







# Reverse Logistics of Electronic Waste: A Systematic Review of Recent Methodological Approaches

Jason Jair, Moscoso Rojas<sup>1</sup>; Martin Alonso, Huamaní Huaccha<sup>2</sup>; Gerby Giovanna, Rondán-Sanabria<sup>3</sup>   
<sup>1,2,3</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18217707@utp.edu.pe, U19220279@utp.edu.pe, c16238@utp.edu.pe

**Abstract** - The rapid increase in electrical and electronic equipment consumption has led to a significant rise in electronic waste (e-waste), posing environmental and logistical challenges. This systematic review identifies and analyzes the main methodologies employed in the reverse logistics of waste electrical and electronic equipment (WEEE), highlighting the most frequently applied approaches, associated technologies, and the materials most recovered. A total of 61 scientific articles published in the last five years were selected based on thematic relevance and methodological rigor, applying PICO and PRISMA strategies to ensure a transparent and structured review process. Results reveal that case studies, optimization models, and bibliometric analyses are the predominant methodologies. Copper and precious metals, such as gold, silver, and palladium are the most frequently recovered materials, followed by plastics and glass. Regional disparities were noted: while advanced recovery technologies are more prevalent in developed countries, Latin America continues to face structural limitations hindering their adoption. This review provides a comprehensive overview of current practices in WEEE reverse logistics and serves as a knowledge base for designing informed public policies and sustainable recycling strategies.

**Keywords**- Reverse logistics, electronic waste, WEEE, Recycling, resource recovery, circular economy.

# Logística inversa de Residuos Electrónicos: Una Revisión Sistemática de Enfoques Metodológicos Recientes

Jason Jair, Moscoso Rojas<sup>1</sup> ; Martin Alonso, Huamani Huaccha<sup>2</sup> ; Gerby Giovanna, Rondán-Sanabria<sup>3</sup>   
<sup>1,2,3</sup>Universidad Tecnológica del Perú, Perú, U18217707@utp.edu.pe, U19220279@utp.edu.pe, c16238@utp.edu.pe

**Resumen-** El crecimiento acelerado en el consumo de equipos eléctricos y electrónicos ha generado un notable incremento en los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), lo que plantea importantes desafíos ambientales y logísticos. Esta revisión sistemática tiene como objetivo identificar y analizar las principales metodologías empleadas en la logística inversa de estos residuos, destacando los enfoques más utilizados, las tecnologías asociadas y los materiales recuperados con mayor frecuencia. Se revisaron 61 artículos científicos publicados en los últimos cinco años, seleccionados con base en su relevancia temática y rigor metodológico, aplicando las estrategias PICO y PRISMA para garantizar un proceso de revisión estructurado y transparente. Los resultados muestran que las metodologías más utilizadas son los estudios de caso, los modelos de optimización y los análisis bibliométricos. Los materiales más recuperados son el cobre y los metales preciosos como oro, plata y paladio, seguidos por plásticos y vidrio. Se identificaron diferencias regionales: mientras que en los países desarrollados se aplican tecnologías avanzadas, en América Latina persisten barreras estructurales que dificultan su implementación. En conclusión, esta revisión ofrece una visión integral del estado actual de la logística inversa aplicada a los RAEE y constituye una base de información útil para el diseño de políticas públicas y estrategias de reciclaje más sostenibles.

**Palabras clave-** Logística inversa, residuos electrónicos, RAEE, reciclaje, recuperación de materiales, economía circular.

## I. INTRODUCCIÓN

El crecimiento sostenido en el consumo de aparatos eléctricos y electrónicos ha generado una problemática creciente relacionada con los residuos que estos generan al finalizar su vida útil. Estos residuos, conocidos como RAEE (Residuos de aparatos eléctricos y electrónicos), contienen materiales valiosos como peligrosos, lo que exige una gestión adecuada y especializada [1]. Diversos estudios coinciden en que, debido a la rápida obsolescencia tecnológica, el volumen de RAEE ha aumentado significativamente en todo el mundo, generando impactos ambientales y sociales considerables [2]. Frente a esta situación, la logística inversa se ha posicionado como una estrategia clave para la recuperación de materiales y la reducción del impacto ambiental asociado al manejo inadecuado de estos residuos [3].

Sin embargo, a pesar de la importancia creciente de esta temática, se observa una falta de uniformidad en las metodologías aplicadas para implementar sistemas de logística inversa, especialmente en países en vías de desarrollo. Aunque existen experiencias exitosas en Europa y Asia en el uso de tecnologías como sensores IoT, blockchain y aplicaciones

móviles para optimizar la recolección y trazabilidad de los RAEE [4], en América Latina el panorama aún es limitado y con baja sistematización [3], [5].

Esto evidencia un vacío importante en la literatura respecto a enfoques metodológicos integradores que consideren no solo el aspecto técnico, sino también el social, ambiental y económico. A pesar del creciente número de publicaciones sobre RAEE y reciclaje, no se cuenta con una revisión sistemática que sintetice de forma organizada estas metodologías y sus aplicaciones reales.

Frente a ello, esta revisión se justifica por la necesidad de consolidar el conocimiento actual sobre las metodologías aplicadas en la logística inversa de RAEE. Al analizar la literatura de los últimos cinco años, esta revisión busca proporcionar una visión crítica y actualizada que pueda servir como base para futuras investigaciones, así como para la toma de decisiones en políticas públicas y en la formulación de estrategias para el manejo de residuos. Además, la identificación de enfoques metodológicos predominantes permitirá a investigadores, empresas y gobiernos enfocar sus esfuerzos en soluciones más efectivas y contextualizadas.

Por ello el objetivo de esta revisión sistemática es identificar y analizar las metodologías más relevantes que se han aplicado en la logística inversa de los RAEE, con el fin de clasificar sus enfoques, identificar las tecnologías utilizadas y establecer patrones comunes que permitan mejorar la gestión de estos residuos en distintos contextos.

## II. METODOLOGIA

En la presente revisión sistemática de la literatura (RSL) se optó por una metodología de carácter cualitativo, sin metanálisis, enfocada en la identificación y análisis descriptivo de las metodologías aplicadas a la logística inversa de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Para ello, se empleó la estrategia PICO, la cual facilitó la formulación estructurada de la pregunta de investigación y permitió seleccionar los artículos científicos más pertinentes para los objetivos del estudio.

Adicionalmente, se aplicó la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), que contribuyó a sistematizar y depurar el proceso de búsqueda y selección de artículos, asegurando transparencia y trazabilidad en cada etapa de la revisión [6], [7].

## A. Metodología PICO

Según la metodología PICO, donde P corresponde a “Población o Problema”, I a “Intervención”, C a “Comparación” y O a “Resultados”, se formuló la pregunta principal y sus respectivas subpreguntas, como se muestra en la Tabla I.

La pregunta general que guía esta revisión sistemática es: ¿Que metodologías de logística inversa aplicadas a los RAEE resultan más eficientes en la gestión de residuos y el incremento de la tasa reciclaje y recuperación de materiales?

Para la búsqueda bibliográfica, se utilizó la base de datos Scopus, por ser una de las más reconocidas en cuanto a cobertura y calidad de publicaciones científicas. Las palabras clave asociadas a cada componente de la metodología PICO se detallan también en la Tabla I.

TABLA I  
PREGUNTA PICO

Componentes	Preguntas	Palabras clave para cada componente
P	¿Qué residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) existen?	“Electronic equipment” OR “Electrical appliances” OR “Electronic appliances” OR “WEEE” OR “Waste electrical and electronic equipment” OR “Electrical and electronic waste” OR “Electronic scrap” OR “Obsolete electronic equipment” OR “Electronic waste recycling” OR “Electronic waste disposal” OR “Electronic hazardous waste” OR “Electronic waste” OR “E-Waste”
I	¿Qué metodologías aplicadas en logística inversa existe?	“Reverse Logistics” OR “Green Logistics” OR “Returns Logistics” OR “Waste Logistics” OR “Sustainable Logistics” OR “Eco-Logistics” OR “Responsible Logistics” OR “Reverse Supply Chain” OR “Closed-Loop Supply Chain” OR “Returns Management” OR “Remanufacturing” OR “Refurbishment” OR “Environmental Technology” OR “Circular Economy”
C	¿Qué enfoque de gestión de residuos existe?	“Waste management” OR “Waste treatment” OR “Waste disposal” OR “Waste minimization” OR “Waste reduction” OR “Waste collection” OR “Waste handling”
O	¿Cuánto aumento hay en la tasa de recuperación u reciclaje?	“Recycling” OR “Reuse” OR “Recycling rate” OR “recovery rate” OR “material recovery” OR “waste recovery” OR “waste recycling” OR “recyclability” OR “waste recovery” OR “resource recovery” OR “zero waste”

A partir de estas palabras clave se construyó una ecuación de búsqueda, la cual fue aplicada en la base de datos mencionada. Esta ecuación combinó los términos definidos con operadores booleanos (AND, OR, NOT) para garantizar una recuperación eficiente y precisa de los artículos relevantes. La ecuación de búsqueda utilizada fue la siguiente: (“Electronic equipment” OR “Electronic equipment” OR “Electrical

appliances” OR “Electronic appliances” OR “WEEE” OR “Waste electrical and electronic equipment” OR “Electrical and electronic waste” OR “Electronic scrap” OR “Obsolete electronic equipment” OR “Electronic waste recycling” OR “Electronic waste disposal” OR “Electronic hazardous waste” OR “Electronic waste” OR “E-Waste”) AND (“Reverse Logistics” OR “Green Logistics” OR “Returns Logistics” OR “Waste Logistics” OR “Sustainable Logistics” OR “Eco-Logistics” OR “Responsible Logistics” OR “Reverse Supply Chain” OR “Closed-Loop Supply Chain” OR “Returns Management” OR “Remanufacturing” OR “Refurbishment” OR “Environmental Technology” OR “Circular Economy”) AND (“Waste management” OR “Waste treatment” OR “Waste disposal” OR “Waste minimization” OR “Waste reduction” OR “Waste collection” OR “Waste handling”) AND (“Recycling” OR “Reuse” OR “Recycling rate” OR “recovery rate” OR “material recovery” OR “waste recovery” OR “waste recycling” OR “recyclability” OR “waste recovery” OR “resource recovery” OR “zero waste”)

## B. Metodología PRISMA

Se aplicó la metodología PRISMA, la cual permitió estructurar el proceso de selección de publicaciones científicas a través de una secuencia sistemática de pasos que incluye: identificación, cribado (screening) y selección final de artículos, como se muestra en la Fig. 1, esta metodología asegura la trazabilidad, transparencia y reproducibilidad en la elaboración de revisiones sistemáticas.

El proceso inició con la identificación, mediante la aplicación de la ecuación de búsqueda en la base de datos Scopus, lo cual arrojó un total de 785 documentos sin aplicar filtros previos. Estos resultados fueron exportados en formato CSV y convertidos posteriormente a formato Excel, con el fin de facilitar la organización y análisis de los registros en las etapas siguientes.

En la fase de cribado, se excluyeron 306 registros que no correspondían a artículos científicos, entre ellos: 129 revisiones, 96 actas de conferencias y 70 libros. De esta forma, se conservaron 479 artículos para la siguiente etapa.

Posteriormente, se aplicaron filtros adicionales. Se descartaron 280 artículos debido a que no estaban disponibles en acceso abierto, lo cual dificultaba su revisión completa y análisis detallado. Con ello, se redujo el conjunto de documentos a 199 artículos.

En la etapa final de selección, se utilizaron criterios de exclusión más específicos: Se excluyeron 42 artículos por superar el umbral de antigüedad establecido (más de cinco años desde su publicación). Asimismo, se excluyó un artículo por no estar disponible en los idiomas considerados para esta revisión (español o inglés).

Finalmente, se excluyeron 95 artículos cuyo contenido no abordaba explícitamente temas relacionados con logística

inversa, economía circular o cadena de suministro aplicada a los RAEE. Como resultado final, se seleccionaron 61 artículos científicos que cumplieron con todos los criterios de inclusión establecidos, y que constituyen la base documental de esta revisión sistemática, tal como se muestra en la Fig. 1.

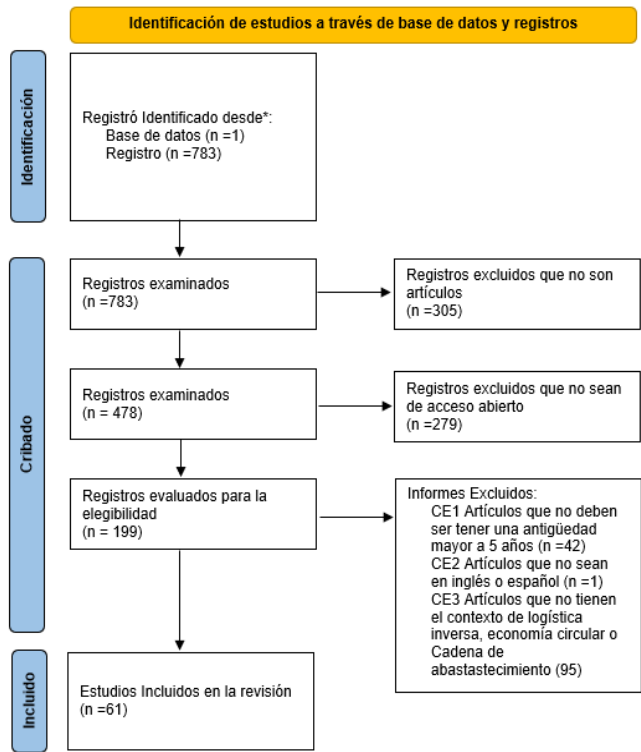


Fig. 1 Diagrama Prisma

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. Origen geográfico de los artículos estudiados

Después de analizar los artículos revisados Se agrupó según los países de origen. La India destaca como el país con mayor número de publicaciones, con un total de 11 artículos. Le siguen China con 9 y Brasil con 7 artículos respectivamente, Noruega ocupa el cuarto lugar con 5 publicaciones, mientras que Suiza, Inglaterra e Italia registraron 4 artículos cada uno. Estos países representan los principales contribuyentes en el desarrollo de investigaciones relacionadas con los RAEE. En contraste, países como Kenia, Taiwán, Estados Unidos, Nepal, Indonesia, Alemania, México, Singapur, Vietnam, Arabia Saudita, Tailandia, Finlandia, Ucrania, Egipto, Malasia y Bélgica, sólo cuentan con una publicación cada uno en este ámbito, como se visualiza en la Fig. 2. Cabe destacar que en 8 casos los artículos fueron desarrollados de forma conjunta entre dos países. Además, uno de los artículos abordó el tema desde una perspectiva continental, abarcando en su totalidad el continente europeo.

El análisis geográfico de los artículos revisados permitió identificar una marcada concentración de investigaciones en

países asiáticos y europeos, destacando China, India, Brasil y Alemania. Esta distribución revela que los estudios sobre logística inversa de RAEE se desarrollan con mayor intensidad en regiones donde existe una fuerte presión industrial, infraestructura técnica y regulación ambiental consolidada [8], [9], [10]. En contraste, la baja representación de países de América Latina (exceptuando Brasil) evidencia una limitación en la producción científica regional, lo que coincide con lo señalado por Oliveira Neto et al. [3], quienes destacan las barreras estructurales, la informalidad y la falta de incentivos como limitantes clave en contextos latinoamericanos infraestructura técnica y regulación ambiental consolidada [8], [9], [10].

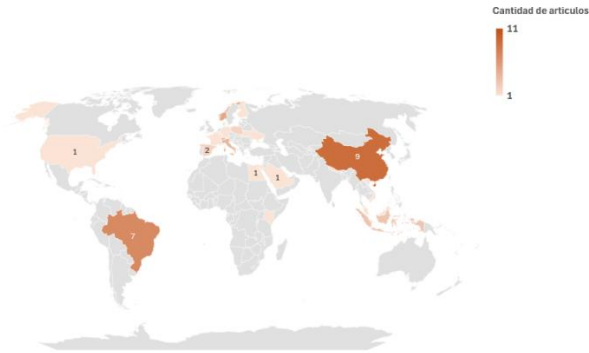


Fig. 2 Artículos según el país de origen

#### B. Numero de artículos según año de publicación

Con el fin de analizar la distribución temporal de los estudios revisados, se agrupó la cantidad de artículos según su año de publicación. Se identificó que la mayor concentración de literatura corresponde al año 2024 con 18 artículos, mientras que el menor número fue el 2020 con 5. En total, se analizaron 61 artículos, como se muestra en la Fig. 3.

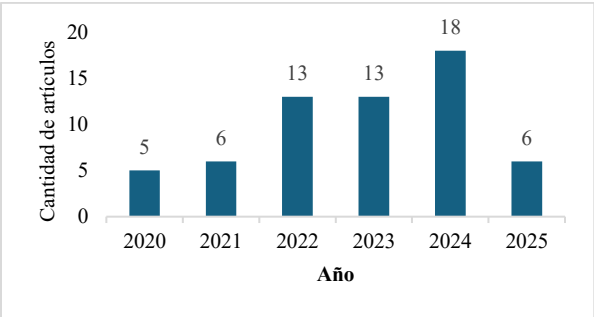


Fig. 3 Numero de artículos según año de publicación

En cuanto a la evolución anual de las publicaciones, los datos muestran un aumento sostenido en la producción académica, alcanzando su punto más alto en 2024. Este incremento podría responder al auge global de políticas de economía circular, avances en tecnologías de reciclaje y mayor preocupación por los impactos ambientales de los residuos

electrónicos, también el interés por la sostenibilidad y la digitalización de los procesos logísticos [11], [12]. Estudios como los de Pan et al. [4] y Mallick et al. [5] refuerzan esta idea al demostrar que los avances tecnológicos en herramientas de trazabilidad e inteligencia logística han impulsado tanto la investigación como la implementación de modelos aplicados. Este incremento podría evidenciar una tendencia hacia la diversificación temática dentro del campo de la logística inversa, abordando aspectos económicos, ambientales y sociales.

### C. Tipos de RAEE y sus materiales recuperables

A partir del análisis de los artículos revisados, fue posible identificar una diversidad de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos que han sido estudiados en diferentes contextos. Estos RAEE se clasifican en categorías como computadoras, teléfonos móviles, televisores y monitores, electrodomésticos y equipos mixtos. Cada uno de estos tipos presenta características particulares en cuanto a los materiales que pueden recuperarse durante los procesos de reciclaje, lo cual resulta clave para el diseño de estrategias de valorización.

TABLA II  
TIPOS DE RESIDUOS ELECTRÓNICOS SEGÚN LOS MATERIALES  
RECUPERABLES

Tipos de RAEE	Materiales recuperables	Artículos Relacionados
Computadoras	Oro, Plata, Platino, Paladio, Cobre, Aluminio, Plásticos, Placas de circuito, PCBs, Vidrio	[5], [8], [9], [10], [11], [12], [13], [14], [15], [16], [17], [18], [19]
Teléfonos móviles	Oro, Plata, Paladio, Cobre, Aluminio, Placas de circuito, Plásticos	[20], [21], [22], [23], [24], [25], [26], [27], [28], [29], [30]
Televisores, Monitores	Vidrio (panel y funnel en CRT), Hierro, Aluminio, Cobre, Plomo, Mercurio, Plásticos	[31], [32], [33], [34]
Electrodomésticos	Hierro, Acero, Aluminio, Plásticos, Cableado de cobre, Vidrio	[35], [36], [37], [34], [38]
Equipos mixtos	Oro, Plata, Paladio, Cobre, Aluminio, Hierro, Cobalto, Indio, Níquel, Plásticos, Vidrio	[39], [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [3], [1], [4]
Otros	Materiales varios	[51], [52], [53], [54], [55], [55], [56], [57], [58], [2]

En la Tabla II se detalla los principales tipos de RAEE identificados, los materiales que se pueden extraer de ellos (como metales preciosos, comunes, plásticos o vidrio) y la

cantidad de artículos que abordan específicamente cada categoría. Esta clasificación permite tener una visión más clara del potencial de recuperación de materiales valiosos y de la recurrencia de ciertos dispositivos electrónicos en los estudios académicos.

El análisis de los tipos de RAEE evidencia que computadoras y teléfonos móviles son los dispositivos más abordados en la literatura, debido a su alto contenido de metales preciosos como oro, plata y paladio, así como cobre, aluminio y plásticos [3], [4], [21], [23]. Esta concentración temática se explica por su valor económico y por la disponibilidad tecnológica para su desensamble y procesamiento [1], [5]. En contraste, dispositivos como televisores o electrodomésticos grandes incluyen materiales como vidrio, hierro, plomo y plásticos, que, si bien son más abundantes, presentan menores márgenes de recuperación rentable y mayor complejidad técnica [32], [34], [37]. Los artículos que abordan equipos mixtos destacan por ofrecer una visión más integral del flujo de materiales, incluyendo tierras raras, cobalto o indio, lo cual plantea nuevos retos para su tratamiento [39], [9], [10]. Esta diversidad de residuos y materiales evidencia que la eficiencia en la logística inversa no solo depende del tipo de RAEE, sino también del nivel de infraestructura, del conocimiento técnico y del enfoque adoptado en cada estudio. Mientras algunos trabajos, como el de Oliveira Neto et al. [3], proponen sistemas diferenciados por tipo de equipo, otros como Lopes dos Santos [36] abogan por estrategias integradas que maximicen la recuperación total sin importar la categoría del residuo.

### D. Materiales recuperados según los artículos revisados

A partir de la revisión de los artículos, se identificó los materiales más recuperados en los procesos de valorización de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Como se puede observar en la Fig. 4, los metales preciosos (como oro, plata y paladio) representan el grupo más mencionado, con un 27% del total. Esto se debe a su alto valor y su presencia en componentes clave como circuitos impresos. Le sigue de cerca el cobre, con un 21%, destacado por su volumen de uso y valor en el reciclaje industrial. En tercer lugar, con un 18%, se agrupan los metales ferrosos y no ferrosos (como hierro, aluminio y acero), comúnmente recuperados de electrodomésticos y grandes aparatos. Los plásticos, con un 12%, y el vidrio, con un 8%, también aparecen como materiales de recuperación relevante. Un grupo más específico como los componentes electrónicos o PCBs representa el 2%, debido a los procesos técnicos que requiere su recuperación. Finalmente, se identifican materiales como las tierras raras y metales críticos (8%) y una categoría residual de no especificado o inferido (4%), que incluyen artículos que no detallan claramente un solo material predominante.

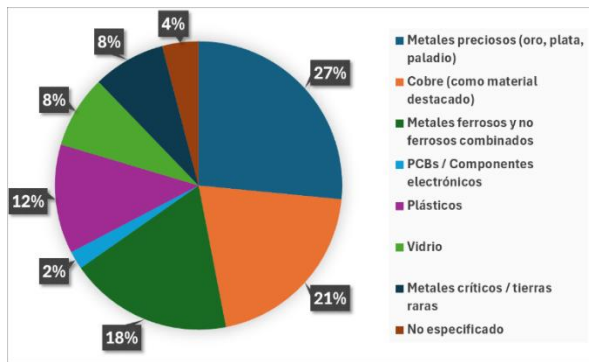


Fig. 4 Materiales recuperados según los artículos

Los materiales más recuperados son principalmente los metales preciosos y el cobre, lo cual responde tanto a su alto valor económico como a su relevancia funcional en los componentes electrónicos. Autores como Wu et al. [1] y Muhammad et al. [2] coinciden en que el oro y la plata son elementos clave en la economía circular debido a su capacidad de ser reciclados múltiples veces sin perder calidad. A ello se suma la constante presencia del cobre, señalado en estudios como los de Oliveira Neto et al. [3] y Vargas et al. [44], como el material más recuperado por su volumen y valor en la industria de recuperación, especialmente en países donde la informalidad aún predomina. También se observa que investigaciones centradas en regiones con tecnologías más avanzadas tienden a aprovechar los materiales raros o de alto valor económico mediante procesos complejos y automatizados [51], [59], mientras que en países con cadenas de reciclaje menos formalizadas se recuperan materiales con base en el acceso operativo más que en la selectividad técnica [37], [32]. Además, algunos artículos señalan explícitamente la dificultad para recuperar materiales específicos como PCBs, debido a la falta de tecnología y conocimiento técnico [50], [25]. Esta disparidad en prioridades y capacidades sugiere que la gestión de RAEE debe adaptarse al contexto productivo, económico y social de cada país, buscando un equilibrio entre viabilidad técnica, rentabilidad y sostenibilidad ambiental.

#### E. Metodologías más utilizadas y sus beneficios en los artículos revisados

A partir del análisis de los artículos revisados, se identificaron diversas metodologías aplicadas al estudio de la logística inversa en la recuperación de RAEE. Estas metodologías fueron agrupadas por similitud de enfoque o propósito analítico. El objetivo de esta clasificación es comprender cómo contribuyen dichas metodologías a mejorar los procesos de recolección, reciclaje y gestión de residuos electrónicos. En la Tabla III se presentan las metodologías más utilizadas, acompañadas de una breve explicación sobre su utilidad e impacto dentro del contexto investigado. Se incluyen enfoques como el análisis bibliométrico, que permite mapear el estado del conocimiento y orientar futuras investigaciones; el análisis de ciclo de vida (LCA), que proporciona una visión

integral del impacto ambiental de los RAEE; y los análisis estadísticos, que apoyan la toma de decisiones basadas en datos cuantitativos.

TABLA III  
METODOLOGÍAS Y BENEFICIOS

Metodología	Beneficios de su aplicación	Artículo referenciado
Análisis biométrico	Ayuda a mejorar la logística inversa mediante la implementación de sistemas de gestión de residuos electrónicos más eficaces, sostenibles y adecuados al contexto y regulaciones locales.	[41], [43], [18], [57], [59], [50], [56], [58]
Análisis de Ciclo de vida (LCA)	Favorece un reciclaje más eficiente, minimiza el impacto ambiental y respalda decisiones sostenibles con equilibrio entre costos y beneficios.	[50], [14]
Análisis estadísticos	El análisis estadístico brinda una base clave para optimizar la logística inversa de RAEE, al mejorar la eficiencia, reducir costos e impactos ambientales y fomentar una gestión alineada con la economía circular	[21], [47], [44]
Diagnóstico y evaluación operativa	Analiza contextos reales de gestión de RAEE para identificar fallas, oportunidades de mejora y diseñar soluciones adaptadas.	[5], [40], [21], [13], [14], [46], [25], [30], [38]
Modelos matemáticos de optimización	Estas metodologías facilitan rutas adaptables, mejoran la recolección y recuperación de residuos, reducen tiempos operativos y resultan económicamente sostenibles.	[10], [20], [41], [33], [34]
Tecnologías de Rastreo GPS	Permite el rastreo en tiempo real de RAEE, optimiza la gestión y las rutas, reduce costos y fortalece la trazabilidad, el cumplimiento de normas y la economía circular.	[16]
No se usó una metodología en específico	La ausencia de una metodología específica en estos artículos se debe a que su enfoque principal es identificar y describir las deficiencias en la recolección de RAEE, en lugar de plantear soluciones directas.	[31], [8], [9], [60], [10], [12], [13], [40], [44], [52], [37], [24], [48], [18], [27], [33], [61], [53], [62], [38], [63], [28], [29], [64], [19], [54], [30], [65], [55], [49]



Asimismo, se destaca que una proporción significativa de los artículos no aplica una metodología formal específica, centrando su contenido en la descripción de problemáticas actuales o análisis cualitativos de contexto.

El análisis de las metodologías aplicadas en los estudios sobre logística inversa de RAEE revela diferencias notables entre los enfoques utilizados por los autores. Por un lado, algunos estudios priorizan el análisis biométrico para entender el comportamiento de los residuos y planificar estrategias de gestión más informadas [37], [9], [55], [57], mientras que otros optan por el análisis de ciclo de vida (LCA), que se centra en evaluar los impactos ambientales a lo largo de todo el proceso de recuperación [11], [49]. Estas diferencias no solo responden a los objetivos de cada investigación, sino también a la madurez tecnológica y regulatoria de los contextos estudiados.

Además, mientras autores como Yahya et al. [34] aplican modelos matemáticos de optimización para diseñar cadenas logísticas eficientes, otros como Oliveira Neto et al. [3] y Vargas et al. [44] optan por diagnósticos operativos que analizan casos reales para proponer mejoras contextuales. Incluso dentro de enfoques similares, como el análisis estadístico, algunos estudios se orientan a evaluar tasas de recolección [23], mientras que otros modelan tendencias futuras o variables sociales [10], [33]. Esta heterogeneidad metodológica refleja cómo los autores interpretan de manera distinta las necesidades del sistema de recuperación de RAEE según sus prioridades locales.

#### *F. Tipología de enfoques y sus ventajas según los artículos estudiados*

A partir del análisis de los artículos, se identificaron distintos enfoques generales aplicados a la gestión y recuperación de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). Estos enfoques fueron clasificados según su orientación estratégica, tecnológica, económica, normativa o social, con el propósito de examinar cómo contribuyen a mejorar los procesos de recolección, reciclaje y valorización de estos residuos en diversos contextos. Esta clasificación no solo permite identificar las prioridades de intervención de cada enfoque, sino también comprender sus alcances, limitaciones y aportes concretos a la sostenibilidad. En la Tabla IV se presentan las principales ventajas asociadas a enfoques como la economía circular, la gestión sostenible y colaborativa, la innovación tecnológica, la logística inversa, el enfoque sistémico, el modelo de Responsabilidad Extendida del Productor (REP) y el marco regulatorio. Cada uno de estos enfoques contribuye a la optimización de procesos, la reducción de impactos ambientales y el fortalecimiento institucional. Asimismo, se incluyen estrategias complementarias como el reciclaje de baterías, el uso de biomateriales, y la responsabilidad ambiental ciudadana, orientadas a reducir la dependencia de recursos naturales y fomentar prácticas sostenibles. Cabe señalar que algunos artículos no adoptan un enfoque metodológico específico, centrándose solo en análisis cualitativo de contextos locales.

TABLA IV  
ENFOQUES Y SUS VENTAJAS

Tipo de enfoque general	Ventajas en la recuperación de RAEE	Artículos asociados
Economía circular (y variantes: circular, gestión circular, etc.)	Estrategias de clasificación avanzada y optimización de procesos de reciclaje., reducción de impactos y la promoción de la sostenibilidad.	[32], [7], [9], [22], [14], [43], [44], [15], [46], [47], [24], [25], [16], [17], [18], [61], [53], [62], [38], [63], [29], [64], [38], [64], [55], [56], [58], [3], [4]
Gestión sostenible y colaborativa de RAEE	Fortalecer la cooperación, las políticas y la infraestructura permite una gestión más eficiente, sostenible y de bajo impacto ambiental.	[13], [15], [35], [41]
Enfoque técnico/tecnológico/operativo o de innovación	Recuperación de materiales más eficiente, reducción de residuos, optimización de inversiones y definición de la mejor combinación tecnológica, con beneficios económicos y tecnológicos	[11], [45], [8], [39], [25]
Enfoque sistémico / holístico / de ciclo de vida / integral	Mejora procesos, reduce impactos, promueve políticas sostenibles y favorece la recuperación de recursos, el empleo formal, la trazabilidad y la inclusión social.	[51], [18], [19], [31]
Logística inversa (incluye gestión logística, rutas, PROs)	Mejora la trazabilidad, reduce costos y emisiones, y aumenta la recuperación de materiales. Además, fortalece la economía circular, impulsa la generación de empleo y promueve la sostenibilidad tanto ambiental como social.	[48], [33], [36], [43], [1]
Enfoque estratégico / cuantitativo-estratégico	Reducción de residuos, recuperación de materiales y promoción del desarrollo sostenible con beneficios económicos, flexibilidad operativa y procesos formalizados.	[17], [26], [10]
Enfoque basado en REP (Responsabilidad Extendida del Productor)	Productos más sostenibles, mejora la recolección y recuperación de materiales, reduce impactos ambientales y fomenta la formalización del reciclaje.	[40], [52], [32], [54]
Enfoque macroeconómico o regulatorio: políticas, incentivos y marco legal para la gestión de RAEE	Favorece el cumplimiento de la normativa, la recuperación de recursos, la atracción de inversiones verdes, la eficiencia en la cadena de valor y la innovación para fortalecer la economía circular.	[44], [50]
Estrategias sostenibles: reciclaje de baterías, reutilización y biomateriales	Reduce la contaminación, los costos y el consumo energético, al tiempo que aprovecha materiales útiles y disminuye la dependencia de recursos naturales.	[37], [57]
Comportamiento social /	Reduce impactos en salud y ambiente, mejora la recuperación de recursos y apoya el diseño de	[28], [58]

responsable ambiental	políticas para una gestión más sostenible de los RAEE.	
No se usó un enfoque en específico	Los artículos priorizan la comprensión contextual sobre la adopción de un enfoque metodológico fijo.	[60], [9]

Mientras estudios realizados en países del sur global tienden a incorporar elementos de economía informal o inclusión social [3], [42], en regiones más industrializadas se enfatiza la innovación y la automatización como eje de mejora [12], [61]. Por otro lado, se observan coincidencias entre los enfoques basados en economía circular [4], [43], [11], [22], [41] y aquellos centrados en responsabilidad extendida del productor (REP) [22], [31], [53], ya que ambos promueven la sostenibilidad y la reducción de impactos a través de una reconfiguración de la cadena productiva. Sin embargo, mientras el primero plantea una transformación estructural del modelo económico, el segundo se enfoca más en los deberes del fabricante en la fase posconsumo. Autores como Oliveira Neto et al. [3] proponen un enfoque de gestión colaborativa, que busca fortalecer las relaciones entre actores institucionales, mientras que otros, como Constantinescu et al. [50], insisten en la necesidad de incentivos regulatorios y marcos normativos claros para lograr resultados sostenibles. Esta coexistencia de enfoques sugiere que no existe un modelo único aplicable a todos los contextos, sino que cada territorio requiere una combinación de estrategias ajustada a su realidad.

#### IV. CONCLUSIONES

Después de revisar 61 artículos recientes, se pudo observar que las metodologías más comunes fueron los diagnósticos y evaluaciones operativas, los modelos matemáticos y los análisis biométricos, lo que demuestra un interés creciente por mejorar la eficiencia de los procesos de recuperación de materiales.

Uno de los hallazgos más importantes fue que los materiales más recuperados en los RAEE son el cobre y los metales preciosos como oro, plata y paladio, debido a su alto valor económico. También se identificaron diferencias en la aplicación de metodologías según el contexto regional mientras que en países desarrollados se aplican tecnologías avanzadas, en regiones como Latinoamérica todavía existen muchas barreras que limitan su implementación adecuada.

La revisión permitió organizar y comparar diferentes enfoques sobre la gestión de RAEE, lo cual representa una contribución importante para comprender mejor el estado actual de esta problemática. En general, este trabajo ofrece una base útil para entender qué metodologías se están utilizando y qué materiales se priorizan en los procesos de recuperación de residuos electrónicos.

Finalmente, en futuras investigaciones, sería importante desarrollar modelos más completos que integren tecnología, participación ciudadana y economía circular. También se debería avanzar en establecer indicadores estandarizados que midan realmente el éxito de los sistemas de logística inversa, como tasas de recuperación, trazabilidad o impacto económico

y ambiental. Esto permitiría tener una base más sólida para comparar y mejorar las estrategias de gestión de RAEE en distintos contextos.

#### REFERENCIAS

- [1] Y. Wu *et al.*, “multi-time scale aware host task preferred learning for weee return prediction,” mar. 15, 2024, *Elsevier Ltd.* Doi: 10.1016/j.eswa.2023.122160.
- [2] A. Muhammad, m. Z. S. M. Hussein, m. H. Zulfakar, and v. P. K. Sundram, “the study of environmentally responsible behaviour in household electronic waste reverse logistics: a systematic review,” *Malaysian journal of consumer and family economics*, vol. 32, pp. 515–549, 2024, doi: 10.60016/majcafe.v32.20.
- [3] J. F. De oliveira neto, a. P. S. Souza, m. Mendonça silva, s. Machado santos, and I. Florencio, “critical barriers to material recovery from e-waste in brazil,” *Journal of hazardous materials advances*, vol. 17, feb. 2025, doi: 10.1016/j.hazadv.2024.100562.
- [4] X. Pan, c. W. Y. Wong, and c. Li, “circular economy practices in the waste electrical and electronic equipment (weee) industry: a systematic review and future research agendas,” sep. 10, 2022, *Elsevier Ltd.* Doi: 10.1016/j.jclepro.2022.132671.
- [5] P. K. Mallick, k. B. Salling, d. C. A. Pigosso, and t. C. Mcaloon, “towards a circular economy: development of a support tool for designing reverse logistics systems,” *J environ manage*, vol. 351, feb. 2024, doi: 10.1016/j.jenvman.2023.119819.
- [6] E. J. Chocobar reyes and r. F. Barreda medina, “estructuras metodológicas pico y prisma 2020 en la elaboración de artículos de revisión sistemática: lo que todo investigador debe conocer y dominar,” *ciencia latina revista científica multidisciplinar*, vol. 9, no. 1, pp. 8525–8543, mar. 2025, doi: 10.37811/cl\_rcm.v9i1.16491.
- [7] M. J. Page *et al.*, “the prisma 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews,” mar. 29, 2021, *bmj publishing group*. Doi: 10.1136/bmj.n71.
- [8] D. Franke, t. Suponik, p. M. Nuckowski, k. Golombek, and k. Hyra, “recovery of metals from printed circuit boards by means of electrostatic separation,” *management systems in production engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 213–219, 2020, doi: 10.2478/mspe-2020-0031.
- [9] A. Khanal, p. Sherpa, p. Chataut, a. Khanal, and s. Giri, “transforming e-waste management: challenges and opportunities,” *international research journal of multidisciplinary technovation*, vol. 6, no. 2, pp. 108–115, 2024, doi: 10.54392/irjmt2429.
- [10] A. K. Awasthi *et al.*, “assessing strategic management of e-waste in developing countries,” *sustainability (switzerland)*, vol. 15, no. 9, 2023, doi: 10.3390/su15097263.
- [11] Y.-Y. Chen, p. Pourhejazy, and t.-n. Liu, “line balancing problem with multi-manned workstations and resource constraints: the case of electronics waste disassembly,” *Cleaner logistics and supply chain*, vol. 10, 2024, doi: 10.1016/j.clscn.2023.100129.
- [12] C. Chaine, m. M. Errandonea, and b. M. Vega, “advancing waste electrical and electronic equipment (weee) recycling: a random forest approach to classifying weee plastics for sustainable waste management,” *Environments - mdpi*, vol. 12, no. 2, 2025, doi: 10.3390/environments12020068.
- [13] V. Heinrich, h. Bansal, and m. Fröhling, “electronic waste management in northern india: a regional case study of chandigarh,” *j mater cycles waste manag*, vol. 27, no. 3, pp. 1944–1961, 2025, doi: 10.1007/s10163-025-02194-8.
- [14] S. Goyal and s. Gupta, “a comprehensive review of current techniques, issues, and technological advancements in sustainable e-waste management,” *e-prime - advances in electrical engineering, electronics and energy*, vol. 9, 2024, doi: 10.1016/j.prime.2024.100702.
- [15] I. Pongen, p. Ray, and k. Govindan, “creating a sustainable closed-loop supply chain: an incentive-based contract with third-party e-waste collector,” *j clean prod*, vol. 462, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142351.



- [16] W. A. Bagwan, "electronic waste (e-waste) generation and management scenario of india, and arima forecasting of e-waste processing capacity of maharashtra state till 2030," *waste management bulletin*, vol. 1, no. 4, pp. 41–51, 2024, doi: 10.1016/j.wmb.2023.08.002.
- [17] S. Vennila and k. Karthikeyan, "an eoq model for circularity index with waste minimization and reduced emission in electrical and electronic equipment," *contemporary mathematics (singapore)*, vol. 5, no. 3, pp. 3002–3037, 2024, doi: 10.37256/cm.5320244381.
- [18] A. Frantz schneider, m. Aanestad, and t. C. Carvalho, "exploring barriers in the transition toward an established e-waste management system in brazil: a multiple-case study of the formal sector," *environ dev sustain*, 2024, doi: 10.1007/s10668-024-05188-y.
- [19] J. Hsu, j. Wang, and m. Stern, "e-waste: a global problem, its impacts, and solutions," *journal of global information management*, vol. 32, no. 1, 2024, doi: 10.4018/jgim.337134.
- [20] D. Sengupta, i. M. S. K. Ilankoon, k. D. Kang, and m. N. Chong, "circular economy and household e-waste management in india. Part ii: a case study on informal e-waste collectors (kabadiwalas) in india," *miner eng*, vol. 200, 2023, doi: 10.1016/j.mineng.2023.108154.
- [21] G. T. Nguyen, t. T. K. Lam, and n. T. H. Huynh, "assessment of e-waste management and potential for laptop reuse and recycling," *Civil engineering journal (iran)*, vol. 9, no. 6, pp. 1471–1481, 2023, doi: 10.28991/cej-2023-09-06-013.
- [22] A. Mangmeechai, "the life-cycle assessment of greenhouse gas emissions and life-cycle costs of e-waste management in thailand," *sustainable environment research*, vol. 32, no. 1, 2022, doi: 10.1186/s42834-022-00126-x.
- [23] J. L. R. Brito, m. S. Ruiz, c. T. Kniess, and m. R. Santos, "reverse remanufacturing of electrical and electronic equipment and the circular economy," *revista de gestao*, vol. 29, no. 4, pp. 380–394, 2022, doi: 10.1108/rege-02-2020-0011.
- [24] S. Naik and j. Satya eswari, "electrical waste management: recent advances challenges and future outlook," *total environment research themes*, vol. 1–2, 2022, doi: 10.1016/j.totert.2022.100002.
- [25] P. Phogat, s. Kumar, and m. Wan, "a scientometrics study of advancing sustainable metal recovery from e-waste: processes, challenges, and future directions," *rsc sustainability*, 2025, doi: 10.1039/d5su00049a.
- [26] D. Puspita sari, n. Aini masruroh, and a. M. Sri asih, "economic and environmental benefits of e-waste management networks design in yogyakarta province, indonesia," *journal of industrial engineering and management*, vol. 17, no. 1, pp. 292–320, 2024, doi: 10.3926/jiem.6651.
- [27] K. R. Mattson, l. L. Lauritsen, and j. B. Pettersen, "electronic waste treatment flows in norway: investigating recycling rates and embodied emissions," *detritus*, vol. 25, pp. 54–64, 2023, doi: 10.31025/2611-4135/2023.18331.
- [28] C. J. C. Jabbour, a. Colasante, i. D'adamo, p. Rosa, and c. Sassanelli, "comprehending e-waste limited collection and recycling issues in europe: a comparison of causes," *J clean prod*, vol. 427, 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.139257.
- [29] M. Tan, f. Pei, l. He, h. Cheng, and s. Huang, "optimal decision-making of closed-loop supply chains in e-commerce platform considering sales cooperations under environmental effects and weee regulations," *Int j environ res public health*, vol. 20, no. 9, 2023, doi: 10.3390/ijerph20095724.
- [30] I. D. Williams and o. S. Shittu, "development of sustainable electronic products, business models and designs using circular economy thinking," *Detritus*, vol. 21, pp. 45–54, 2022, doi: 10.31025/2611-4135/2022.16228.
- [31] R. Kahhat, t. R. Miller, s. Ojeda-benitez, s. E. Cruz-sotelo, j. Jaureguiesma, and m. Gusukuma, "proposal for used electronic products management in mexicali," *Resources, conservation and recycling advances*, vol. 13, 2022, doi: 10.1016/j.rcradv.2022.200065.
- [32] S. M. Santos and o. A. Ogunseitan, "e-waste management in brazil: challenges and opportunities of a reverse logistics model," *environ technol innov*, vol. 28, 2022, doi: 10.1016/j.eti.2022.102671.
- [33] D. P. Sari, n. A. Masruroh, and a. M. S. Asih, "extended maximal covering location and vehicle routing problems in designing smartphone waste collection channels: a case study of yogyakarta province, indonesia," *sustainability (switzerland)*, vol. 13, no. 16, 2021, doi: 10.3390/su13168896.
- [34] T. B. Yahya, n. M. Jamal, b. Sundarakani, and s. Z. Omain, "factors affecting mobilewaste recycling through rscm: a literature review," *recycling*, vol. 6, no. 2, 2021, doi: 10.3390/recycling6020030.
- [35] S. Miao, d. Liu, j. Ma, and f. Tian, "system dynamics modelling of mixed recycling mode based on contract: a case study of online and offline recycling of e-waste in china," *math comput model dyn syst*, vol. 26, no. 3, pp. 234–252, 2020, doi: 10.1080/13873954.2020.1762096.
- [36] K. Lopes dos santos, "the recycling of e-waste in the industrialised global south: the case of sao paulo macrometropolis," *international journal of urban sustainable development*, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1080/19463138.2020.1790373.
- [37] P. Shi *et al.*, "direct reuse of electronic plastic scraps from computer monitor and keyboard to direct stem cell growth and differentiation," *science of the total environment*, vol. 807, 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151085.
- [38] P. Nowakowski, k. Szwarc, and u. Boryczka, "combining an artificial intelligence algorithm and a novel vehicle for sustainable e-waste collection," *science of the total environment*, vol. 730, 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138726.
- [39] E. Álvarez-de-los-mozos, a. Rentería-bilbao, and f. Díaz-martín, "weee recycling and circular economy assisted by collaborative robots," *applied sciences (switzerland)*, vol. 10, no. 14, 2020, doi: 10.3390/app10144800.
- [40] G. Jayasiri, s. Herat, and p. Kaparaju, "repair and reuse or recycle: what is best for small weee in australia?," *sustainability (switzerland)*, vol. 16, no. 7, 2024, doi: 10.3390/su16073035.
- [41] T. Mahanth, c. R. Suryasekaran, s. G. Ponnambalam, b. Sankaranarayanan, k. Karuppiiah, and i. E. Nielsen, "modelling the barriers to circular economy practices in the indian state of tamil nadu in managing e-wastes to achieve green environment," *sustainability (switzerland)*, vol. 15, no. 5, 2023, doi: 10.3390/su15054224.
- [42] A. Aminoff and h. Sundqvist-andberg, "constraints leading to system-level lock-ins—the case of electronic waste management in the circular economy," *j clean prod*, vol. 322, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129029.
- [43] W. Sterkens and j. R. Peeters, "selection for reuse in weee reverse logistics with text-based model identification," in *procedia cirp*, elsevier b.v., 2024, pp. 813–818. Doi: 10.1016/j.procir.2024.01.114.
- [44] d. B. Vargas, l. M. D. S. Campos, and m. M. M. Luna, "brazil's formal e-waste recycling system: from disposal to reverse manufacturing," *sustainability (switzerland)*, vol. 16, no. 1, 2024, doi: 10.3390/su16010066.
- [45] M. Cottes, m. Mainardis, and p. Simeoni, "assessing the techno-economic feasibility of waste electric and electronic equipment treatment plant: a multi-decisional modeling approach," *sustainability (switzerland)*, vol. 15, no. 23, 2023, doi: 10.3390/su152316248.
- [46] G. Jayasiri, s. Herat, and p. Kaparaju, "management of small weee: future directions for australia," *sustainability (switzerland)*, vol. 15, no. 18, 2023, doi: 10.3390/su151813543.
- [47] P. Ghisellini, i. Quinto, r. Passaro, and s. Ulgiati, "circular economy management of waste electrical and electronic equipment (weee) in italian urban systems: comparison and perspectives," *sustainability (switzerland)*, vol. 15, no. 11, 2023, doi: 10.3390/su15119054.
- [48] G. C. D. O. Neto, a. D. J. C. Correia, h. N. P. Tucci, r. A. P. B. Melatto, and m. Amorim, "reverse chain for electronic waste to promote circular economy in brazil: a survey on electronics manufacturers and importers," *sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 5, 2023, doi: 10.3390/su15054135.
- [49] A. Alkough, k. A. Keddar, and s. Alatefi, "remanufacturing of industrial electronics: a case study from the gcc region," *electronics (Switzerland)*, vol. 12, no. 9, 2023, doi: 10.3390/electronics12091960.

- [50] A. Constantinescu, v. Platon, m. Surugiu, s. Frone, d. Antonescu, and r. Mazilescu, "the influence of eco-investment on e-waste recycling-evidence from eu countries," *Front environ sci*, vol. 10, 2022, doi: 10.3389/fenvs.2022.928955.
- [51] B. Fritz and m. Schmidt, "climate change vs. Circular economy: challenges of the most common route for recycling gold from weee," *sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 5, 2025, doi: 10.3390/su17052086.
- [52] A. F. Schneider and x. Zeng, "investigations into the transition toward an established e-waste management system in china: empirical evidence from guangdong and shaanxi," *current research in environmental sustainability*, vol. 4, 2022, doi: 10.1016/j.crsust.2022.100195.
- [53] D. Hidalgo-carvajal and r. Carrasco-gallego, "preparing for future e-waste from photovoltaic modules: a circular economy approach," *international journal of production management and engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 131–141, 2022, doi: 10.4995/ijpme.2022.16712.
- [54] T. Andersen, b. Jæger, and a. Mishra, "circularity in waste electrical and electronic equipment (weee) directive. Comparison of a manufacturer's danish and norwegian operations," *sustainability (switzerland)*, vol. 12, no. 13, 2020, doi: 10.3390/su12135236.
- [55] A. M. Elgarahy *et al.*, "revitalizing the circular economy: an exploration of e-waste recycling approaches in a technological epoch," *sustainable chemistry for the environment*, vol. 7, 2024, doi: 10.1016/j.scenv.2024.100124.
- [56] M. K. Islam, m. S. Khatun, and m. Mourshed, "an in-depth analysis and review of management strategies for e-waste in the south asian region: a way forward towards waste to energy conversion and sustainability," *heliyon*, vol. 10, no. 7, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e28707.
- [57] L. Toro *et al.*, "a systematic review of battery recycling technologies: advances, challenges, and future prospects," *energies (basel)*, vol. 16, no. 18, 2023, doi: 10.3390/en16186571.
- [58] A. L. Srivastav *et al.*, "concepts of circular economy for sustainable management of electronic wastes: challenges and management options," *environmental science and pollution research*, vol. 30, no. 17, pp. 48654–48675, 2023, doi: 10.1007/s11356-023-26052-y.
- [59] M. Zhu, x. Li, j. Ma, t. Xu, and l. Zhu, "study on complex dynamics for the waste electrical and electronic equipment recycling activities oligarchs closed-loop supply chain," *environmental science and pollution research*, vol. 29, no. 3, pp. 4519–4539, 2022, doi: 10.1007/s11356-021-15979-9.
- [60] M. Derks, c. Bidmon, and f. Ciulli, "circular e-waste ecosystems in necessity-driven contexts: the impact of formal institutional voids," *bus strategy environ*, vol. 33, no. 4, pp. 3733–3747, 2024, doi: 10.1002/bse.3652.
- [61] V. Murthy and s. Ramakrishna, "a review on global e-waste management: urban mining towards a sustainable future and circular economy," *sustainability (switzerland)*, vol. 14, no. 2, 2022, doi: 10.3390/su14020647.
- [62] M. Sharma, s. Joshi, and k. Govindan, "issues and solutions of electronic waste urban mining for circular economy transition: an indian context," *j environ manage*, vol. 290, 2021, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112373.
- [63] T. Shevchenko, m. Saidani, y. Danko, i. Golysheva, j. Chovancová, and r. Vavrek, "towards a smart e-waste system utilizing supply chain participants and interactive online maps," *recycling*, vol. 6, no. 1, pp. 1–14, 2021, doi: 10.3390/recycling6010008.
- [64] R. Hossain and v. Sahajwalla, "current recycling innovations to utilize e-waste in sustainable green metal manufacturing," *philosophical transactions of the royal society a: mathematical, physical and engineering sciences*, vol. 382, no. 2284, 2024, doi: 10.1098/rsta.2023.0239.