mencionan algunos KPIs que son utilizados para hacer el control y seguimiento de estas herramientas tecnológicas.

Tabla 5: KPI estratégicos para una gestión efectiva de las IA en la gestión del e-waste

KPI	Descripción	Tipo de KPI	Sistema Utilizado
Tasa de Reciclaje	Porcentaje del e-waste reciclado frente al total generado.	Cuantitativo	Meta-heurístico, Machine Learning
Tiempo Medio de Reparación (MTTR)	Tiempo promedio necesario para procesar y reciclar e-waste.	Cuantitativo	Machine Learning, Simulaciones
Tasa de Resolución en el Primer Contacto (FCRR)	Porcentaje de problemas resueltos en el primer contacto con el cliente o proveedor.	Cuantitativo	Sistemas Expertos, Procesamiento de Lenguaje Natural
Satisfacción del Cliente	Medida de la satisfacción del cliente con respecto a los servicios de reciclaje y gestión del e-waste.	Cualitativo	Minería de Datos, Procesamiento de Lenguaje Natural
Costos Totales de Propiedad	Total de costos asociados a la gestión del e-waste, incluyendo recolección y reciclaje.	Cuantitativo	Machine Learning, Simulaciones
Eficiencia Operativa	Medida de cuán eficientemente se gestionan los recursos y	Mixto	Lógica Difusa, Meta-heurístico

	procesos en la cadena de suministro.		
Impacto Ambiental	Evaluación del impacto ambiental asociado con el manejo del e-waste, incluyendo emisiones y residuos.	Mixto	Simulaciones, Minería de Datos
Proyecciones de Demanda	Predicciones sobre la cantidad futura de e-waste que se espera recibir o reciclar.	Cuantitativo	Machine Learning
Optimización de Rutas de Recolección	Mejora en la planificación y ejecución de rutas para la recolección eficiente del e-waste.	Cuantitativo	Simulaciones, Meta-heurístico

Fuente: (Sheykin, 2024)

Para obtener soluciones integrales y aplicables a la toma de decisiones, los problemas de toma de decisiones suelen implicar diferentes conocimientos profesionales. Por lo tanto, el proceso de toma de decisiones requiere que actores de diferentes orígenes trabajen juntos. Sin embargo, los distintos participantes suelen tener opiniones e intereses diferentes a la hora de tomar decisiones, lo que hace que el proceso de toma de decisiones sea más complejo, pero al mismo tiempo, mejora la precisión de los resultados de la toma de decisiones, en la que los participantes

pueden comunicarse entre sí y, en última instancia, llegar a una solución objetiva. (Cai, Jin, Liu, Zhou, & Tao, 2023).

Entre las variables de decisiones encontramos las siguientes tres categorías según “Reverse logistics and closed-loop supply chain” (Govindan, Soleimani, & Kannan, 2015):

1. Variables de decisión estratégica de RL/SC: las decisiones de diseño, como las ubicaciones y capacidades de las instalaciones (configuraciones y estructuras), se toman en este nivel. Estas son decisiones a largo plazo.

2. Variables de decisión de planificación de RL/SC: incluyen decisiones con respecto a qué mercados se abastecerán desde qué ubicaciones (nivel de asignación) y el flujo de la red de la cadena de suministro. Estas son decisiones a mediano plazo.

3. Variables de decisión operativa de RL/SC: incluyen la asignación de inventario o producción a pedidos individuales, la fijación de una fecha en la que se debe completar el pedido y otras decisiones a corto plazo.

Clasificar la toma de decisiones de acuerdo con estas variables es indispensable para poder gestionar y optimizar la SC en diferentes niveles de tiempos, recursos y responsabilidades, ya que las restricciones en las diferentes etapas de la SC y la logística inversa, pueden llegar a ser previstas pero el elemento de incertidumbre siempre va a ser continuo, debido a que aquí es donde las empresas mantienen una dependencia del consumidor y no directamente de proveedores que aseguren tiempos, cantidades y una calidad pactada, por lo que mediante la implantación de las IA que funcionen ya sea como herramientas de apoyo o como elementos de tomas de decisión se logra una mejora, mediante el estudio y análisis de la información, de la sincronización de la cadena. En conclusión, para abordar este desafío, se necesitan métodos que generen diversas combinaciones

de valores para estos parámetros inciertos, lo que permite a las empresas adaptarse a un entorno dinámico.

7. Conclusiones y recomendaciones

La logística inversa ha emergido como un elemento crucial en la gestión de residuos electrónicos (E-Waste), un escenario que está en constante crecimiento y que presenta desafíos significativos para la sostenibilidad ambiental y la economía circular. Con el aumento de la producción y el desecho de dispositivos electrónicos, se hace esencial que las empresas generen una toma de decisiones estratégicas y efectivas de logística inversa que les permitan recuperar valor de los productos al final de su ciclo de vida.

Mediante esta investigación se ha identificado y descrito como, al integrar la IA a prácticas de la logística inversa, las organizaciones no solo reducen el impacto ambiental asociado con el E-Waste, sino también optimizar sus operaciones y mejorar su competitividad en el mercado.

La implementación de las 6R (Reducir, Reutilizar, Reciclar, Recuperar, Remanufacturar y Rehabilitar) ofrece a las empresas un enfoque integral para abordar el problema del E-Waste, fomentando un uso más claro y eficiente de los recursos y contribuyendo a la disminución del desperdicio. Sin embargo, a pesar de los beneficios claros que brinda la logística inversa y la inteligencia artificial en la gestión del E-Waste, las organizaciones enfrentan desafíos significativos al implementar estas prácticas. La investigación ha revelado limitaciones en el conocimiento sobre logística inversa dentro de muchas empresas y ha señalado que la falta de recursos tecnológicos y humanos capacitados puede obstaculizar su adopción efectiva.

Adicional, los constantes cambios regulatorios y las crecientes expectativas del público respecto a la responsabilidad ambiental ejercen una presión sobre las organizaciones. Sin embargo, estos desafíos también representan oportunidades para el desarrollo e innovación

dentro del sector. Las empresas que logran superar estas barreras de información y tecnología no solo pueden beneficiarse económicamente al recuperar materiales valiosos del E-Waste, sino que también pueden posicionarse como líderes en sostenibilidad dentro de sus industrias.

La clave para aprovechar estas oportunidades radica en una planificación y toma de decisiones adecuada con las circunstancias de cada organización y sus sistemas de SC, considerando tanto los recursos necesarios, como los objetivos a largo plazo relacionados con la sostenibilidad y el retorno.

La logística inversa no debe ser percibida únicamente como una necesidad operativa; en cambio, esta presenta una oportunidad estratégica para aquellas empresas que buscan adaptarse a un entorno comercial cada vez más enfocado en el desarrollo tecnológico.

Para optimizar el impacto positivo de la logística inversa y la inteligencia artificial en la gestión del E-Waste, es recomendable fomentar colaboraciones interempresariales entre los diversos actores involucrados en la cadena de suministro (3PRPL), este trabajo en conjunto, pueden incluir alianzas entre empresas tecnológicas, recicladores y organismos gubernamentales para desarrollar soluciones integrales que aborden los desafíos comunes asociados con el E-Waste. Al compartir información, recursos y mejores prácticas, las organizaciones pueden mejorar su capacidad para implementar estrategias efectivas de logística inversa e inteligencia artificial. Esta colaboración no solo simplifica el proceso de toma de decisiones y la proyección de oferta y demanda, sino que también contribuye a crear un ecosistema más robusto y eficiente que beneficie tanto a las empresas involucradas, al reducir el impacto ambiental del E-Waste.

8. Referencias

- Abdul-Hamid , A.-Q., Ali, M., Osman, L., Tseng, M.-L., & Lim, M. (2022). Industry 4.0 quasi-effect between circular economy and sustainability: Palm oil industry. *International Journal of Production Economics*, Volume 253, 108616.
- Abdul-Hamid, A.-Q., Helmi Ali, M., Osman, L., Tseng, M.-L., & Lim , M. (2022). Industry 4.0 quasi-effect between circular economy and sustainability: Palm oil industry. *International Journal of Production Economics*, 108616, Volume 253.
- Bag , S., Yadav, G., Wood, L., Dhamija , P., & Joshi, S. (2020). Industry 4.0 and the circular economy: Resource melioration in logistics. *Resources Policy*, Volume 68, 101776.
- Bhattacharya, S., Govindan, K., Dastidar , S., & Sharma, P. (2024). Applications of artificial intelligence in closed-loop supply chains: Systematic literature review and future research agenda. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Volume 184,103455.
- Cai, Y., Jin, F., Liu, J., Zhou, L., & Tao, Z. (2023). A survey of collaborative decision-making: Bibliometrics, preliminaries, methodologies, applications and future directions. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 122, 106064.
- Chen, o., & Hammad, A. (2022). Mathematical modelling and simulation in construction supply chain management. *Automation in Construction*, Volume 156.
- Chiang, C.-T. (2024). A systematic literature network analysis of green information technology for sustainability: Toward smart and sustainable livelihoods. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 199, 123053.
- Ferrante, M., Vitti , M., Facchini, F., & Sassanelli, C. (2024). Mapping the relations between the circular economy rebound effects dimensions: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, Volume 456, 142399.
- Goldratt , E., & Cox, J. (1984). *The Goal: A Process of Ongoing Improvement*. Croton-on-Hudson New York : North River Press.
- Hashemi-Amiri, O., Mohammadi, M., Rahmanifar, G., Hajiaghaei-Keshteli , M., Fusco, G., & Colombaroni, C. (2023). An allocation-routing optimization model for integrated solid waste management. *Expert Systems with Applications*, Volume 227, 120364.
- Huang, Y.-D., Chen, T.-H., Chih, M., Chang, W.-J., & Lien, C.-C. (2023). An adaptive GLNPSO method for inventory replenishment supply chain problem with multiple-warehouse policy and budget consideration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 126, Part D, 107124.
- Islam, M., & Huda, N. (2022). Reshaping WEEE management in Australia: An investigation on the untapped WEEE products. *Journal of Cleaner Production*, Volume 250, 119496.
- Islam, M., Huda, N., Baumber, A., Shumon, R., Zaman, A., Ali , F., . . . Sahajwalla, V. (2021). A global review of consumer behavior towards e-waste and implications for the circular economy. *Journal of Cleaner Production*, Volume 316, 128297.

- Kafa, N., Hani, Y., & Mhamedi, A. (2015). An integrated sustainable partner selection approach with closed-loop supply chain network configuration. *IFAC-PapersOnLine*, Volume 48, Issue 3, Pages 1840-1845.
- Kanishka, K., & Acherjee, B. (2023). A systematic review of additive manufacturing-based remanufacturing techniques for component repair and restoration. *Journal of Manufacturing Processes*, Volume 89, Pages 220-283.
- Karali, N., & Shah, N. (2022). Bolstering supplies of critical raw materials for low-carbon technologies through circular economy strategies. *Energy Research & Social Science*, Volume 88, 102534.
- Keivanpour, S., & Kadi, D. (2019). Internet of Things Enabled Real-Time Sustainable End-of-Life Product Recovery. *IFAC-PapersOnLine*, Volume 52, Issue 13, Pages 796-801.
- Lickert, H., Wewer, A., Dittmann, S., Bilge, P., & Dietrich, F. (2021). Selection of Suitable Machine Learning Algorithms for Classification Tasks in Reverse Logistics. *Procedia CIRP*, Volume 96, Pages 272-277.
- Loaiza Torres, J. (2018). DEL CICLO DE VIDA DEL PRODUCTO AL CICLO DE VIDA DEL CLIENTE: Una aproximación hacia una construcción teórica del ciclo de vida del cliente. *Universidad Católica Boliviana "San Pablo"*, Pag. 4-11.
- Majumdar, A., Mithun Ali, S., Agrawal, R., & Srivastava, S. (2022). A triple helix framework for strategy development in circular textile and clothing supply chain: an Indian perspective. *A triple helix framework for strategy development in circular textile and clothing supply chain: an Indian perspective*, 132954, Volume 367.
- Montecinos, J., Ouhimmou, M., Chauhan, S., & Paquet, M. (2018). Forecasting multiple waste collecting sites for the agro-food industry. *Journal of Cleaner Production*, Volume 187, Pages 932-939.
- Morjéne, Y., Ndhiaief, N., & Rezg, N. (2022). Optimization of production batches in a circular supply chain under uncertainty. *IFAC-PapersOnLine*, Volume 55, Issue 10, Pages 1752-1757.
- Ni, Z., Zhang, Q., Hao, J., & Liu, X. (2024). Toward a better understanding of China's e-waste reverse logistics implementation barriers: A certified disassembler's perspective. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, Volume 41, 101660.
- Rossit, D., Toutouh, J., & Nesmachnow, S. (2020). Exact and heuristic approaches for multi-objective garbage accumulation points location in real scenarios. *Waste Management*, Volume 105, Pages 467-481.
- Rossit, D., Toutouh, J., & Nesmachnow, S. (2020). Exact and heuristic approaches for multi-objective garbage accumulation points location in real scenarios. *Waste Management*, Pages 467-481.
- Sassanelli, C., Garza-Reyes, J., Liu, Y., Pacheco, D., & Luthra, S. (2023). The disruptive action of Industry 4.0 technologies cross-fertilizing Circular Economy throughout society. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 183, 109548.

- Scott, I., Neto, M., & Pinheiro, F. (2023). Bringing trust and transparency to the opaque world of waste management with blockchain: A Polkadot parathread application. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 182, 109347.
- Serravalle, F., Vannucci, V., & Pantano, E. (2022). "Take it or leave it?": Evidence on cultural differences affecting return behaviour for Gen Z. *Journal of Retailing and Consumer Services*, Volume 66, 102942.
- Tushar, Q., Sun, W., Zhang, G., Navaratnam, S., Hou, L., & Giustozzi, F. (2023). Evolution in impacts assessment for managing and recycling of waste: A scientometric analysis. *Journal of Cleaner Production*, Volume 430, 139685.
- Walter, S., Braun, A., & Louw, L. (2023). Development of a product return process in the context of the Circular Economy with the help of Machine Learning. *Procedia CIRP*, Volume 120, Pages 1498-1503.
- Wesselkämper, J., & Delft, S. (2024). Current status and future research on circular business models for electric vehicle battery recycling. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 206, 107596.
- Xia, H., Chen, Z., Milisavljevic-Syed, J., & Salonitis, K. (2024). Uncertain programming model for designing multi-objective reverse logistics networks. *Cleaner Logistics and Supply Chain*, Volume 11, 100155.
- Zarbakshshnia, N., Soleimani, H., & Ghaderi, H. (2018). Sustainable third-party reverse logistics provider evaluation and selection using fuzzy SWARA and developed fuzzy COPRAS in the presence of risk criteria. *Applied Soft Computing*, Volume 65, Pages 307-319.
- Alsobky, A., Ahmed, M., Agroudy, S., & Araby, K. (2023). A smart framework for municipal solid waste collection management: A case study in Greater Cairo Region. *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 14, Issue 6, 102183.
- Bachofner, M., Lemardelé, C., Estrada, M., & Pagès, L. (2022). City logistics: Challenges and opportunities for technology providers. *Journal of Urban Mobility*, Volume 2, 100020.
- Bajgani, S., Saberi, S., & Toyasaki, F. (2023). Designing a reverse supply chain network with quality control for returned products: Strategies to mitigate free-riding effect and ensure compliance with technology licensing requirements. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 195, 122744.
- Beducci, E., Acerbi, F., Pinzone, M., & Taisch, M. (2024). Unleashing the role of skills and job profiles in circular manufacturing. *Journal of Cleaner Production*, Volume 449, 141456.
- Bildirici, M., & Ömer Ersin, Ö. (2023). Nexus between Industry 4.0 and environmental sustainability: A Fourier panel bootstrap cointegration and causality analysis. *Journal of Cleaner Production*, 135786, Volume 386.
- Bureau Veritas Formación. (2015). *Logística integral, segunda edición*. Madrid : Fundación CONFEMENTAL .
- Cabeza, D. (2014). *Logística inversa en la cadena de suministro*. DC MEXICO: Alfaomega Grupo Editor.

- Chopra, S., & Meindl, P. (2020). *Supply Chain Management: Strategy, Planning, and Operation*. Londres : Pearson Editorial .
- Chouinard , U., Pigosso , D., McAloone , T., Baron , L., & Achiche, S. (2019). Potential of circular economy implementation in the mechatronics industry: An exploratory research. *Journal of Cleaner Production*, Volume 239, 118014.
- Claudio , S., Garza-Reyes, J., Liu, Y., de Jesus Pacheco, D., & Luthra, S. (2023). The disruptive action of Industry 4.0 technologies cross-fertilizing Circular Economy throughout society. *Computers & Industrial Engineering*, 109548, Volume 183.
- Deveci, M., Pamucar, D., Gokasar, I., Delen, D., Wu , Q., & Simic, V. (2022). An analytics approach to decision alternative prioritization for zero-emission zone logistics. *Journal of Business Research*, Volume 146, Pages 554-570.
- Dobos, I., & Vörösmarty, G. (2019). Inventory-related costs in green supplier selection problems with Data Envelopment Analysis (DEA). *International Journal of Production Economics*, Volume 209, Pages 374-380.
- Duarte Castro, F., Gomes Xavier, B., Alexina do Carmo Cardeal, J., Marcela Penha Perpétuo, B., Gomes Lopes, L., Lacerda da Silva, J., . . . Vaccari, M. (2022). The (un)shared responsibility in the reverse logistics of portable batteries: A Brazilian case. *Elsevier Ltd*, Volume 154, Pages 49 - 63.
- Ebrahimi Bajgani, S., Saberi, S., & Toyasaki, F. (2023). Designing a reverse supply chain network with quality control for returned products: Strategies to mitigate free-riding effect and ensure compliance with technology licensing requirement. *Technological Forecasting and Social Change*, 122744, Volume 195.
- Elghaish, F., Hosseini, M., Kocaturk, T., Arashpour , M., & Bararzadeh Ledari, M. (2023). Digitalised circular construction supply chain: An integrated BIM-Blockchain solution. *Automation in Construction*, 104746, Volume 148 .
- Feitó-Cespón, M., Costa, Y., Pishvaei, M., & Cespón-Castro, R. (2021). A fuzzy inference based scenario building in two-stage optimization framework for sustainable recycling supply chain redesign. *Expert Systems with Applications*, Volume 165, 113906.
- Fiedler, F. E. (1964). *A Contingency Model of Leadership Effectiveness*. Oxford, Londres: Academic Press.
- Forti, V., Balde, C., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential. En V. Forti, C. P. Balde, R. Kuehr, & G. Bel, *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, flows and the circular economy potential* (págs. Pages 70-79). Bonn, Geneva and Rotterdam: United Nations University/United Nations Institute for Training and Research, International Telecommunication Union, and International Solid Waste Association.
- Ghoushchi, S., Haghshenas, S., Vahabzadeh, S., & Guido, G. (2024). Development of a robust hybrid framework for evaluating and ranking smartification measures for sustainable mobility: A case study of Sicilian roadways, Southern Italy. *Expert Systems with Applications*, Volume 241, 122595.

- Golder, P. N., & Mitra, D. (2012). *Managing the Product Life Cycle: The Ultimate Marketing Survival Guide*. New York: Business Expert Press.
- Gołębiewski, B., Trajer, J., Jaros, M., & Winiczenko, R. (2013). Modelling of the location of vehicle recycling facilities: A case study in Poland. *Resources, Conservation and Recycling*, Pages 10-20.
- Gölgeci, I., Gligor, D., Bayraktar, E., & Delen, D. (2023). Reimagining global value chains in the face of extreme events and contexts: Recent insights and future research opportunities. *Journal of Business Research*, Volume 160, 113721.
- Govindan, K., Paam, P., & Abtahi, A.-R. (2016). A fuzzy multi-objective optimization model for sustainable reverse logistics network design. *Ecological Indicators*, Volume 67, Pages 753-768.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, Volume 240, Issue 3, Pages 603-626.
- Guo, Y., Huang, Z., & Yang, Y. (2015). Waste electrical recycling network optimum design under the carbon cap constraint. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, Pages 53 - 57.
- Haq, R., Saeed, M., Mateen, N., Siddiqui, F., Naqvi, M., Yi, J., & Ahmed, S. (2022). Sustainable material selection with crisp and ambiguous data using single-valued neutrosophic-MEREC-MARCOS framework. *Applied Soft Computing*, Volume 128, 109546.
- Hashmi, N., Jalil, S., & Javaid, S. (2022). A multi-objective model for closed-loop supply chain network based on carbon tax with two fold uncertainty: An application to leather industry. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 173, 108724.
- Henao-Hernández, I., Muñoz-Villamizar, A., & Solano-Charris, E. (2021). Connectivity Through Digital Supply Chain Management: A Comprehensive Literature Review. *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*, 249 - 259.
- Imai, M. (1986). *Kaizen: The Key to Japan's Competitive Success*. Tokio : McGraw-Hill.
- Joyanes Aguilar, L. (2017). *Industria 4.0. La cuarta revolución industrial*. C.V. MEXICO : Alfaomega Grupo Editor, S.A.
- Kheybari, S., Rezaie, F., & Farazmand, H. (2020). Analytic network process: An overview of applications. *Applied Mathematics and Computation*, Volume 367, 124780.
- Krause, O., Fischer, A., & Igel, C. (2020). Algorithms for estimating the partition function of restricted Boltzmann machines. *Artificial Intelligence*, Volume 278, 103195.
- Kulshreshtha, K., & Sharma, G. (2022). From restaurant to cloud kitchen: Survival of the fittest during COVID-19 An empirical examination. *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 179, 121629.
- Kumar, M., Raut, R., Mangla, S., Chowdhury, S., & Choubey, V. (2024). Moderating ESG compliance between industry 4.0 and green practices with green servitization: Examining its impact on green supply chain performance. *Technovation*, 102898, Volume 129.

- Lahane, S., Kant, R., & Shankar, R. (2020). Circular supply chain management: A state-of-art review and future opportunities. *Journal of Cleaner Production*, Volume 258, 120859.
- Long, Q. (2024). An agent-based distributed computational experiment framework for virtual supply chain network development. *Expert Systems with Applications*, Volume 41, Issue 9, Pages 4094-4112.
- Luo, Y., & Wan, Z. (2022). An optimal system of recycling unwanted medicines by sustainable synergy of drugmakers, drugstores, customers and governments. *Journal of Cleaner Production*, Volume 376, 134304.
- Majumdar, A., Ali, S., Agrawal, R., & Srivastava, S. (2022). A triple helix framework for strategy development in circular textile and clothing supply chain: an Indian perspective. *Journal of Cleaner Production*, Volume 367, 132954.
- Makarova, I., Pashkevich, A., Shubenkova, K., & Lenik, P. (2018). Improvement of automotive spare parts delivery in the context of markets globalization. *IADIS Press*, Pages 370 - 374.
- Makarova, I., Shubenkova, K., & Pashkevich, A. (2018). The Concept of the Decision Support System to Plan the Reverse Logistics in Automotive Industry. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, Pages 76 - 81.
- Maruphy R, P., & Knemeyer A, M. (2015). *Logística contemporánea, Decimo primera edicion*. Mexico DC: Pearson Education .
- Masclé, C., Baptiste, P., Beuve, D., & Camelot, A. (2015). Process for Advanced Management and Technologies of Aircraft EOL. *Procedia CIRP*, Volume 26, Pages 299-304.
- Massari, G., Nacchiero, R., & Giannoccaro, I. (2023). Digital technologies for resource loop redesign in circular supply chains: A systematic literature review. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, Volume 20, 200189.
- Mayer-Schönberger, V., & Cukier, K. (2013). *Big Data: A Revolution That Will Transform How We Live, Work, and Think*. New York: Eamon Dolan/Mariner Books.
- McKinnon, A. (2010). *Green Logistics: Improving the Environmental Sustainability of Logistics*. Londres: Kogan Page.
- Mejía-Moncayo, C., Kenné, J.-P., & Hof, L. (2023). On the development of a smart architecture for a sustainable manufacturing-remanufacturing system: A literature review approach. *Computers & Industrial Engineering*, Volume 180, 109282.
- Meng, K., Xu, G., Peng, X., & Youcef-Toumi, K. (2022). Intelligent disassembly of electric-vehicle batteries: a forward-looking overview. *Resources, Conservation and Recycling*, Volume 182, 106207.
- Meng, p., Xu, G., Peng, X., Youcef-Toumi, K., & Li, J. (2022). Intelligent disassembly of electric-vehicle batteries: a forward-looking overview. *Resources, Conservation and Recycling*, 106207, Volume 182.

- Mohammad Hossein Shahidzadeh, M., Shokouhyar, S., Javadi, F., & Shokoohyar, S. (2022). Unscramble social media power for waste management: A multilayer deep learning approach. *Journal of Cleaner Production*, 134350, Volume 377.
- Nobre, G., & Tavares, E. (2021). The quest for a circular economy final definition: A scientific perspective. *Journal of Cleaner Production*, Volume 314, 127973.
- Oliveira Neto, G. C., de Araujo, S. A., Gomes, R., Alliprandini, D., Flausino, F., & Amorim, M. (2023). Simulation of Electronic Waste Reverse Chains for the Sao Paulo Circular Economy: An Artificial Intelligence-Based Approach for Economic and Environmental Optimizations. *Sensors*, Volume 23, Issue 22.
- Ouro-Salim, O. (2024). Urban mining of e-waste management globally: Literature review. *Cleaner Waste Systems*, Volume 9, 100162.
- P. Womack, J., & T. Jones, D. (1996). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York : Free Press.
- Pollard, J., Osmani, M., Grubnic, S., Díaz, A., Grobe, K., Kaba, A., . . . Panchal, R. (2023). Implementing a circular economy business model canvas in the electrical and electronic manufacturing sector: A case study approach. *Sustainable Production and Consumption*, Volume 36, Pages 17-31.
- Popa, D.-C., & Szabó, L. (2025). Overcoming Catch-22 for rare earth metals in green transition: Solutions in electrical machine manufacturing. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 207, 114917.
- Prochatzki, G., Mayer, R., Haenel, J., Schmidt, A., Götze, U., Ulber, M., . . . Arnold, M. (2023). A critical review of the current state of circular economy in the automotive sector. *Journal of Cleaner Production*, Volume 425, 138787.
- Roemer, R., & Borchardt, R. (2017). *Introduction to Bibliometrics: New Development and Trends*. Cambridge, UK : MIT Press.
- Russell, S. J., & Norvig, P. (2016). Artificial intelligence : a modern approach. *PEARSON*, pages 10-14.
- Shahidzadeh, M., Shokouhyar, S., Javadi, F., & Shokoohyar, S. (2022). Unscramble social media power for waste management: A multilayer deep learning approach. *Journal of Cleaner Production*, Volume 377, 134350.
- Sheykin, H. (29 de octubre de 2024). *Finmodelslab*. Obtenido de Finmodelslab: 7 KPI estratégicos para una gestión efectiva de desechos electrónicos (Read more at: <https://finmodelslab.com/es/blogs/kpi-metrics/electronic-waste-recycling-kpi-metrics>)
- Silva, W., & Morais, D. (2021). A Group Decision Support System to Share Responsibilities Towards a Circular Economy Transition for Solid Waste Management in Developing Countries. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, Pages 2221 - 2226.
- Simonetto, M., Sgarboss, F., Battini, D., & Govindan, K. (2022). Closed loop supply chains 4.0: From risks to benefits through advanced technologies. A literature review and research agenda. *International Journal of Production Economics*, Volume 253, 108582.

- Sourabh , B., Kannan , G., Surajit Ghosh , D., & Preeti , S. (Abril de 2024). Applications of artificial intelligence in closed-loop supply chains: Systematic literature review and future research agenda. *Investigación de Transporte Parte E: Revisión de Logística y Transporte*, 103455, Volumen 184.
- Spreitzenbarth, J., Bode, C., & Stuckenschmidt, H. (s.f.). Artificial intelligence and machine learning in purchasing and supply management: A mixed-methods review of the state-of-the-art in literature and practice.
- Spreitzenbarth, M., Bode, C., & Stuckenschmidt, H. (2024). Artificial intelligence and machine learning in purchasing and supply management: A mixed-methods review of the state-of-the-art in literature and practice. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 100896, Volume 30, Issue 1.
- Tang, Z., Zhou, Z., & Warkentin, M. (2022). A contextualized comprehensive action determination model for predicting consumer electronics recommerce platform usage: A sequential mixed-methods approach. *Information & Management*, Volume 59, Issue 3, 103617.
- Teixeira, E., Tjahjono, B., Beltran, M., & Julião, J. (2022). Demystifying the digital transition of remanufacturing: A systematic review of literature. *Computers in Industry*, Volume 134, 103567.
- United Nations Development Program. (01 de 01 de 2015). *United Nations Development Programme*. Obtenido de United Nations Development Programme: [https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals#:~:text=Los%20Objetivos%20de%20Desarrollo%20Sostenible%20\(ODS\),%20tambi%C3%A9n%20conocidos%20como%20Objetivos](https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals#:~:text=Los%20Objetivos%20de%20Desarrollo%20Sostenible%20(ODS),%20tambi%C3%A9n%20conocidos%20como%20Objetivos)
- Vikilal , J., Brainy , J., Narayanamoorthy, S., Sandra, M., Pamucar, D., & Kang, D. (2024). An unified fuzzy decision strategy for analysing green fuel alternatives: A road to long-term development. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Volume 130, 107733.
- von Bertalanffy, L. (1968). *Teoría General de los Sistemas: Fundamentos, Desarrollo, Aplicaciones*. New York : George Braziller Inc.
- Walter, S., Braun, A., & Louw, L. (2023). Development of a product return process in the context of the Circular Economy with the help of Machine Learning. *Procedia CIRP*, Pages 1498-1503.
- Yang, Y., & Wu, D. (2017). Research on environmental impact assessment of E-waste reverse logistics. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.*, Pages 612 - 615.
- Zakeri , S., Konstantas, D., Bratvold, R., & Chatterjee, P. (2024). A cleaner supplier selection model using rate-weight connected vectors processor (RWCVP): Type I. *Journal of Cleaner Production*, Volume 441, 140913.
- Zhang, D. (29 de Abril de 2022). *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Obtenido de International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: <https://www.issmge.org/news/reference-list-for-machine-learning-and-its-applications-in-geotechnical-engineering-part-ii-machine-learning-algorithms0>