

Estudio de viabilidad para el uso de materiales reciclados de los desechos electrónicos como catalizadores de reacción

Stefany Paola Gañan Vargas, sgananv36796@universidadean.edu.co, estudiante;
Daniel Hassib Rojas Méndez, drojasm30899@universidadean.edu.co, estudiante.

Resumen

Los desechos de equipos eléctricos y electrónicos son un problema creciente en las ciudades del mundo, esto se debe, a que los estilos de vida actuales derivan en el constante desarrollo de nuevos productos para suplir la demanda y necesidades de consumo. Por lo tanto, encontrar metodologías que permitan mitigar el impacto de dichos residuos ha tomado gran importancia para los desarrolladores, la academia y los entes gubernamentales. El presente documento, describe un estudio de viabilidad que pretende observar y analizar por medio de referentes teóricos y datos gubernamentales la posibilidad de reinsertar los metales presentes en dichos residuos como catalizadores de reacción, encontrando que, gracias a las nuevas tecnologías de catalizadores verdes algunos metales recolectados a partir de este tipo de residuos, como el hierro y el oro podrían ser reinsertados.

Introducción

La producción de electrodomésticos y productos electrónicos ha aumentado significativamente, en parte, por la influencia que ejercen dichos artefactos en el estilo de vida actual (Villar, 2017). Sin embargo, la corta vida útil, las opciones de reparación limitadas y el cambio rápido de la tecnología están llevando a un incremento de los desechos eléctricos y electrónicos (DEE), los cuales toman importancia debido a su gran volumen y los peligros de salud que pueden provocar por mal manejo o una clasificación deficiente. Asimismo, el diseño de los equipos tiene un papel fundamental, ya que el ciclo de vida de un aparato electrónico se ve reducido a periodos de entre 2 y 6 años (Islam, y otros, 2016). A pesar de que las empresas que comercializan y producen los aparatos tecnológicos deben mantener un seguimiento y control de los modelos de gestión para estos desechos, no se cuenta con un mecanismo que permita realizar una evaluación de las estrategias aplicadas para dar un correcto manejo de los productos. Por otro lado, según el monitor global de basura electrónica en el que participan organizaciones como la universidad de las naciones unidas (UNU) y el Instituto de las Naciones Unidas para la Formación Profesional e Investigaciones (UNITAR), en el año 2019 Colombia produjo alrededor de 318 kilotoneladas (kt) de desechos electrónicos, la producción de desechos electrónicos per cápita fue de 5,3 kg y en el 2019 ascendió hasta unos 6,3 kg (Forti, Baldé, Kuehr, & Bel, 2020). Según el Ministerio de Ambiente los desechos electrónicos son unos de los residuos que mayor tasa de crecimiento tiene, comprendida entre el 3% y el 5% por año, de las cuales se recicla únicamente 2.7 kt (Forti, Baldé, Kuehr, & Bel, 2020).

Varias organizaciones, organismos y gobiernos han adoptado y/o desarrollado opciones y estrategias ambientalmente racionales para la gestión de desechos electrónicos con el fin de abordar la amenaza para el medio ambiente y la salud humana, por ello se da la necesidad de crear una clasificación a causa de la variedad de composiciones para cada tipo de equipo dividiendo en categorías (Meshram, Pandey, & Abhilash, 2019)

Los desechos electrónicos se pueden clasificar en 10 categorías (Wath, Dutt, & Chakrabarti, 2011): Grandes electrodomésticos, pequeños electrodomésticos, equipos informáticos y de telecomunicaciones, equipo de consumo, equipo de iluminación, herramientas eléctricas y

electrónicas, juguetes-equipamiento deportivo y de ocio, dispositivos médicos, instrumentos de seguimiento y control, y dispensadores automáticos (European Parliament , 2012). Continuando con lo anterior, estos desechos pueden estar compuestos por más de 1000 sustancias diferentes (Minambiente, 2017), como metales ferrosos y no ferrosos, plásticos, vidrios, madera, tarjetas de circuito impreso entre otros. Según el Ministerio de Ambiente colombiano, el hierro y el cobre conforman en un 50% estos residuos, 21% el plástico, 13% metales no ferrosos, 3% de elementos peligrosos y el 13% restante está compuesto por otros constituyentes, una variedad de sustancias y materiales con efectos nocivos para la salud y el medio ambiente. Por esta razón, hace unos años el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Ambiental implementó la Política Nacional para la Gestión Integral de los RAEE, formulada bajo los lineamientos establecidos por la Ley 1672 de 2013, la cual define una hoja de ruta hasta el año 2032 que se deben para afrontar la problemática global y local que representa el crecimiento constante de los desechos electrónicos, esta política se basa en el modelo de sistemas de recolección de productos de uso masivo que generan residuos con características peligrosas, bajo el Principio de Responsabilidad Extendida del Productor (REP), proporcionando los instrumentos administrativos y regulatorios para el seguimiento, vigilancia y control que permitan realizar la correcta gestión de este tipo de residuos, haciendo énfasis en la posibilidad de recuperar estos materiales que pueden ser reciclados y reincorporados al ciclo productivo por ejemplo como catalizadores de reacción.

Marco de referencia

Las innovaciones de los equipos eléctricos y electrónicos han tomado una importancia significativa en la vida de las personas (Heacock, y otros, 2015) ocasionando que, por su la alta demanda y las características de diseño, se aumente nocivamente la generación de desechos de equipos electrónicos y eléctricos (DEEE) (Priya & Hait, 2017). Actualmente, la basura electrónica generada es tratada de tres formas, la primera consiste en desechar los desperdicios de forma tradicional en basureros o rellenos sanitarios, en los cuales el riesgo de contaminación por la lixiviación de los componentes contaminantes es latente lo que se deriva en daños del suelo y aguas subterráneas (Kang, Kang, Ilankoon, & Chong, 2020), la segunda opción trata de la recolección que hacen gobiernos y empresas de forma regular, y la tercera, es la recolección que se hace de forma ilegal por compañías o recicladores externos (Chi, Wang, & Reuter, 2014). Se estima que solo el 20 % de los desechos electrónicos son tratados formalmente, el resto de estos desechos se procesa por métodos informales o termina en vertederos, ocasionando contaminación en aguas subterráneas (Rodríguez, ALothman, Osman, & Luque, 2020).

A nivel global, la generación de estos desechos ha incrementado cerca de un 9 % desde el 2019, se estima que se generan cerca de 13,1 Megatoneladas (Mt) de equipos industriales de amplia envergadura, 10,8 Mt de equipos destinados al intercambio de calor, 6,7 Mt de pantallas y monitores, que en su mayoría son equipos que vienen de actividades dedicadas a la manufactura y producción, no obstante, para los celulares y equipos de comunicación se generan cerca de 4,7 Mt, evidenciando una alta tasa de producción para DEEE (Ahirwar & Tripathi, 2021), que puede variar dependiendo de la demanda que se presente en las regiones para los equipos electrónicos (Kumar & Rawat, 2018). Algunos estudios, estiman que, en la unión europea, se producen cerca de 7 millones de toneladas de desechos electrónicos, lo que significa cerca de 15 kg per cápita en esta región del mundo (Sajid, y otros, 2019).

Desde la concepción de los equipos son seleccionados los materiales que se implementaran en cada dispositivo, con el fin de cumplir los objetivos de diseño para cada artefacto electrónico, por ejemplo,

la conducción de energía trajo consigo requerimientos técnicos como conductividad de los materiales para lo cual por ejemplo se contempló el cobre, estas características pretenden obtener un elemento o máquina que sea capaz de ajustarse a las necesidades operativas de los usuarios finales (Nagaraju, Sekhar, & Yu, 2018). Dichas necesidades, requieren de un constante desarrollo mediante innovaciones de funcionalidad, tamaño, forma y aspecto físico, esto significa, que los materiales utilizados para el desarrollo de los equipos eléctricos y electrónicos tienen características útiles e importantes para la manufactura de productos y, por lo tanto, existe un mercado que se presenta como oportunidad de negocio, pues los componentes presentes en los desechos tratados de estos productos adquieren un valor económico importante (Arya & Kumar, 2020).

En consecuencia, se ha desatado la contaminación ambiental que causan los DEEE provenientes de diferentes sectores, además, estos desechos emiten contaminantes peligrosos al medio ambiente, que aportan al deterioro de la biosfera, por esta razón, encontrar soluciones que permitan reutilizar la mayor cantidad de productos se vuelve una necesidad. Los componentes presentes en estos desechos, en su mayoría son metales como hierro, acero, aluminio, bario, bismuto, cobre, níquel, oro, paladio y plata, siendo estos últimos tres los metales con mayor atención en el reciclaje de desechos (Arya & Kumar, 2020). Ahora bien, (Namias, 2013) sugirió que los desechos electrónicos contienen hasta 60 metales y la recuperación de estos materiales presentes en los DEEE podría reducir la demanda global de materias primas en un corto plazo. El reciclaje de desechos en general y más específicamente de los electrónicos también aporta en la reducción de la cantidad de material que termina en los vertederos. Lastimosamente, aun con los beneficios evidenciados anteriormente solo el 15% de los desechos electrónicos globales se recicla por completo en algunos países por debajo del promedio mundial (Heacock, y otros, 2015).

Según (Kumar, Holuszko, & Espinosa, 2017) el reciclaje de e-waste se puede convertir en una industria sustentable puesto que los beneficios de reciclar este material, en términos económicos, ambientales y para la salud pública lo convierten en un negocio de la economía circular. Los metales contenidos en los desechos se estiman con un valor de 48 mil millones de USD, aportando al cumplimiento de los objetivos 8, 11 y 12 (Naciones Unidas, 2015). Además, bajo una correcta separación y manejo de los residuos, la industria de los desechos puede generar cerca de 296 puestos de trabajo por cada 10.000 toneladas de material. Sin embargo, la presencia de metales preciosos atrae a personas que realizan los tratamientos de recolección sin considerar los riesgos asociados a este proceso, por ejemplo, en Delhi, India se ha reportado la contaminación de desagües y el suelo superficial por desechos que transportan metales no recuperados como Sb, Cu, Pb, Ni, Sn, Zn, As y Se, entre otros (Ahirwar & Tripathi, 2021), otros contaminantes peligrosos producto de los tratamientos o producción de equipos electrónicos son, éteres di-fenílicos polibromados (PBDE) y bifenilos policlorados (PCB) (Priya & Hait, 2017).

Los procesos de tratamiento informal de los desechos electrónicos traen consigo la exposición a materiales contaminantes y peligrosos para la salud humana, las metodologías ilegales generan contaminación y problemas de salud debido a que en su mayoría tienen presencia de plomo (Pb). Los riesgos para la salud han sido estudiados por varios autores, (Zeng, Huo, Xu, Liu, & Wu, 2020) reportaron lo efectos que tiene la exposición al Pb en niños que trabajan informalmente y se encuentran en zonas cercanas a donde se realizan estas actividades, el contacto con estos contaminantes puede ocasionar afectaciones en su sistema cardiovascular, inmune, respiratorio, entre otros. En Agbogbloshe, donde se reciclan plásticos derivados de equipos electrónicos también se ha presentado contaminación por plomo (Hahladakis, Velis, Weber, Iacovidou, & Purnell, 2018), se debe a que en algunas circunstancias, los procesos informales no adoptan medidas exigidas por la ley

o no se encuentran regulados y por lo tanto ponen en riesgo la vida del talento humano que trabaja en dichos lugares sin los elementos de protección personal, en condiciones inseguras e inclusive se fomenta el trabajo infantil (Cordova, Aguilar, Romero, & Rodriguez, 2019). Los desafíos que presenta el tratamiento de los desechos electrónicos para los países desarrollados y subdesarrollados son claros, como la necesidad de entender las dinámicas que rigen este tipo de actividades (Sharma, Joshi, & Kumar, 2020), y por tal razón, la creación de códigos y normas especiales es de suma importancia para garantizar estas actividades se desarrollen sosteniblemente.

Se estima que el 23% de los desechos generados en países desarrollados se exportan a países en desarrollo. Por tal razón en India, terminan cerca de 1641 kilotoneladas de desechos electrónicos (Kumar, Holuszko, & Espinosa, 2017). Los recursos naturales y los habitantes presentan una contaminación de materiales peligrosos en concentraciones altas que se vuelven tóxicas y peligrosas afectando la salud humana (Gangwar, y otros, 2019), esto se debe a que, en estos países, los desechos electrónicos llegan sin ningún tipo de control, y su tratamiento se realiza sin vigilancia en la mayoría de los casos, sin embargo, en algunos casos los mecanismos que se utilizan para reciclar estos desechos en ocasiones se encuentran estipulados por las políticas regionales (Yong, Lim, & Ilankoon, 2019), pero no cuentan con la suficiente rigurosidad debido a el rápido cambio presentado por la vertiginosa producción de desechos electrónicos ocasionando que en muchos países, no se alcancen a regular los problemas que se presentan con la intervención de este nuevo factor en las sociedades locales (Zeng, Huo, Xu, Liu, & Wu, 2020).

El reciclaje de los DEEE pretende tomar los productos servibles y darles una nueva utilidad o función en una cadena productiva, reduciendo la necesidad de explotación de recursos para reducir los impactos en el ecosistema. La economía circular, busca por otro lado que los productos sean diseñados “de la cuna a tumba”, para lo cual es importante que tengan una larga vida útil en términos de servicio, pero una vez pierdan su funcionalidad, sea posible reutilizarlos y volver a implementarlos como materia prima para una reutilización directa o una separación por componentes generando un nuevo valor agregado. Estos conceptos guardan una fuerte relación con la sostenibilidad, para la cual, uno de los objetivos principales es encontrar una relación directa en ámbitos sociales, económicos y ambientales, siendo los pilares fundamentales, además, en el entorno contemporáneo donde muchos de los productos tienen corta vida funcional y un amplio tiempo de degradación es importante empezar a diseñar sosteniblemente (Sharma, Joshi, & Kumar, 2020).

Existen cuatro escenarios globales para el manejo de residuos eléctricos y electrónicos como se muestran a continuación (Rautela, y otros, 2021)

1. Norte América: Realiza vertido local, aplica a gran parte del mundo donde los desechos electrónicos se depositan en vertederos.
2. Estados Unidos: Realiza exportación y vertido, exportan a países en desarrollo y allí arrojan los desechos en vertederos.
3. China, India y otros países en desarrollo: Recuperación de bajo nivel, se observa en países en desarrollo, además proporciona puestos de trabajos y ahorra energía y materias primas.
4. Japón: Recuperación de alto nivel, además de ahorrar energía y materias primas, previene la exportación ilegal a países en desarrollo.

Estos residuos se pueden tratar de varias formas, sin embargo, el procesamiento mecánico es un paso fundamental para el proceso, que también incluye desmantelamiento, reducción de tamaño y separación física. Los diferentes componentes y dispositivos se pueden separar selectivamente

mediante desmantelamiento manual o automático, y por medio de este proceso se pueden eliminar los componentes peligrosos para aumentar la concentración de los metales (Ding, y otros, 2019)

Los materiales presentes en los desechos electrónicos son únicos y en algunos casos raros, por sus propiedades específicas; los metales preciosos se aplican ampliamente en diversos campos debido a sus propiedades físicas y químicas, como la actividad catalítica, alta conductividad eléctrica y resistencia a la corrosión. Los campos más significativos en los que son incluidos son la industria de catalizadores y electrónica, esta última consume más del 90% de los metales preciosos. Los más utilizados son el oro, plata y cobre, utilizados como contactos, cables de unión de interruptores y finalmente el paladio, empleado en unidades de disco duro. (Ding, y otros, 2019). En las industrias de los catalizadores, los metales preciosos se utilizan como componentes activos, los principales catalizadores se emplean en la purificación de emisiones de automóviles, refinación de petróleo, ingeniería química, productos farmacéuticos y química fina (Ding, y otros, 2019).

El reciclaje inadecuado de los DEEE, es un factor que aumenta la cantidad de enfermedades y contaminantes emitidos a la naturaleza, por lo tanto, es imprescindible que los gobiernos tomen cartas en el asunto y procedan con la creación de legislaciones vigentes que protejan a los trabajadores y el medio ambiente de las prácticas ilegales que se están presentando (Thi Thu Nguyen, Hung, Lee, & Thi Thu Nguyen, 2018) así mismo, es importante que se fomente la investigación de estos temas por medio de las políticas públicas, practicas alternativas para la producción de productos e intentar modificar la forma como se perciben las necesidades que se generan por los equipos electrónicos (Baldé, Forti, Gray, Kuehr, & Stegmann, 2017) y se deben enfocar en la salud del trabajador y garantizar una correcta cadena de disposición final, para evitar que terminen siendo tratados por empresas ilegales que ponen en riesgo la vida de los trabajadores.

Metodología

El enfoque para esta investigación se establece con el método cuantitativo, puesto que el propósito de esta es comparar y describir las cantidades y composiciones de los desechos electrónicos, las metodologías de recuperación existentes y las propiedades o comportamientos de dichos desechos, para estudiar la viabilidad de emplearlos en la industria de los catalizadores de reacción. Según (Sampieri, 2018), se clasifica en cuantitativo cuando la investigación se basa en la recolección de datos por medio de instrumentos que permiten la medición de variables para el correcto análisis de datos y se presentan por medio de estándares como tablas, figuras y diagramas. Por ello, el estudio de viabilidad se realiza por medio de la recolección de información teórica y metodológica asociada con la gestión y manejo de los DEEE, teniendo en cuenta las variables requeridas para la investigación.

Además, el diseño del estudio será no experimental, puesto que, para dar cumplimiento al objetivo general, tendrá como base la información teórica sin manipular ni alterar las composiciones y propiedades de los materiales presentes en los DEEE, así mismo el estudio no se dirigirá hacia la aplicación práctica de una metodología, por lo tanto, la investigación es transeccional debido a que la información y medición de variables se realiza en una sola ocasión.

El alcance de la investigación es de tipo exploratorio, lo cual se caracteriza por estudiar variables potenciales, como se mencionó anteriormente. El estudio de viabilidad se realizará a partir de la recolección de información asociada con los DEEE con el propósito de reinsertarlos en la industria de catalizadores. Por otro lado, durante el análisis aplicado a la información encontrada se evidenció

que muy pocas investigaciones se refieren a nuevas metodologías o alternativas de reutilización, y disminuye la información cuando se vincula con el sector de catalizadores de reacción.

La información requerida para responder a la pregunta de investigación “¿Es posible utilizar materiales reciclados de los desechos electrónicos como catalizadores de reacción?” requiere la recolección sistemática de información en áreas del conocimiento entre las que se encuentran principalmente la química y la física, contando con disciplinas asociadas como la termodinámica, la termoquímica, fisicoquímica y la ciencia de los catalizadores. Ahora bien, las corrientes investigativas académicas e industriales del mundo contemporáneo guardan una fuerte relación con los procesos asociados a estas grandes áreas del conocimiento, por lo tanto, es común que se presenten investigaciones de diversos orígenes que pretenden explicar fenómenos, proponer nuevas metodologías, y en el caso particular de interés para este estudio, la identificación de residuos electrónicos y los tratamientos de recolección o disposición final que se les aplican.

Los criterios de selección que se utilizaron para recolectar investigaciones científicas y evaluar documentos de interés fueron las siguientes:

- Año de publicación (2015-2021)
- Tipo de documento (Artículo científico, documento oficial, tesis de maestría o doctorado aceptada, y finalmente libro).
- Área de investigación (E-waste, DEEE, Catalizadores de reacción)
- Disciplina asociada (Química, física, ingeniería de materiales, medio ambiente, ingeniería química, química verde, ciencias sociales, ciencias de la salud y estudios interdisciplinarios)
- Idioma (inglés, español o francés)

Considerando los criterios de exclusión que se pueden configurar en web of science (WOS), se recolectaron cerca de 836 artículos de investigación.

Continuando con lo anterior, es necesario identificar los conocimientos que pueden aportar al objetivo de la investigación, para realizar la clasificación de la información se utilizará un mecanismo basado en la metodología propuesta por Kitchenham para la revisión sistemática de información; en su metodología, se propone una clasificación por contenidos, agrupando e interpretando la información disponible para responder a una pregunta o aportar de forma concreta a un área de estudio. Este mecanismo se basa en tres metodologías utilizadas para la investigación en el campo de la medicina “The Cochrane Reviewer’s Handbook m”, “Guidelines prepared by the Australian National Health and Medical Research Council” y “CRD Guidelines for those carrying out or commissioning reviews”. De igual forma, se encuentra compuesta por tres fases: planear, conducir y reportar los resultados de la revisión, por lo tanto, las principales contribuciones a este instrumento vienen de estudios individuales organizados de forma sistemática gracias a la aplicación de criterios de selección que tienen la función de clasificar los contenidos de cada artículo científico o fuente gubernamental, relacionándolos con su influencia sobre la pregunta del estudio (Kitchenham, 2004). La idea de aplicar estos criterios es asegurarse que la información seleccionada aporte a resolver la pregunta de interés, que a su vez proporciona claras evidencias sobre las hipótesis planteadas y permite sentar las bases para reportes posteriores sobre la investigación, es importante mencionar que este procedimiento requiere mayor esfuerzo que un sistema convencional para la revisión de información, pero sus beneficios se ven reflejados en investigaciones mejor sustentadas.

Considerando la herramienta seleccionada, los documentos relevantes para el desarrollo del estudio de viabilidad se clasificaron teniendo en cuenta características o ítems de contenido. Los ítems importantes que se seleccionaron para el estudio fueron: la inclusión de metodologías para el reciclaje

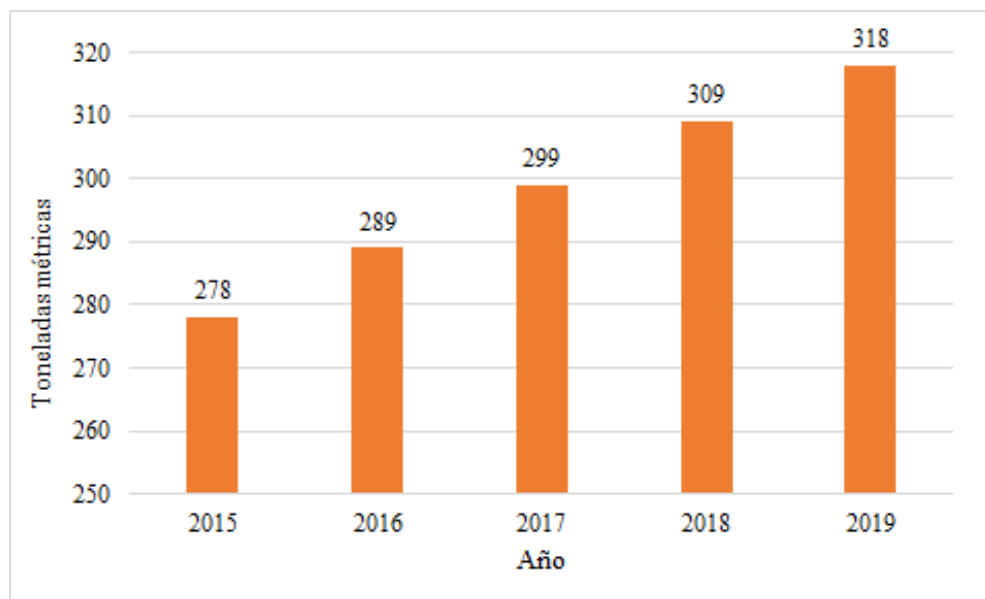
de desechos electrónicos, cifras de producción y cantidad de desechos, caracterización de estos e identificación de materiales presentes, y la descripción de la composición que tienen los desechos destinados al reciclaje. Asimismo, se asignó un apartado para caracterizar los datos curiosos y relevantes de la investigación, por otro lado, la información asociada con los documentos seleccionados se clasificó por tipo de documento, título, autores, año de publicación, idioma, país, fuente o revista, DOI y un enlace. De esta forma se busca asegurar que será posible identificar plenamente el material de referencia que se utilizó y lograr evaluar las incidencias que tienen dichas investigaciones sobre las hipótesis planteadas a partir de la pregunta del estudio.

Resultados de la investigación

En los últimos años, los RAEE han generado gran preocupación mundial debido al constante crecimiento causado por la ausencia de control y planes de gestión enfocados hacia la recolección y reciclaje de estos. Según The Global E-waste Monitor-2020, realizado por la Universidad de las Naciones Unidas, en el año 2019 se generaron cerca de 53,6 millones de toneladas métricas en el mundo (Forti, Baldé, Kuehr, & Bel, 2020) (Ahirwar & Tripathi, 2021) (Kang, Kang, Ilankoon, & Chong, 2020).

En Colombia, la generación de los RAEE en el 2019 se estimó en 318.000 toneladas, lo cual equivale a 6,36 kg por habitante. De acuerdo con lo anterior, la rápida innovación tecnológica y la reducción del tiempo de vida de los aparatos ha contribuido al crecimiento constante a nivel nacional a través de los años como se refleja en la figura 1. (Minambiente, 2017) (Baldé, Forti, Gray, Kuehr, & Stegmann, 2017) (Lara, Sánchez, Herrera, Valdivieso, & Villalobos, 2019).

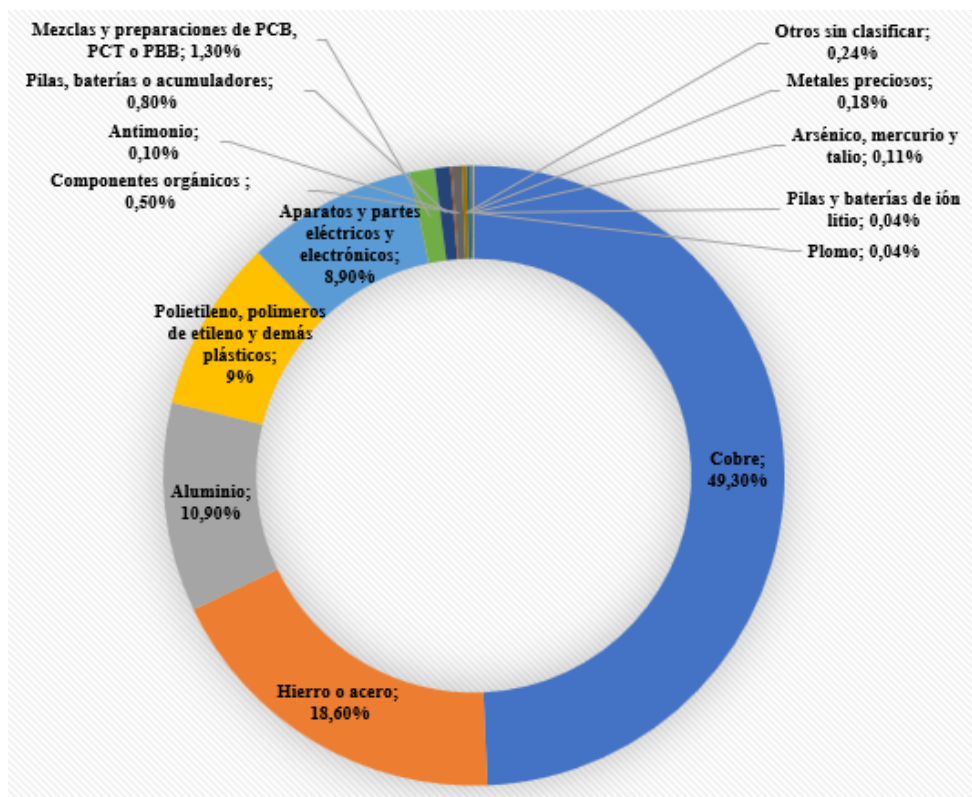
Figura 1. Cantidad de e-waste generado en Colombia (2015-2019).



Fuente: Adaptado de (Minambiente, 2017) (Forti, Baldé, Kuehr, & Bel, 2020).

Por otra parte, los desechos electrónicos son una fuente secundaria de metales, para llevar a cabo su recuperación, es importante conocer la composición y los principales materiales contenidos en los mismos como se evidencia en la figura 2.

Figura 2. Composición y material del e-waste.



Fuente: Adaptado de (Chi, Wang, & Reuter, 2014) (Minambiente, 2017) (Priya & Hait, 2017).

Según lo estudiado, se obtuvo que los metales se encuentran en mayor proporción de los desechos electrónicos, entre ellos el Cobre, Hierro o Acero y Aluminio, por tal razón se debe profundizar en las metodologías y procesos de recuperación para la implementarlos en la producción de catalizadores.

Por último, para estudiar la viabilidad de la recuperación de metales del e-waste, es importante identificar los impactos y afectaciones que conlleva este tipo de residuos de manera social, ambiental y económico en Colombia.

Tabla 1. Impactos del e-waste en Colombia.

IMPACTOS DEL E-WASTE		
SOCIAL	AMBIENTAL	ECONÓMICO
Falta de políticas públicas para el manejo de RAEE.	Exposición a sustancias químicas tóxicas y peligrosas.	Exportación de los RAEE a países subdesarrollados.
Desconocimiento de disposición de los RAEE.	Aumento niveles de contaminación del aire (PM10).	Perdidas en los sistemas de gestión inadecuados.

Reciclaje de e-waste por parte de personas no capacitadas.	Contaminación de fuentes hídricas y ecosistemas.	Incremento del gasto gubernamental en recolección de RAEE de espacios públicos.
Generación de trabajo informal para poblaciones vulnerables.	Incremento de exploración minería informal.	Sobrecostos de producción por alta demanda de metales.
Problemas de salud pública, por el aumento de enfermedades	Demanda de combustibles fósiles, agua y productos químicos.	Aumento en el gasto de salud pública.
Planes de manejo de residuos gubernamentales inadecuados.	Afecciones al sistema nervioso y circulatorio humano.	

Fuente: Adaptado de (Awasthi, y otros, 2018) (Canda, Heput, & Ardelean, 2016) (Heacock, y otros, 2015) (Gangwar, y otros, 2019) (Namias, 2013) (Zeng, Huo, Xu, Liu, & Wu, 2020)

Los métodos más reconocidos para el tratamiento de este tipo de residuos se observan en la tabla 2, donde se describen las posibles metodologías asociadas con las recuperaciones de varios componentes presentes en el desecho, varias de estas metodologías se encuentran en una fase preliminar antes de su escalado industrial, pero se consideran por la oportunidad de recuperación y de creación de nuevo producto.

Tabla 2. Metodologías empleadas para la recuperación y tratamiento de e-waste.

Método empleado	Material recuperado	Características del proceso	Resultados del proceso
Proceso Noranda Quebec (Canadá)	Cu, Au, Ag, Pt, Pd, Se, Te, Ni	Fundición de cobre y concentrado de cobre, convertidor, horno de fundición, electro refinación del metal.	Altas recuperaciones de cobre y metales preciosos.
Fundición Bolíden Ronnskar (Suecia)	Cu, Au, Ag, Pt, Pd, Zn, Pb, Ni	Reactor para concentrados, convertidor y refinación para cobre, refinación de metales preciosos	Altas recuperaciones de cobre y metales preciosos
Umicore (Bélgica)	Metales preciosos, Se, Te y metales base.	Lixiviación de cobre, electro refinación de metales preciosos, horno de fundición con control de emisiones de gases.	Recuperación de metales preciosos, Sb, Bi, Se, Te, In
Dunns refinería de oro	Oro	Reacción de chatarra electrónica con cloro entre 300 y 700 °C disolución de la plata con ácido nítrico e hidróxido de amonio.	Recuperación de oro con 99.9 % de pureza proveniente de chatarra electrónica

Days	Metales preciosos, Pt y Pd	Chatarra cargada en horno de plasma a 1400 °C, cerámica en la escoria, plata y cobre recuperados.	Recuperaciones de platino y paladio a partir de chatarra electrónica, en porcentajes de 80.3 % y 94.2 % respectivamente.
Aleksandrovich	Grupo del Pt y Au.	Fundición de metales mediante la reducción con carbón.	Metales del grupo del platino y oro recuperados.
Síntesis materiales híbridos.	Materiales peligrosos	Síntesis y mezcla de materiales con bentonita para eliminar la toxicidad.	Materiales híbridos anfílico para eliminar compuestos contaminantes en líquidos.
Nanomateriales	Metales	Se genera por medio del proceso de oxidación química y electrodeposición.	Electro catalizadores con propiedades de transporte eficientes y estables.
Fotocatalizadores	Metales, plásticos y carbono.	Síntesis de reducción pirolítica y carbotermal.	Catalizadores empelados en tratamientos de aguas.

Fuente: Adaptado de (Guo, Zhang, & Xu, 2016) (Yao, y otros, 2020) (Izatt & Hagelüken, 2016) (Khayyam, Tudela, Pahlevani, & Sahajwalla, 2020) (Diniz, Nascimento, Binatti, Freitas, & Mambrini, 2020) (Canda, Heput, & Ardelean, 2016) (Rodríguez, ALOthman, Osman, & Luque, 2020).

Ambientalmente el tratamiento químico o físico de los DEEE juega un papel clave en la protección del medio ambiente, pues logra mantener los desechos fuera de los vertederos, y brinda un correcto tratamiento a materiales peligrosos como mercurio, cadmio, plomo, cromo y poli bromados que agotan la capa de ozono. De igual forma, reduciría la demanda global de producción de metales, entre los que se han identificado el Oro (Au), cuya funcionalidad como catalizador se puede observar en la oxidación a bajas temperaturas del Monóxido de carbono (CO), entre otras reacciones (Hashmi & Hutchings, 2006), el hierro que puede ser usado como catalizador en la reducción del oxígeno (O₂) (Yang, y otros, 2018) y el cobre se han empleado en aplicaciones foto catalíticas, logrando la síntesis de nano catalizadores magnéticos-separables utilizando residuos electrónicos. Por lo cual, implementarlos nuevamente en el sector productivo permite reducir costos operacionales destinados a la obtención del material puro; los materiales recuperados tienden a tener pequeñas contaminaciones gracias a los mecanismos utilizados para su recuperación, no obstante, la naturaleza del material no cambia y puede seguir entregando características similares a las del material obtenido de la fuente original.

Reutilizar estos compuestos aporta para disminuir las emisiones de gases efecto invernadero y por ende los impactos causados por la extracción de metales (Awasthi, y otros, 2018). Lo anterior se vincula con la amenaza para la salud y seguridad pública en personas que manejan este tipo de material o que contaminan en general los recursos comunes, causando afecciones en el desarrollo

mental, daños renal y hepático, y liberación de carcinógenos al aire que causan daño pulmonar (Kumar, Holuszko, & Espinosa, 2017).

Conclusiones

Considerando la demanda de equipos eléctricos y electrónicos, es importante comenzar con la implementación de metodologías que permitan realizar el reciclaje de los desechos generados por este tipo de artefactos, así mismo, es necesario generar más claridad e interés por los impactos sociales, ambientales y económicos que estos producen, por lo cual surge la necesidad de implementar políticas públicas y reforzar las normativas vigentes que regulan la producción y tratamiento de dichos residuos para evitar problemas graves a futuro en las comunidades.

Algunos países desarrollados tienen practicas negativas sobre el manejo de sus residuos y realizan la disposición de estos enviándolos a países menos desarrollados donde indirectamente se afectan comunidades en riesgo, pues optar por tratar estos desechos mediante mecanismos inseguros e informales, por lo tanto, es necesario crear acuerdos globales que eviten las malas prácticas del proceso y apoyen a las comunidades menos favorecidas.

Los tratamientos informales de este tipo de desechos pueden provocar afectaciones graves en la salud para operarios del proceso y comunidades aledañas ya que se contaminan las fuentes hídricas con sustancias químicas nocivas, generando problemas respiratorios, morbilidad cardiovascular y aumento en la concentración de metales peligrosos en la sangre.

El cobre reciclado de este tipo de desechos se encuentra actualmente siendo estudiado y contemplado como una alternativa para la obtención de electro catalizadores de bajo costo por medio de oxidación química demostrando un comportamiento estable en términos de actividad, y por lo tanto, se puede obtener un material funcional para ser reinsertado en la industria de catalizadores.

Los desechos de productos eléctricos y electrónicos tienen una gran variedad de materiales y clasificaciones, por esta razón, se requiere de procesos con una demanda técnica importante para realizar la separación de los componentes, de acuerdo con el tipo de aparato electrónico que se desea tratar ya que según la metodología se pueden incorporar al procesos equipos como televisores, neveras, computadores, maquinaria industrial, entre otros.

La recuperación de dichos desechos supone un modelo de negocio sostenible, esto se debe a que impacta positivamente en las sociedades, generando nuevos empleos, de igual forma, aporta en el cuidado del medio ambiente, disminuyendo la generación de residuos peligrosos y los productos obtenidos de este tratamiento tienen un valor económico importante para las industrias.

El uso de materiales reciclados de los DEEE como materiales destinados a la catálisis de procesos industriales supone una alternativa económicamente viable y ambientalmente sostenible, puesto que los materiales obtenidos tienen propiedades similares a las de los catalizadores presentes en las fuentes primarias. Por esto mismo, se requiere ampliar la investigación de manera experimental para el comportamiento que tienen materiales distintos al cobre, plata y aluminio recuperados en este nicho del mercado.

Referencias

- Ahirwar, R., & Tripathi, A. K. (2021). E-waste management: A review of recycling process, environmental and occupational health hazards, and potential solutions. *Environmental Nanotechnology Monitoring & Management*, 15 (100409). doi:<https://doi.org/10.1016/j.enmm.2020.100409>
- Arya, S., & Kumar, S. (2020). Bioleaching: urban mining option to curb the menace of E-waste challenge. *Bioengineered*, 11(1), 640–660. doi:<https://doi.org/10.1080/21655979.2020.1775988>
- Awasthi, A. K., Cucchiella, F., D'Adamo, I., Li, J., Rosa, P., Terzi, S., . . . Zeng, X. (2018). Modelling the correlations of e-waste quantity with economic increase. *The Science of the Total Environment*, 613–614, 46-53. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.288>
- Baldé, C. P., Forti, V., Gray, V., Kuehr, R., & Stegmann, P. (2017). Suivi des déchets d'équipements électriques et électroniques à l'échelle mondiale 2017. *Unu.edu*. Obtenido de http://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/GEM_2017-F.pdf
- Canda, L., Heput, T., & Ardelean, E. (2016). Methods for recovering precious metals from industrial waste. . *IOP conference series. Materials science and engineering*, 106, 012020. doi:<https://doi.org/10.1088/1757-899X/106/1/012020>
- Chi, X., Wang, M. Y., & Reuter, M. A. (2014). E-waste collection channels and household recycling behaviors in Taizhou of China. *Journal of cleaner production*, 80, 87–95. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.056>
- Cordova, D., Aguilar, I., Romero, D., & Rodriguez, C. (2019). Circular economy in the electronic products sector: Material flow analysis and economic impact of cellphone. *E-waste in Mexico. Sustainability*, 11(5), 1361. doi:<https://doi.org/10.3390/su11051361>
- Ding, Y., Zhang, S., Liu, B., Zheng, H., Chang, C.-C., & Ekberg, C. (2019). Recovery of precious metals from electronic waste and spent catalysts: A review. *Resources, Conservation, and Recycling*, 141, 284–298. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.10.041>
- Diniz, C. V., Nascimento, J. V., Binatti, I., Freitas, P. E., & Mambrini, R. V. (2020). Hybrid catalysts based on waste electrical and electronic equipment supported on bentonite for the removal of contaminants compounds in liquid phase. *Catalysis Today* 344, 75–83. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.10.030>
- European Parliament . (2012). *Waste electrical and electronic equipment (WEEE)*. EEA. Obtenido de <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32012L0019>
- Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., & Bel, G. (2020). The Global E-waste Monitor 2020. *United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Rotterdam*. Obtenido de http://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2020/12/GEM_2020_def_dec_2020-1.pdf
- Gangwar, C., Choudhari, R., Chauhan, A., Kumar, A., Singh, A., & Tripathi, A. (2019). Assessment of air pollution caused by illegal e-waste burning to evaluate the human health risk. *Environment International*, 125, 191–199. doi:<https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.11.051>

- Guo, X., Zhang, Y., & Xu, K. (2016). *Metallurgical recovery of metals from waste electrical and electronic equipment (WEEE) in PRC*. John Wiley & Sons, Ltd. Obtenido de https://play.google.com/store/books/details?id=o8PCDAAAQBAJ&rdid=book-o8PCDAAAQBAJ&rdot=1&source=gbs_vpt_read&pcampaignid=books_booksearch_viewport
- Hahladakis, J. N., Velis, C. A., Weber, R., Iacovidou, E., & Purnell, P. (2018). An overview of chemical additives present in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal and recycling. *Journal of Hazardous Materials*, *344*, 179–199. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.10.014>
- Hashmi, A. S., & Hutchings, G. J. (2006). Gold catalysis. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, *45(47)*, 7896–7936. doi:<https://doi.org/10.1002/anie.200460232>
- Heacock, M., Kelly, C. B., Asante, K. A., Birnbaum, L. S., Bergman, Å. L., Bruné, M. N., . . . Suk, W. A. (2015). E-waste and harm to vulnerable populations: A growing global problem. *Environmental health perspectives*, *124(5)*. doi: <https://doi.org/10.1289/ehp.1509699>
- Islam, T., Abdullah, A., Shahir, S., Kalam, M., Masjuki, H., Shumon, R., & Rashid, H. (2016). A public survey on knowledge, awareness, attitude and willingness to pay for WEEE management: Case study in Bangladesh. *Journal of Cleaner Production*, *137(20)*, 728-740. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.07.111>
- Izatt, R. M., & Hagelüken, C. (2016). *Recycling and sustainable utilization of precious and specialty metals*. John Wiley & Sons, Ltd. Obtenido de <https://books.google.com.co/books?id=fsPCDAAAQBAJ&dq=Recycling+and+sustainable+utilization+of+precious+and+specialty+metal&hl=es&lr=>
- Kang, K. D., Kang, H., Ilankoon, I. M., & Chong, C. Y. (2020). Electronic waste collection systems using Internet of Things (IoT): Household electronic waste management in Malaysia. *Journal of Cleaner Production*, *252(119801)*, 119801. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119801>
- Khayyam, N. R., Tudela, I., Pahlevani, F., & Sahajwalla, V. (2020). Current trends in direct transformation of waste printed circuit boards (WPCBs) into value-added materials and products. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, *24*, 14–20. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.01.003>
- Kitchenham, B. (2004). Procedures for performing systematic reviews. *Keele, UK, Keele University*, *33*, 1-26. Obtenido de http://www.elizabete.com.br/rs/Tutorial_IHC_2012_files/Conceitos_RevisaoSistematica_kitchenham_2004.pdf
- Kumar, A., Holuszko, M., & Espinosa, D. C. (2017). E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practices. *Resources, Conservation, and Recycling*, *122*, 32–42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.01.018>
- Kumar, S., & Rawat, S. (2018). Future e-Waste: Standardisation for reliable assessment. *Government Information Quarterly*, *35(4)*, S33–S42. doi:<https://doi.org/10.1016/j.giq.2015.11.006>

- Lara, P., Sánchez, M., Herrera, A., Valdivieso, K., & Villalobos, J. (2019). Modeling reverse logistics networks: A case study for E-waste management policy. *En Lecture Notes in Business Information Processing*, 158–169. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-21297-1_14
- Meshram, P., Pandey, B. D., & Abhilash. (2019). Perspective of availability and sustainable recycling prospects of metals in rechargeable batteries – A resource overview. *Resources Policy*, 60, 9–22. doi:<https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2018.11.015>
- Minambiente. (2017). *Gestión Integral de Residuos de Aparatos Electronicos*. Obtenido de minambiente.gov.co:
https://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/e-book_rae_/presentacion.html
- Naciones Unidas. (2015). *Objetivos y metas de desarrollo sostenible*. Obtenido de www.un.org:
<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Nagaraju, G., Sekhar, S. C., & Yu, J. S. (2018). Utilizing waste cable wires for high-performance fiber-based hybrid supercapacitors: An effective approach to electronic-waste management. *Advanced energy materials*, 8(7), 1702201. doi:<https://doi.org/10.1002/aenm.201702201>
- Namias, J. (2013). The future of electronic waste recycling in the United States: Obstacles and domestic solutions. Columbia University. *MS degree in Earth Resources Engineering Department of Earth and Environmental Engineering Columbia University July*. Obtenido de https://www.allgreenrecycling.com/wp-content/uploads/2016/11/Namias_Thesis_07-08-1312.pdf
- Priya, A., & Hait, S. (2017). Comparative assessment of metallurgical recovery of metals from electronic waste with special emphasis on bioleaching. *Environmental Science and Pollution Research International*, 24(8), 6989–7008. doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-016-8313-6>
- Rautela, R., Arya, S., Vishwakarma, S., Lee, J., Kim, K. H., & Kumar, S. (2021). E-waste management and its effects on the environment and human health. *The Science of the Total Environment*, 773(145623), 145623. doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145623>
- Rodríguez, D., AlOthman, Z. A., Osman, S. M., & Luque, R. (2020). Recycling electronic waste: Prospects in green catalysts design. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 25(100357), 100357. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100357>
- Sajid, M., Syed, J. H., Iqbal, M., Abbas, Z., Hussain, I., & Baig, M. A. (2019). Assessing the generation, recycling and disposal practices of electronic/electrical-waste (E-Waste) from major cities in Pakistan. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 394-401. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.026>
- Sampieri, R. H. (2018). *Metodología de la investigación: las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: McGraw Hill. Obtenido de <https://www-ebooks7-24-com.bdbiblioteca.universidadean.edu.co/stage.aspx?il=6443&pg=46&ed=>
- Sharma, M., Joshi, S., & Kumar, A. (2020). Assessing enablers of e-waste management in circular economy using DEMATEL method: An Indian perspective. *Environmental Science and*

Pollution Research International, 27(12), 13325–13338.
doi:<https://doi.org/10.1007/s11356-020-07765-w>

- Thi Thu Nguyen, H., Hung, R. J., Lee, C. H., & Thi Thu Nguyen, H. (2018). Determinants of residents' E-waste recycling behavioral intention: A case study from Vietnam. . *Sustainability*, 11(1), 164. doi:<https://doi.org/10.3390/su11010164>
- Villar, E. (2017). La revolución electrónica (Vol. 8). Ed. *Universidad de Cantabria*.
doi:<https://doi.org/10.22429/Euc2017.032>
- Wath, S. B., Dutt, P. S., & Chakrabarti, T. (2011). E-waste scenario in India, its management and implications. . *Environmental monitoring and assessment*, 172(1), 249-262.
doi:<https://doi.org/10.1007/s10661-010-1331-9>
- Yang, L., Cheng, D., Xu, H., Zeng, X., Wan, X., Shui, J., . . . Cao, D. (2018). Unveiling the high-activity origin of single-atom iron catalysts for oxygen reduction reaction. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115(26), 6626–6631.
doi:<https://doi.org/10.1073/pnas.1800771115>
- Yao, Y., Lan, L., Li, X., Liu, X., Ying, Y., & Ping, J. (2020). Alchemy-inspired green paper for spontaneous recovery of noble metals. *Small*, 16(33), e1907282. doi:
<https://doi.org/10.1002/sml.202070184>
- Yong, Y. S., Lim, Y. A., & Ilankoon, I. M. (2019). An analysis of electronic waste management strategies and recycling operations in Malaysia: Challenges and future prospects. *Journal of Cleaner Production*, 224, 151–166. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.205>
- Zeng, X., Huo, X., Xu, X., Liu, D., & Wu, W. (2020). E-waste lead exposure and children's health in China. *The Science of the Total Environment*, 734(139286), 139286.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139286>