

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Posgrados

**Residuos Metálicos y su Aplicación en el Diseño de Catalizadores para la
Química Verde: Revisión y Perspectivas**

Defensa del Proyecto Integrador Maestría en Ingeniería Circular

Cinthya Elizabeth Vargas Rosero

**PhD. José R. Mora
Director de Trabajo de Titulación**

Trabajo de titulación de posgrado presentado como requisito
para la obtención del título de Magíster en Ingeniería Circular

Quito, 22 julio de 2025

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

COLEGIO DE POSGRADOS

HOJA DE APROBACIÓN DE TRABAJO DE TITULACIÓN

Residuos Metálicos y su Aplicación en el Diseño de Catalizadores para la Química Verde: Revisión y Perspectivas

Cinthya Elizabeth Vargas Rosero

Nombre del Director del Programa:	Frank Alexis
Título académico:	PhD
Director del programa de:	Maestría en Ingeniería Circular

Nombre del Decano del colegio Académico:	Eduardo Alba
Título académico:	PhD
Decano del Colegio:	Colegio de Ciencias e Ingenierías

Nombre del Decano del Colegio de Posgrados:	Dario Niebieskikwiat
Título académico:	PhD

Quito, julio 2025

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombre del estudiante: Cinthya Elizabeth Vargas Rosero

Código de estudiante: 00344258

C.I.: 0923648000

Lugar y fecha: Quito, 22 de julio de 2025.

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETheses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following graduation project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETheses>.

DEDICATORIA

A Dios, porque siempre me ha cuidado y me ha llenado de bendiciones para seguir adelante.

A mi madre por su confianza, apoyo incondicional, sacrificios, motivación y amor permanente que sin importar las situaciones o dificultades se convirtieron el pilar fundamental a lo largo de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios por brindarme salud, fuerza y sabiduría necesarias para culminar mi carrera universitaria.

Al PhD. José Mora por su guía y palabras de aliento, que sin duda fue un gran apoyo para la realización de este proyecto.

Finalmente, a la Maestría de Ingeniería Circular de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, mi infinito agradecimiento, por los conocimientos adquiridos y aptitudes para mi desarrollo profesional mediante las valiosas orientaciones de los maestros que la integran; de igual manera el agradecimiento por todos los momentos inolvidables en las instalaciones de la USFQ con mis compañer@s y amig@s que conocí en durante mi carrera universitaria.

RESUMEN

El presente trabajo se centra en la estrategia innovadora y sostenible basada en el principio de convertir residuos en recursos valiosos, enfocados principalmente en el estudio de estos residuos como precursores en la síntesis de catalizadores aplicables en procesos de química verde. La motivación fundamental surge ante la creciente problemática ambiental asociada al aumento de residuos industriales, electrónicos, metalúrgicos, provenientes de laboratorios académicos y baterías desechadas. Estos residuos contienen metales de alto valor como cobre, paladio, oro, níquel y manganeso, entre otros.

Se inició con una revisión cronológica y detallada de la evolución de los catalizadores, para luego ser analizados varios estudios que demuestran que dichos residuos pueden transformarse en catalizadores tanto heterogéneos como homogéneos. Se identificaron diferentes técnicas de recuperación, que permiten obtener materiales con alta actividad catalítica, selectividad y reutilización.

El reciclaje de metales desde fuentes secundarias no solo contribuye a disminuir la influencia del uso de recursos naturales y el impacto ambiental, sino que abre un camino prometedor para el desarrollo de tecnologías catalíticas sostenibles. Se recomienda seguir explorando escalabilidad, estandarización de procesos y cooperación entre academia, industria y gobiernos para impulsar la transición hacia una química más verde y responsable.

Palabras clave: residuos metálicos, residuos electrónicos, residuos metalúrgicos, residuos de laboratorio, baterías desechadas, química verde, catálisis.

ABSTRACT

The present work focuses on the innovative and sustainable strategy based on the principle of converting waste into valuable resources, mainly focused on the study of these wastes as precursors in the synthesis of catalysts applicable in green chemistry processes. The fundamental motivation arises from the growing environmental problems associated with the increase in industrial, electronic, metallurgical waste, from academic laboratories and discarded batteries. This waste contains high-value metals such as copper, palladium, gold, nickel and manganese, among others.

It began with a chronological and detailed review of the evolution of catalysts, and then several studies were analyzed that show that these residues can be transformed into both heterogeneous and homogeneous catalysts. Different recovery techniques were identified, which allow obtaining materials with high catalytic activity, selectivity and reuse.

Recycling metals from secondary sources not only contributes to reducing the influence of natural resource use and environmental impact but also opens a promising path for the development of sustainable catalytic technologies. It is recommended to continue exploring scalability, standardization of processes and cooperation between academia, industry and governments to promote the transition to greener and more responsible chemistry.

Keywords: metal waste, electronic waste, metallurgical waste, laboratory waste, discarded batteries, green chemistry, catalysis.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT	8
ÍNDICE DE TABLAS.....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
INTRODUCCIÓN.....	13
1. Antecedentes	13
2. Justificación	14
3. Objetivos	15
3.1. Objetivo General	15
3.2. Objetivos Específicos	15
4. Hipótesis	16
5. Pregunta	16
REVISIÓN DE LA LITERATURA	17
1. Estudio Cronológico de los Catalizadores.....	17
1.1. Antigüedad: Edad Media.....	17
1.2. Siglo XVIII: Primeras observaciones industriales.	17
1.3. 1811–1835: Primeras definiciones y experimentos formales.	18
1.4. Finales del siglo XIX: Teoría y sistematización.	20
1.5. 1909–1920: Catálisis industrial y fertilizantes.	20
1.6. 1920–1940: Expansión en la petroquímica.	21
1.7. 1950–1970: Fundamentos modernos y catálisis ambiental.....	22
1.8. 1980–1990: Avances en medio ambiente y estructuras porosas.	23

1.9.	Desde 2000: Nanocatálisis, química verde y caracterización avanzada.	24
2.	Aplicaciones a la Química Verde	25
2.1.	Catalizadores.	25
2.2.	Clasificación de catalizadores	26
2.3.	Diferentes fuentes de metales reciclados para realizar catalizadores.....	26
2.1.1.	Residuos electrónicos.....	27
2.1.2.	Baterías desechadas.....	35
2.1.3.	Aguas residuales.....	43
2.1.4.	Diversos residuos.	49
3.	El futuro de la aplicación de los catalizadores.....	51
CONCLUSIONES		53
REFERENCIAS		55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de catalizadores realizado de residuos electrónicos	34
Tabla 2. Resumen de catalizadores heterogéneos realizados de baterías desechadas	42
Tabla 3. Resumen de catalizadores heterogéneos realizado de aguas residuales.....	49
Tabla 4. Resumen de catalizadores heterogéneos realizado de diferentes residuos.....	51

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Resumen de la historia de la catálisis.	24
Figura 2. Diagrama que representa el catalizador reduciendo la energía de activación y acelerando así la reacción.	25
Figura 3. Composición de los PCB para teléfonos móviles.....	28

INTRODUCCIÓN

1. Antecedentes

La catálisis es un pilar fundamental de la química actual, ya que alrededor del 90 % de los procesos químicos industriales involucran a los catalizadores al menos una de sus etapas (Fechete et al., 2012). Actualmente, su importancia se ha intensificado debido a la innovación tecnológica, la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental. En la actualidad, los catalizadores no solo permiten la producción de combustibles, fármacos y materiales avanzados, sino que también son fundamentales para el desarrollo de procesos limpios, eficientes y selectivos, en consonancia con los principios de la química verde (Isahak & Al-Amiry, 2024).

Históricamente, la catálisis ha sido utilizada incluso desde tiempos antiguos. La Biblia ya menciona la fermentación para la producción de pan y vino, probablemente una de las primeras aplicaciones catalíticas de la humanidad. Sin embargo, por siglos, estos procesos se entendieron como fenómenos misteriosos o divinos. No fue sino hasta los últimos dos siglos que la catálisis evolucionó desde una práctica empírica hacia una ciencia fundamentada en principios moleculares, convirtiéndose en una disciplina clave para el desarrollo científico (Piumetti, 2014).

En el siglo XX la catálisis evolucionó como disciplina científica. Desde entonces, su estudio ha permitido descubrir mecanismos moleculares complejos, comprender los sitios activos en superficies sólidas y diseñar catalizadores más efectivos mediante herramientas avanzadas como la espectroscopía *in situ* y la nanotecnología. Esta evolución ha sido clave para el desarrollo de procesos industriales sustentables, como la síntesis de amoníaco en el proceso Haber–Bosch o la reducción del CO₂ mediante catálisis heterogénea (Piumetti, 2014).

Paralelamente, en el siglo XXI ha sido testigo del incremento de generación de residuos sólidos debido a la urbanización, la obsolescencia programada y el crecimiento del consumo global. Los residuos electrónicos, industriales y laboratorio contienen compuestos que pueden ser reutilizados como materias primas para la síntesis de catalizadores. De hecho, el uso de estos materiales para obtener catalizadores heterogéneos y homogéneos se ha convertido en una estrategia innovadora que no solo reduce el volumen de residuos, sino también los costos asociados a la remediación ambiental y la producción de energía (Sai Bharadwaj et al., 2025) (S. Wang et al., 2020).

Comparado con la síntesis química tradicional, la producción de catalizadores a partir de residuos sólidos es más económica y respetuosa con el medio ambiente. Se trata de un enfoque que integra los principios de la economía circular y la química verde, transformando residuos en recursos mediante su valorización. Esta estrategia permite reducir la dependencia de materias primas vírgenes, disminuye la generación de contaminantes y promueve una industria más sostenible (S. Wang et al., 2020).

En este contexto, los catalizadores no solo conservan su relevancia histórica y científica, sino que también se proyectan como protagonistas del futuro sostenible. Su aplicación en procesos industriales más limpios, su capacidad de ser obtenidos a partir de residuos, y su papel en la reducción de impactos ambientales, consolidan a la catálisis como una disciplina central para enfrentar los desafíos energéticos, ambientales y económicos del siglo XXI.

2. Justificación

En las últimas décadas, el crecimiento poblacional, el avance industrial y el consumo excesivo de recursos han generado una acumulación alarmante de residuos sólidos, industriales y electrónicos, muchos de los cuales contienen metales y materias primas secundarias. Esta situación ha provocado, graves impactos ambientales y sanitarios derivados de la mala gestión

de residuos. Las estrategias tradicionales como la incineración o el uso de vertederos resultan insuficientes e insostenibles, ya que conllevan emisiones contaminantes y ocupación de grandes extensiones de tierra. A medida que aumentan la crisis energética, se hace urgente implementar enfoques sostenibles que permiten reducir la huella ambiental y recuperar materiales valiosos (Chicaiza Ortiz et al., 2021; Rautela et al., 2024).

Por lo tanto, la reutilización de residuos metálicos como precursores para la síntesis de catalizadores representa una alternativa viable, alineada con los principios de la química verde y la economía circular. Esta estrategia no solo permite valorizar residuos, sino también contribuye a reducir el uso de materias primas vírgenes y promueve la generación de catalizadores más sostenibles y de bajo costo (Rautela et al., 2024).

Entonces, el desarrollo de catalizadores a partir de residuos no solo responde a una necesidad técnica y ambiental, sino que ofrece una vía concreta para mitigar los efectos del cambio climático y garantizar un uso más racional de los recursos.

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Evaluar el potencial de los residuos metálicos como precursores en la síntesis de catalizadores aplicados a procesos de química verde.

3.2. Objetivos Específicos

- Clasificar los tipos de residuos metálicos más significativos del siglo XX.
- Describir los métodos de recuperación de metales a partir de residuos sólidos y líquidos.
- Identificar las principales aplicaciones catalíticas de estos materiales reciclados en procesos sostenibles.
- Analizar las ventajas y desafíos asociados al uso de catalizadores verdes obtenidos a partir de residuos metálicos en el futuro.

4. Hipótesis

La reutilización de residuos metálicos permite sintetizar catalizadores con alta eficiencia catalítica en diferentes reacciones aplicadas a la química verde, manteniendo buen rendimiento y reduciendo los impactos ambientales.

5. Pregunta

¿Es posible utilizar residuos metálicos como precursores efectivos en la síntesis de catalizadores aplicados a procesos de química verde, manteniendo un alto rendimiento y reduciendo los impactos ambientales?

En la siguiente sección se presenta una revisión de los estudios más relevantes sobre la recuperación de metales de diferentes tipos de residuos y su aplicación catalítica.

REVISIÓN DE LA LITERATURA

1. Estudio Cronológico de los Catalizadores

1.1. Antigüedad: Edad Media.

La catálisis es esencial para la vida y ha sido utilizada desde tiempos antiguos. Según Manuela y María Teresa Martín Sánchez, en China, Egipto y Persia desde más de 5000 años a.C., las fermentaciones enzimáticas eran ampliamente utilizadas (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009). El vino, cerveza, alcohol y ácido acético son la producción más antigua de la humanidad de los procesos catalíticos, mediante la fermentación de carbohidratos. Esta tecnología ya se practicaba antes de 2000 años a. C (Moulijn & van Santen, 2017).

En cambio, en la Edad media los alquimistas comprobaron que al mezclar distintos productos a veces adquirían materias útiles en cantidades no esperadas y mediante fenómenos catalíticos (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009). Por ejemplo el ácido sulfúrico se utilizaba comúnmente en laboratorio para facilitar reacciones como la síntesis de éter dietílico, y se desarrollaron procedimientos para su obtención mediante la combustión de azufre con ácido nítrico en aire húmedo, proceso que constituye un ejemplo temprano de catálisis homogénea (Moulijn & van Santen, 2017) (Davis, 2008). Existen registros del uso de ácido sulfúrico como catalizador desde 1552, cuando Valerius Cordus catalizó la conversión de alcohol en éter dietílico (Davis, 2008) (Lindström & Pettersson, 2003) (Piumetti, 2014) (Wisniak, 2010).

1.2. Siglo XVIII: Primeras observaciones industriales.

Posteriormente, en 1746, la introducción del plomo como material de construcción posibilitó la producción industrial a gran escala de ácido sulfúrico mediante el denominado proceso de cámaras de plomo, considerado la primera aplicación comercial relevante de un proceso catalítico (Moulijn & van Santen, 2017).

En 1794, el concepto de catálisis fue inventado por la química Elizabeth Fulham, basándose en su novedoso trabajo sobre las reacciones de oxidación reducción (Isahak & Al-Amiry, 2024).

A fines del siglo XVIII, Johann Döbereiner observó que el dióxido de manganeso catalizaba la descomposición del clorato de potasio. Priestley, Scheele y otros realizaron experimentos que mostraban fenómenos catalíticos, aunque aún sin un marco teórico (Wisniak, 2010) (Fechete et al., 2012).

1.3. 1811–1835: Primeras definiciones y experimentos formales.

Paralelamente, a finales del siglo XVIII e inicios del XIX, se descubrió que metales como cobre e hierro, así como óxidos metálicos, podían influir en la descomposición de compuestos como el etanol, variando el producto según el catalizador: eteno y agua con piedra pómex, o carbono y gas con metales. Humphry Davy, trabajando en la seguridad de lámparas mineras, observó que platino y paladio calientes catalizaban la combustión de gases inflamables (Moulijn & van Santen, 2017) (Wisniak, 2010). Aunque inicialmente atribuyó estos efectos a propiedades térmicas, investigaciones posteriores, como las de Faraday en 1834, apuntaron a la adsorción de reactivos en la superficie del catalizador como paso clave para la reacción (Moulijn & van Santen, 2017).

En el siglo XIX se comienzan a estudiar todo lo relacionado con la catálisis. En 1811, Kirchhoff descubrió que al hervir almidón con ácido sulfúrico diluido se producía azúcar, sin que el ácido se consumiera (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009) (Moulijn & van Santen, 2017) (Davis, 2008) (Wisniak, 2010).

En 1812, Thenard observó la descomposición espontánea del agua oxigenada al adicionar polvos metálicos y en 1823 se dio cuenta de la acción del platino en la síntesis del agua, acción que describe diciendo: "la fuerza ejercida por el sólido sobre los gases que de esta

forma son conducidos a la asociación lo cual los lleva a la combinación". Él mismo reconoce que ese fenómeno catalítico ya lo había observado el físico Ambrogio Fusimieri al indicar que el platino determinaba sobre su superficie capas de las sustancias combustibles en continua renovación (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009).

Entre 1820 y 1830, Döbereiner demostró que el platino podía catalizar la combustión de mezclas gaseosas, y en 1831, Phillips patentó el proceso de contacto (oxidación de SO₂ a SO₃ usando platino) (Moulijn & van Santen, 2017) (Davis, 2008) (Wisniak, 2010).

En 1835, Jöns Jakob Berzelius introdujo el término "catálisis" y postuló la existencia de una "fuerza catalítica", marcando el nacimiento formal de esta ciencia (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009) (Moulijn & van Santen, 2017) (Davis, 2008) (Lindström & Pettersson, 2003) (Piumetti, 2014) (Wisniak, 2010).

En 1836, Berzelius acuñó el nombre de "catálisis" (cata = hacia abajo y lisis = romper). Además, concluyó que una nueva fuerza que puede aparecer lo mismo en la naturaleza orgánica que inorgánica y que no tiene por qué ser distinta de la naturaleza electroquímica, capaz de despertar en las sustancias propiedades o afinidades que parecía que estaban escondidas. Berzelius dijo: "Desearía utilizar una derivación bien conocida en química llamándola fuerza catalítica de los cuerpos, y la descomposición produce catálisis, así como la separación por la afinidad química ordinaria se llama análisis. La naturaleza de la fuerza catalítica parece consistir esencialmente en las circunstancias en las que las sustancias son capaces de traer en actividad afinidades que a esa temperatura parecía que estaban dormidas" (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009).

La palabra "catálisis" proviene del griego καταλυση, que significa soltar, permitir el libre movimiento descendente. En la época de Berzelius, se utilizaba el término "afinidad"; sin embargo, a nivel molecular, no se comprendían las velocidades de reacción. Aunque el

conocimiento era limitado, la catálisis como nueva herramienta estaba en pleno auge (Moulijn & van Santen, 2017).

Los catalizadores en la historia abarcan una gran cantidad de teorías y logros que han transformado la sociedad. Como el papel perdurable y transformador en el desarrollo humano y progreso industrial.

1.4. Finales del siglo XIX: Teoría y sistematización.

Wilhelm Ostwald, en 1891, propuso que los catalizadores solo afectan la velocidad de las reacciones, no su equilibrio. Esta definición fue fundamental para establecer la base cinética de la catálisis, por la cual recibió el Premio Nobel en 1909 (Davis, 2008) (Wisniak, 2010).

Knietisch, en 1898, se desarrollaron los grandes procesos industriales, como la producción de ácido sulfúrico con el método de contacto (Lindström & Pettersson, 2003).

1.5. 1909–1920: Catálisis industrial y fertilizantes.

Paul Sabatier, también premiado con el Nobel, descubrió que no solo el platino, sino también otros metales de transición finamente divididos eran activos en reacciones de hidrogenación. Él formuló el “principio de Sabatier”, según el cual existe una energía óptima de adsorción entre reactivos y catalizador que maximiza la velocidad de reacción, lo que le valió el Nobel en 1912 (Moulijn & van Santen, 2017) (Piumetti, 2014) (Wisniak, 2010) (Fechete et al., 2012).

Fritz Haber desarrolló la síntesis del amoníaco a partir de N₂ e H₂ usando catalizadores de hierro, proceso que Carl Bosch escaló a nivel industrial. El proceso Haber–Bosch en 1913, fue esencial para la producción masiva de fertilizantes y recibió el Nobel en 1918. Este hito marcó el inicio de la catálisis a gran escala como eje de la industria química moderna (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009) (Davis, 2008) (Lindström & Pettersson, 2003) (Piumetti, 2014).

Durante la primera guerra mundial, Langmuir propuso la teoría de la quimisorción, según la cual los gases se adsorben químicamente en la superficie del catalizador formando una monocapa, lo que permitió abordar cuantitativamente los mecanismos de catálisis heterogénea y revolucionó la comprensión experimental (Wisniak, 2010).

1.6. 1920–1940: Expansión en la petroquímica.

Durante la Segunda Guerra Mundial, la catálisis cobró gran importancia industrial debido a la necesidad de producir combustibles de aviación mediante procesos de ruptura catalítica de hidrocarburos pesados. Esto impulsó el desarrollo de catalizadores capaces de fragmentar moléculas grandes en fracciones más ligeras, como la gasolina, y sentó las bases para el crecimiento de la industria petroquímica, especialmente en la producción de polímeros sintéticos. Se perfeccionaron técnicas como el craqueo catalítico fluido y se diseñaron catalizadores resistentes a altas temperaturas (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009) (Moulijn & van Santen, 2017) (Davis, 2008).

En paralelo, el estudio de las superficies catalíticas adquirió relevancia con el aporte de Hugh Stott Taylor, quien introdujo el concepto de “sitios activos” para explicar la reactividad localizada en catalizadores sólidos heterogéneos. Más adelante, se descubrió que las propiedades de partículas metálicas nanométricas, como el oro, podían variar significativamente con el tamaño, lo que dio lugar a los catalizadores heterogéneos de sitio único. Estos nuevos materiales combinan la alta selectividad de la catálisis homogénea con la facilidad de separación de la heterogénea, utilizando estructuras porosas como las zeolitas para alcanzar una elevada eficiencia y especificidad en los procesos químicos (Davis, 2008) (Piumetti, 2014).

Durante el periodo entre guerras, se desarrollaron procesos como Fischer-Tropsch en 1922-1925, para sintetizar hidrocarburos desde gas de síntesis, en 1930 el craqueo catalítico

para la producción de gasolina desarrollado por Houdry, y la síntesis de gas por Bergius y Bosch. Hugh Taylor introdujo el concepto de “sitios activos” en la superficie de catalizadores sólidos, que explicaba su eficacia (Lindström & Pettersson, 2003) (Fechete et al., 2012).

1.7. 1950–1970: Fundamentos modernos y catálisis ambiental.

Tras la Segunda Guerra Mundial, la catálisis industrial experimentó una notable expansión, especialmente en la industria petroquímica, con avances en procesos como la isomerización, el craqueo catalítico y la síntesis de amoníaco. También cobró relevancia en la producción de polímeros y en la protección ambiental, con el desarrollo de catalizadores automotrices a base de platino, rodio y paladio para eliminar gases contaminantes. Durante este periodo, se descubrió la existencia de "venenos catalíticos" capaces de desactivar los sitios activos de los catalizadores, lo que motivó el diseño de estrategias para mitigar su efecto (Wisniak, 2010).

Uno de los hitos más importantes fue el desarrollo, entre 1953 y 1954, de los catalizadores de Ziegler-Natta para la polimerización de olefinas como el etileno y el propileno, lo que dio origen a la industria moderna de los plásticos. Este descubrimiento les valió el Premio Nobel de Química en 1963 (Lindström & Pettersson, 2003).

A partir de los años 1970, la catálisis ambiental ganó protagonismo con el desarrollo de los primeros catalizadores para automóviles por la empresa Engelhard, incluyendo el sistema de tres vías para controlar simultáneamente CO, NOx e hidrocarburos. En paralelo, el uso de zeolitas en procesos como la conversión de metanol en gasolina en 1976 consolidó la catálisis como pilar de la refinación avanzada. También surgieron nuevas áreas como la catálisis homogénea, reconocida con el Nobel a Wilkinson en 1973 y la biocatálisis, que comenzó a incorporar enzimas y sistemas biológicos (Lindström & Pettersson, 2003).

Desde el punto de vista teórico, Henry Eyring y sus colaboradores introdujeron la teoría del estado de transición, que explica cómo los catalizadores reducen la energía de activación, mientras que Irving Langmuir desarrolló modelos cinéticos para describir los fenómenos de adsorción y reacción en superficies sólidas, sentando las bases de la catálisis moderna (Davis, 2008).

1.8. 1980–1990: Avances en medio ambiente y estructuras porosas.

En las últimas décadas del siglo XX y comienzos del XXI, surgieron nuevas áreas de investigación en catálisis impulsadas por el descubrimiento de materiales avanzados como los fullerenos, nanotubos de carbono y nanopartículas metálicas, especialmente de oro y óxido de cerio. Estos materiales mostraron propiedades catalíticas únicas debido a su tamaño, estructura y alta relación entre superficie y volumen, lo que permitió diseñar catalizadores más activos, selectivos y económicos. Estas innovaciones abrieron el camino para aplicaciones en campos tan diversos como la medicina, la síntesis química y, sobre todo, la química verde, donde se busca reducir el uso de reactivos tóxicos, minimizar residuos y mejorar la eficiencia energética de los procesos químicos (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009) (Moulijn & van Santen, 2017) (Davis, 2008). En paralelo, se consolidaron tecnologías ambientales como la reducción catalítica selectiva (SCR) para la eliminación de óxidos de nitrógeno (NOx) en gases de combustión industrial y vehicular, empleando catalizadores basados en óxidos de vanadio, tungsteno y titanio. Además, se expandió el uso de zeolitas y óxidos metálicos soportados en la refinación de hidrocarburos y el tratamiento de emisiones contaminantes. Así, la catálisis se consolidó no solo como herramienta fundamental para la industria química tradicional, sino también como un pilar tecnológico en la transición hacia procesos más sostenibles, limpios y compatibles con los desafíos medioambientales contemporáneos (Fechete et al., 2012).

1.9. Desde 2000: Nanocatálisis, química verde y caracterización avanzada.

Con la nanotecnología, se descubrió que partículas como el oro en escala nanométrica podían actuar como catalizadores activos. Se diseñaron catalizadores con materiales porosos como marcos metal-orgánicos (MOFs), zeolitas u otros y sistemas híbridos para reacciones selectivas, sostenibles y eficientes. Actualmente la catálisis es central en la conversión de CO₂, producción de hidrógeno, valorización de residuos y síntesis limpia, siendo impulsada por técnicas como espectroscopía in situ y microscopía electrónica de alta resolución (Martín Sánchez & Martín Sánchez, 2009) (Fechete et al., 2012).

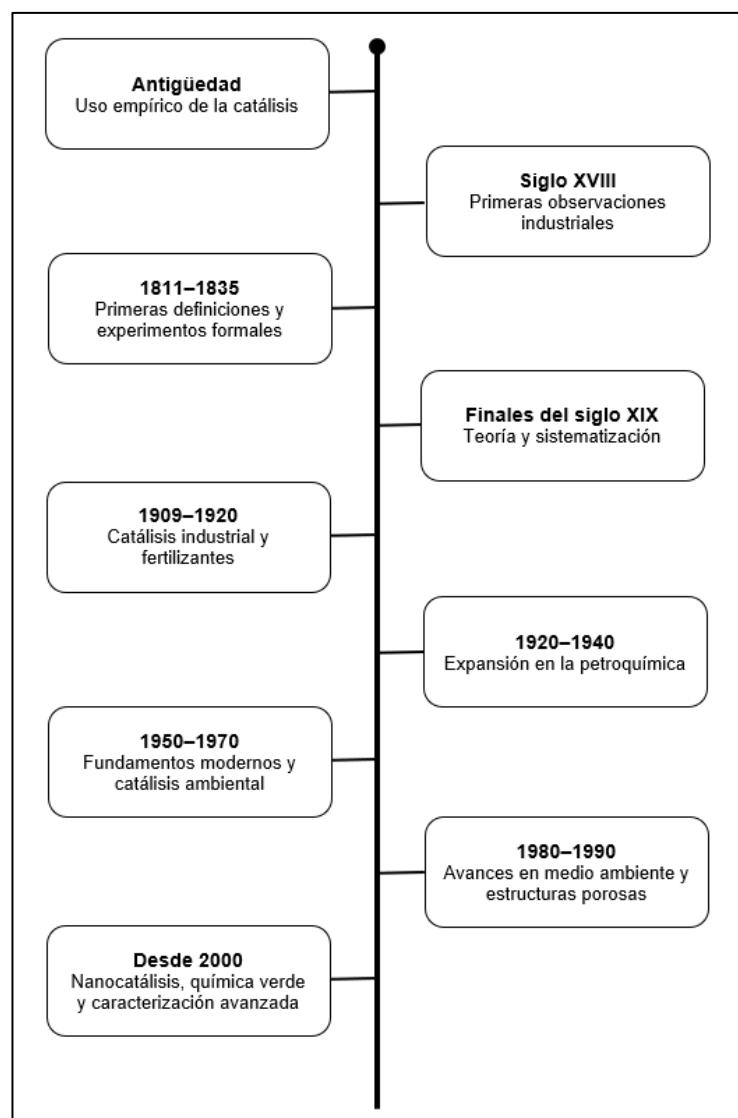


Figura 1. Resumen de la historia de la catálisis.

2. Aplicaciones a la Química Verde

Para hablar de catalizadores primero debemos saber los siguientes conceptos para entender este tema.

2.1. Catalizadores.

Las reacciones químicas ocurren cuando los reactivos se transforman en productos, pero este proceso puede ser lento porque requiere superar una barrera de energía llamada energía de activación. Los catalizadores son sustancias que aceleran las reacciones al disminuir esta energía de activación, lo que permite que las moléculas reaccionen más fácilmente. Además, ayudan a mejorar el rendimiento de las reacciones al favorecer la formación del producto deseado (Khalaf et al., 2025).

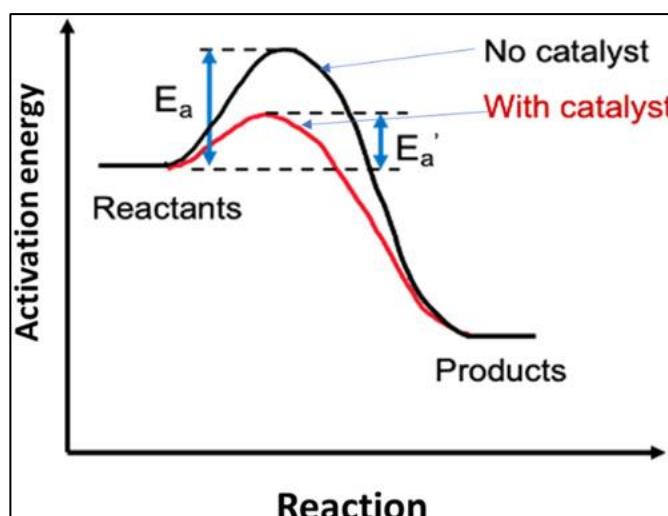
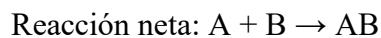


Figura 2. Diagrama que representa el catalizador reduciendo la energía de activación y acelerando así la reacción (Khalaf et al., 2025).

Los catalizadores funcionan ofreciendo una ruta alternativa para la reacción, con menor energía de activación, sin alterar la energía total entre reactivos y productos. Como cambia la energía durante una reacción, comparando los casos con y sin catalizador (Figura 2). En el eje x se ve el avance de la reacción y en el eje y se ve la energía. Cuando se usa un catalizador, la

energía de activación (E_a) es menor, representada como una colina más baja, que la reacción debe superar antes de llegar a los productos. Aunque la reacción sigue un mecanismo diferente, el catalizador no se consume y la ecuación neta de la reacción no cambia, asegurando el mismo resultado final, pero de forma más rápida y eficiente (Khalaf et al., 2025).



2.2. Clasificación de catalizadores

Catalizador heterogéneo: Es un catalizador que está en una fase diferente de los reactivos y productos. Por ejemplo, un sólido actuando sobre sustancias líquidas o gaseosas. Esto significa que los reactivos no se mezclan completamente, sino que las reacciones ocurren en su superficie sólida. Además, son muy usados en la industria porque combinan buena actividad catalítica con facilidad de recuperación y reciclaje, contribuyendo a procesos más sostenibles (Khalaf et al., 2025)(García Aguilar, 2017).

Catalizador homogéneo: Es un catalizador que está en la misma fase que los reactivos y productos, es decir, todos son sólidos, líquidos o gaseosos. Esto significa que el catalizador se mezcla completamente con los reactivos durante la reacción. Además, son muy eficientes y selectivos, permitiendo controlar reacciones con gran precisión y obtener altos rendimientos. Sin embargo, tienen el inconveniente de ser más difíciles de separar y recuperar después de la reacción, lo que puede aumentar costos y generar residuos (Khalaf et al., 2025).

2.3. Diferentes fuentes de metales reciclados para realizar catalizadores

En la actualidad, los metales pueden ser recuperados de diversas fuentes de desecho, como residuos electrónicos, metalúrgicos e incluso residuos generados en laboratorios académicos, con el fin de aumentar su ciclo de vida útil. Investigaciones recientes han desarrollado métodos eficientes como la lixiviación, electroquímicos, hidrometalúrgicos u

otros, con la finalidad de extraer metales de placas de circuitos, baterías desechadas y aguas residuales industriales. Como podemos ver en los siguientes casos que los metales recuperados han sido transformados en nanopartículas con propiedades catalíticas y antimicrobianas, útiles para degradación de contaminantes en el agua e incluso para reducir dióxido de carbono (CO_2) en procesos sostenibles (Rai, 2025) (Rai, 2023).

2.1.1. Residuos electrónicos.

El crecimiento acelerado de la transformación digital ha provocado un aumento sin precedentes en la cantidad de dispositivos electrónicos en todo el mundo. Las personas usan múltiples aparatos para comunicarse, estudiar, trabajar y entretenerte, lo que ha incrementado considerablemente la generación de residuos aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE). En 2022, se produjeron 62 mil millones de kg de RAEE, equivalentes a 7.8 kg por persona, pero solo el 22.3 % fue reciclado adecuadamente. Desde 2010, la generación de estos residuos ha aumentado a un ritmo de 2.300 millones de kg por año, muy por encima del crecimiento en la capacidad de reciclaje documentada, que crece apenas 500 millones de kg por año. Además, muchos dispositivos vendidos en países desarrollados terminan en países en desarrollo sin medidas seguras para su procesamiento, lo que agrava los problemas ambientales y sanitarios (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), 2024).

Los residuos electrónicos representan uno de los flujos de desechos de más rápido crecimiento a nivel global y plantean serios riesgos ambientales. Muchos dispositivos tienen una vida útil corta, y su eliminación inadecuada, mediante vertido o quema, libera metales pesados como plomo, mercurio y cromo, contaminando aire, suelo y agua. No obstante, estos residuos se caracterizan por ser una fuente valiosa de materiales, ya que contienen metales básicos como cobre, níquel y hierro, metales raros como niobio, tántalo y metales preciosos

como oro, plata, paladio. Por ejemplo, se observa en el grafico que la composición metálica de las tarjetas de circuito impreso (PCB), ya que estos pueden contener hasta 60 elementos químicos, con concentraciones metálicas altas que superan las concentraciones de minerales extraídos de la forma tradicional (Figura 3) (Ryabchuk et al., 2021)..

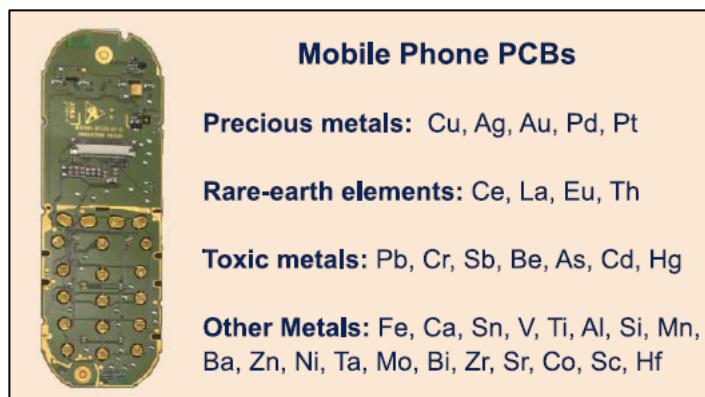


Figura 3. Composición de los PCB para teléfonos móviles (Ryabchuk et al., 2021).

Entre los usos más innovadores de estos residuos, es el desarrollo de catalizadores heterogéneos y homogéneos. Estos catalizadores, obtenidos a partir de metales de preciosos, transición y óxidos presentes en aparatos electrónicos desechados, que pueden reutilizarse para diversas aplicaciones (Paone & Mauriello, 2024) (Rautela et al., 2024).

Los siguientes casos de residuos electrónicos, se desarrollaron catalizadores heterogéneos y homogéneos principalmente con base en cobre, oro y paladio, utilizando técnicas como lixiviación ácida, extracción con agentes complejantes, y reducción sobre soportes como alúmina o materiales magnéticos. Estos catalizadores fueron efectivos en reacciones de hidrogenación, acoplamientos cruzados y oxidaciones, con buen rendimiento, y en algunos casos, reutilización limitada debido a lixiviación de metales (Wink & Hartmann, 2024) .

1. Ryabchuk, Pavel y colaboradores propone un proceso innovador e ingeniosa para convertir residuos electrónicos, específicamente tarjetas de circuito impreso (PCB) de

teléfonos móviles, en catalizadores heterogéneos de cobre (Cu-iKat) útiles para reacciones químicas sostenibles. Primero extraen los metales de cobre y níquel presentes de las PCB mediante la lixiviación ácida con HNO_3 . Después se realizó precipitación sobre alúmina ($\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$) mediante ajuste de pH, y finalmente se ejecuta pirólisis a 800 °C bajo atmósfera inerte para formar el catalizador sólido. Este Cu-iKat mostró alta eficiencia en reacciones de hidrogenación de compuestos orgánicos como cetonas, N-heterociclos y alcoholes bencílicos, así como en la hidrogenólisis de formamidas (Ryabchuk et al., 2021).

2. McCarthy y colaboradores descubrieron una forma inteligente y ecológica de reutilizar el oro de las tarjetas SIM viejas sin necesidad de fundirlo ni purificarlo completamente. Utilizaron un proceso suave de lixiviación en las tarjetas SIM, eliminando primero los componentes orgánicos con tetrahidrofurano (THF) y luego extrayendo secuencialmente el cobre con peróxido de hidrógeno en solución de sulfato amoniacal y níquel con HCl. Posteriormente, emplearon agentes derivados de ditiooxamida para extraer el Au(III) como complejo, sin necesidad de refinarlo a oro metálico. Este complejo se utilizó directamente en las siguientes reacciones química:

- ciclación de amidas propargílicas,
- condensación de acetilacetona y o-yodoanilina,
- reacciones de adición de arenos ricos en electrones a compuestos carbonílicos α,β -insaturados,
- acoplamientos oxidativos C–C de arilsilanos y arenos.

Este "nuevo oro líquido" funcionó igual de bien que otros productos comerciales más caros. Además, el proceso también recupera cobre y níquel, ya que es una ventaja económica y amigable con el ambiente (McCarthy et al., 2022).

3. Lacanau y colaboradores desarrollaron un método sostenible para recuperar paladio (Pd) de residuos electrónicos, un metal valioso que se encuentra en partes pequeñas de aparatos electrónicos viejos, como las placas de computadoras. y utilizarlo directamente como catalizador en reacciones químicas sin necesidad de purificarlo como metal. Mediante una lixiviación suave con ácido nítrico, extrajeron el Pd aleado con plata, y luego usaron líquidos extractante orgánicos para separarlo. Después, lo trasladaron a una solución acuosa con surfactantes especiales, donde el Pd quedó disuelto de forma estable. Esta solución fue usada directamente en una reacción Suzuki–Miyaura en agua, y mostró la misma eficacia que un catalizador comercial. Asimismo, los autores demostraron que este proceso simplifica la recuperación de Pd, ya que evita varias etapas generadoras de residuos, como la precipitación, la calcinación (quema) y el electro obtención del paladio (Lacanau et al., 2020).
4. En contexto de la revalorización de metales preciosos, Li y colaboradores desarrollaron un método eficiente para recuperar oro de residuos electrónicos, eliminando primero el recubrimiento de las placas de circuito con hidróxido de sodio y luego extrayendo el oro con agua regia. Utilizaron un material magnético recubierto con tiourea, capaz de capturar y reducir los iones de oro (Au^{3+}) directamente en la solución, transformándolos en partículas metálicas (Au^0). Este material mostró alta selectividad, rapidez de adsorción y reutilización, además de ser fácilmente recuperable mediante un imán. El oro recuperado se usó con éxito como catalizador en la reacción de hidrogenación de 4-nitrofenol, con resultados superiores a otros catalizadores similares (H. Li et al., 2022).
5. El estudio de Martins y colaboradores presenta, un proceso de economía circular para recuperar cobre de residuos electrónicos, específicamente de placas de circuito impreso (PCBs), mediante lixiviación ácida en dos etapas con ácido sulfúrico y peróxido de

hidrógeno, logrando una recuperación del 97% de cobre. Se sintetizaron nanopartículas de cobre (CuNPs) por medio de un método verde. Es decir, el cobre reciclado se sintetizó CuNPs, en ácido ascórbico como reductor y estabilizante, evitando el uso de agentes tóxicos. Las CuNPs obtenidas fueron caracterizadas por diversas técnicas, confirmando su tamaño, forma y estabilidad. Finalmente, se aplicó el catalizador para la degradación de un surfactante obtenido en operaciones de flotación en aplicaciones mineras; mediante un proceso Fenton modificado. Como resultado se obtuvo una remoción del 57% de carbono orgánico total, siendo superior al proceso Fenton tradicional con hierro. Este enfoque demuestra una alternativa sostenible para el tratamiento de aguas contaminadas y el aprovechamiento de residuos electrónicos (Martins et al., 2021).

6. En cambio, Wang y colaboradores reutilizaron placas electrónicas viejas de computadoras para crear un catalizador capaz de limpiar agua contaminada. Primero, las placas fueron trituradas en pedazos pequeños y luego se calentó a 350°C en un horno sin oxígeno para convertir parte del plástico en carbón y dejar al cobre expuesto. Cuyo material obtenido fue llamado c-PCB, este material se usó para eliminar un colorante tóxico (Rhodamine B) que está presente en aguas residuales de fábricas textiles. Para lograrlo, se mezcló este polvo con agua contaminada por el colorante y agua oxigenada, generando una reacción que destruyó las moléculas del colorante, logrando eliminar hasta el 97% de la suciedad del agua. Además, este polvo reciclado se pudo usar varias veces sin perder mucha efectividad, mostrando que es una opción económica y ecológica para aprovechar basura electrónica y limpiar aguas industriales (C. Wang, Cao, et al., 2019).

7. En este estudio, los investigadores desarrollaron un catalizador heterogéneo a partir de residuos de placas de circuito impreso (WPCBs), los cuales fueron simplemente triturados mecánicamente para obtener un polvo rico en cobre metálico (Cu^0), sin necesidad de tratamiento químico adicional. Este polvo de material reciclado se utilizó para limpiar agua contaminada con un químico tóxico llamado piridina, que se encuentra en aguas residuales industriales. La reacción con peróxido de hidrógeno (H_2O_2) generó radicales hidroxilos ($\cdot\text{OH}$) y aniones superóxido (O_2^-), especies altamente oxidantes que rompieron las moléculas de piridina, logrando una eliminación del 90% bajo condiciones suaves de pH y temperatura. Además, se detectó la disolución parcial de metales como Cu^{2+} y Fe^{3+} , lo que contribuyó a la reacción homogénea en solución. Este trabajo propone un método económico y sostenible para reutilizar residuos electrónicos en el tratamiento avanzado de aguas contaminadas (N. Li et al., 2014).
8. En “Copper/carbon Composites from Waste Printed Circuit Boards as Catalysts for Fenton-Like Degradation of Acid Orange 7 Enhanced by Ultrasound” propone una solución sostenible y ecológica al problema de los residuos electrónicos y las aguas contaminadas, mediante el desarrollo de catalizadores compuestos de cobre y carbono (Cu/C) a partir de tarjetas de circuito impreso (PCBs) desechadas. Los PCBs se trituraron y carbonizaron bajo atmósfera de nitrógeno a tres temperaturas (350, 500 y 650 °C), siendo el material carbonizado a 500 °C y fue denominado PCB500, es el más eficiente. Estos catalizadores fueron aplicados en un proceso Fenton-like que se usó peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y ultrasonido (US) para degradar el colorante azoico Acid Orange 7 (AO7), comúnmente presente en efluentes textiles. Se estudiaron diversos parámetros como dosis de catalizador, concentración de H_2O_2 , pH, presencia de aniones

y concentración de AO7, logrando hasta 93,27 % de degradación en 90 minutos. Los análisis demostraron que el cobre metálico (Cu^0) es el principal responsable de la activación del peróxido de hidrógeno, generando radicales hidroxilos ($\bullet OH$), que atacan y descomponen las moléculas del colorante. Además, el catalizador mostró buena estabilidad, reutilización por al menos 5 ciclos y una mínima liberación de cobre, cumpliendo con estándares ambientales. En conjunto, el trabajo presenta un enfoque innovador que combina la valorización de residuos electrónicos con la depuración eficiente de aguas residuales (C. Wang, Jiang, et al., 2019).

9. El estudio de "Waste printed circuit boards as novel potential engineered catalyst for catalytic degradation of Orange II" realizo catalizadores heterogéneos para la degradación del colorante azoico Orange II en agua con el uso innovador de placas de circuito impreso desechadas (w-PCBs), mediante un proceso Fenton-like utilizando peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Se prepararon los catalizadores con retiro de todos los componentes electrónicos y triturando las w-PCBs. Aprovechando su alto contenido de cobre (26.27 %), que actúa como activador del H_2O_2 para generar radicales hidroxilos ($\bullet OH$), los cuales oxidan y degradan el colorante. Se evaluaron distintos factores como la dosis del catalizador, concentración de H_2O_2 , pH, temperatura y concentración del colorante, observando que el sistema es altamente eficiente y alcanza hasta un 97.98 % de degradación en 6 horas a pH neutro y 40 °C. Las pruebas de cinética indican un comportamiento de primer orden con una energía de activación de 63 kJ/mol, y el mecanismo fue confirmado mediante espectros UV-Vis y experimentos con inhibidores de radicales. Esta investigación demuestra que las w-PCBs, además de ser residuos peligrosos, pueden convertirse en catalizadores funcionales, ofreciendo una solución

económica, sostenible y efectiva para el tratamiento de aguas residuales contaminadas con colorantes (C. Wang, Wang, et al., 2019).

Tabla 1. Resumen de catalizadores realizado de residuos electrónicos

Catalizadores realizados de Residuos Electrónicos				
Catalizador reciclado	Método de reciclaje	Reacción catalítica aplicada	Tipo de Catalizador	Referencia
A base de Cu	Precipitación del lixiviado ácido sobre Al_2O_3 y posterior pirólisis	Reacciones de hidrogenación, desoxigenación e hidrogenólisis	Heterogéneo	(Ryabchuk et al., 2021)
Au (III)	Extracción suave con agentes complejantes	Conjunto de diferentes reacciones orgánicas	Homogéneo	(McCarthy et al., 2022)
Pd (III)	Extracción selectiva con extractores y tensioactivos	Acoplamiento cruzado	Homogéneo	(Lacanau et al., 2020)
Au	Captura in situ y reducción de iones Au por partículas	Hidrogenación del 4-nitrofenol	Heterogéneo	(H. Li et al., 2022)
Nanopartículas de Cobre (CuNPs)	Lixiviación ácida en dos etapas ($\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$), seguido de síntesis verde con ácido ascórbico	Proceso Fenton para degradación de surfactantes de minería	Heterogéneo	(Martins et al., 2021)
Cobre soportado en carbono	Carbonización térmica de placas trituradas a 350°C en atmósfera de nitrógeno	Reacción tipo Fenton heterogénea para degradación de Rhodamine B (colorante textil)	Heterogéneo	(C. Wang, Cao, et al., 2019)
Polvo de WPCBs (principalmente Cu^0)	Trituración mecánica de WPCBs sin tratamiento químico adicional	Reacción similar a Fenton heterogénea para degradación de piridina (oxidación avanzada con H_2O_2)	Heterogéneo	(N. Li et al., 2014)
Cu/C (cobre/carbono)	Carbonización térmica bajo N_2	Degradación Fenton-like del colorante Acid Orange 7 (AO7) asistida por ultrasonido	Heterogéneo	(C. Wang, Jiang, et al., 2019)
w-PCB (rico en Cu^0)	Trituración mecánica y separación física	Degradación del colorante Orange II con H_2O_2 (Fenton-like)	Heterogéneo	(C. Wang, Wang, et al., 2019)

2.1.2. Baterías desechadas.

En los últimos años, el uso masivo de baterías de ion-litio (LIBs) ha crecido exponencialmente debido a su aplicación en dispositivos electrónicos, equipos médicos, fuentes de energía renovable y, especialmente, en el auge de los vehículos eléctricos (EV). Este crecimiento ha generado una gran preocupación ambiental, ya que se estima que para 2030 habrá más de 11 millones de toneladas métricas de LIBs desechadas en todo el mundo. A pesar de su creciente demanda, actualmente se recicla al menos el 5 % de estas baterías, lo que representa una amenaza significativa para el medio ambiente y la salud humana, debido a la presencia de metales pesados tóxicos e inflamables, así como electrolitos peligrosos. En muchos países, aún no existen estrategias claras ni eficaces para la gestión de finalización de vida útil de estas baterías. Por lo tanto ha motivado un fuerte interés al desarrollo de métodos sostenibles de recuperación y reutilización de sus componentes (Q. Li et al., 2025)(López et al., 2024)(Shivamurthy et al., 2024).

Las LIBs contienen diversos metales valiosos en sus materiales de cátodo, como litio (Li), cobalto (Co), níquel (Ni), manganeso (Mn), hierro (Fe), aluminio (Al) y cobre (Cu), principalmente en forma de óxidos metálicos. En lugar de someter estos metales a costosos y complejos procesos de extracción y purificación, ha surgido una alternativa innovadora, el uso directo de los materiales catódicos reciclados como catalizadores heterogéneos. Esta propuesta aprovecha la capacidad de los óxidos de Co, Ni y Mn como centros activos en múltiples reacciones catalíticas, especialmente en procesos de oxidación y en la descomposición de contaminantes. El uso directo de estos materiales no solo es más económico que la síntesis tradicional de catalizadores en laboratorio, sino que también representa un avance importante dentro de los principios de la química verde y la economía circular (Wink & Hartmann, 2024) (Shivamurthy et al., 2024).

Además de las aplicaciones en descontaminación ambiental, los catalizadores derivados de LIBs también están siendo explorados para la electrólisis del agua y la síntesis de compuestos orgánicos, mostrando gran versatilidad y eficiencia. Esta estrategia permite convertir un residuo peligroso y abundante en un recurso valioso, reduciendo tanto el impacto ambiental como la presión sobre los recursos naturales. A medida que crece la demanda de baterías y la preocupación por su disposición final, se vuelve urgente para fomentar modelos de gestión que prioricen la reutilización, alargamiento de la vida útil y la valorización funcional de sus materiales. Como podemos observar en los siguientes casos, las LIBs desechadas dejan de ser un pasivo ambiental para convertirse en una fuente prometedora de materiales catalíticos sostenibles (Wink & Hartmann, 2024) (López et al., 2024) (Shivamurthy et al., 2024).

1. En “Recovery of manganese oxides from spent alkaline and zinc-carbon batteries. An application as catalysts for VOCs elimination”, se desarrolló un proceso para recuperar óxidos de manganeso a partir de pilas alcalinas y de zinc-carbono gastadas, mediante una técnica biohidrometalúrgica que empleó bacterias *Acidithiobacillus thiooxidans* para producir un ácido capaz de disolver metales presentes en las pilas, sin usar químicos peligrosos. Del proceso se obtuvieron tres tipos de óxidos de manganeso:
 - RMO es el óxido residual que se obtuvo en la lixiviación,
 - EMO es el óxido recuperado por electrólisis,
 - CMO es el óxido obtenido por precipitación química con permanganato de potasio.

Estos materiales fueron caracterizados por diversas técnicas que confirmaron diferencias en su estructura, composición y área superficial. Finalmente, los óxidos fueron probados como catalizadores en la oxidación de contaminantes gaseosos (VOCs) como etanol y heptano, mostrando que EMO y CMO presentaron mayor actividad catalítica y conversión a CO₂ en comparación con RMO, con mejores resultados para etanol que para heptano. Este

estudio demostró que es posible valorizar residuos peligrosos como pilas usadas para obtener materiales catalíticos útiles en procesos de descontaminación ambiental (Gallegos et al., 2013).

2. En “Removal of VOCs by catalytic process. A study of MnZnO composites synthesized from waste alkaline and Zn/C batteries”, se recuperaró metales como manganeso y zinc a partir de pilas alcalinas y de zinc-carbono gastadas mediante un proceso biohidrometalúrgico, en el que bacterias Acidithiobacillus thiooxidans generaron ácido de forma natural para disolver los metales presentes en los residuos de las pilas. A partir de esta solución se sintetizaron dos tipos de catalizadores: MnO_x (óxidos de manganeso) y ZnMnO (óxidos mixtos de zinc y manganeso), mediante precipitación química y calcinación. Estos materiales fueron caracterizados estructural y químicamente, demostrando buenas propiedades superficiales para actuar como catalizadores. Su aplicación se evaluó en la eliminación de contaminantes gaseosos (compuestos orgánicos volátiles, VOCs) como etanol y tolueno mediante oxidación catalítica. Se observó que MnO_x tuvo mejor eficiencia en la eliminación de tolueno y ambos catalizadores lograron oxidar etanol a temperaturas relativamente bajas. Este proceso propone una alternativa ecológica y efectiva para valorizar pilas gastadas como fuentes de catalizadores útiles en la descontaminación de emisiones industriales (Gallegos et al., 2017).
3. En 2018, Zhao y con otros investigadores desarrollaron un catalizador a base de ferrita de manganeso-zinc (Mn-Zn ferrite) reciclada a partir de pilas alcalinas gastadas. Para obtener el catalizador se realizó la lixiviación de los componentes activos de las pilas con ácido sulfúrico y peróxido de hidrógeno, seguido de la adición de hierro y ácido cítrico para formar un gel precursor que fue calcinado a 400°C. Este material se utilizó en la activación heterogénea del peroxodisulfato (PDS) bajo condiciones electro-

asistidas para la degradación de Bisfenol A (BPA), un contaminante tóxico frecuente en aguas residuales industriales. Las pruebas demostraron que el sistema Mn-Zn ferrite/PDS logró eliminar hasta el 89% del BPA en 60 minutos y funcionó bien en un amplio rango de pH, sin necesidad de ajuste de acidez y mostrando buena estabilidad tras tres ciclos de reutilización. Además, el catalizador pudo ser reutilizado con buen desempeño, mostrando un proceso sostenible que permite valorizar residuos peligrosos como pilas gastadas para la descontaminación de aguas industriales (Deng et al., 2018).

4. El artículo "Degradation of bisphenol A by activating peroxyomonosulfate with $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ fabricated from spent Zn-Mn alkaline batteries" presenta una investigación innovadora. Recuperaron y reutilizaron metales de batería alcalinas gastadas, que contenían metales como manganeso (Mn), zinc (Zn) y hierro (Fe), y el procesaron para crear un material catalítico llamado $Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe_2O_4$ mediante un método de combustión con citrato. Este material fue capaz de activar peroxyomonosulfato (PMS), un agente oxidante, para degradar bisfenol A (BPA) en el agua. El proceso logró eliminar hasta el 95.8% del BPA en 60 minutos sin requerir condiciones extremas. Además, se comprobó que los radicales activos generados provienen de interacciones químicas en la superficie del catalizador, y que el material puede reutilizarse sin perder eficacia. Este enfoque demuestra una forma eficiente y sostenible de reutilizar residuos metálicos de baterías como catalizadores para la descontaminación ambiental (Lin et al., 2019).
5. El estudio de Gonçalves y colaboradores proponen reciclar químicamente las baterías de ion de litio (Li-ion) de teléfonos celulares, que contienen óxidos metálicos como $LiCoO_2$, para usarlas como catalizadores en la eliminación de contaminantes del agua. Se utilizaron específicamente las cintas catódicas, que representan casi un tercio del

peso de la batería y están formadas principalmente por LiCoO₂ (óxido de litio y cobalto), combinadas con un colector de corriente de aluminio. Estas cintas se sometieron a un tratamiento térmico para eliminar impurezas y residuos orgánicos, convirtiéndolas en un material catalítico activo. Luego, ese material se utilizó para acelerar la degradación del colorante azul de metileno en presencia de peróxido de hidrógeno (H₂O₂). El proceso fue altamente eficiente, siendo superior la velocidad de degradación respecto al uso de H₂O₂ solo, demostrando que estos residuos electrónicos pueden tener una segunda vida útil como materiales funcionales para la remediación ambiental (Gonçalves et al., 2015).

6. Amarasekara y colaboradores desarrollaron tres catalizadores reciclados a partir de baterías de ion-litio (LIBs) gastadas (Amarasekara, Herath, et al., 2022; Amarasekara, Pinzon, et al., 2022; Amarasekara & Wang, 2023). Todos fueron preparados mediante un proceso similar de descarga, desmontaje mecánico, trituración y pirolización a 600 °C en aire, lo que permitió eliminar residuos orgánicos como aglutinantes y obtener un material catalíticamente activo. El producto final en cada caso es un catalizador heterogéneo compuesto por óxidos metálicos mixtos de níquel, manganeso y cobalto (LiNixMnyCozO₂) soportados sobre grafito, sin necesidad de añadir metales nobles. Además, todos estos catalizadores demostraron buena estabilidad y aplicabilidad en sistemas acuosos o suaves, lo que los hace viables para procesos industriales sostenibles. En cuanto a su aplicación, los tres catalizadores se utilizaron con éxito en la conversión de compuestos derivados de biomasa en productos químicos valiosos como la oxidación de furfural y furanos a ácidos carboxílicos con 82–97 % de rendimiento (Amarasekara, Pinzon, et al., 2022), la oxidación de glucosa a ácido glicólico obtuvo hasta 94 % de rendimiento (Amarasekara, Herath, et al., 2022) y la dimerización descarboxilativa del

ácido levulínico para obtener lactonas y alcoholes también obtuvo rendimientos de hasta 94 % (Amarasekara & Wang, 2023). Estos procesos se realizaron sin metales nobles y usando condiciones relativamente suaves, como oxígeno molecular y soluciones básicas. Al final, estos trabajos demuestran que es posible transformar un residuo tecnológico problemático como las baterías gastadas en catalizadores funcionales, reutilizables y ambientalmente responsables para la valorización de biomasa (Wink & Hartmann, 2024).

7. A diferencia de los 3 trabajos anteriores, Paone y colaboradores incorporaron un paso adicional de reducción en el proceso de reciclaje de baterías de ion-litio (LIBs), lo cual permitió generar una formación parcial partículas metálicas catalíticamente activas. Al igual proceso de Amarasekara y colaboradores, se realizó primero la separación mecánica del material catódico (masa negra), seguido de tamizada, molienda y calcinación a 600 °C durante 6 horas para eliminar componentes orgánicos. Sin embargo, posteriormente, se aplicó una reducción térmica a 500 °C bajo flujo de hidrógeno durante otras 6 horas, lo que activó aún más el material. El catalizador final consistió principalmente en Co y Ni metálicos, junto con óxidos de Mn y Al. Este catalizador reciclado se probó en reacciones de hidrogenación selectiva de compuestos derivados de biomasa, como furfural, 5-hidroximetilfurfural, benzaldehído, acetofenona y ciclohexanona, demostrando una buena versatilidad. Se logró demostrar su eficiencia tanto en hidrogenación directa con H₂, como en hidrogenación por transferencia, usando 2-propanol como solvente y donador de hidrógeno. El furfural se convirtió exitosamente en alcohol furfurílico en 90 minutos a 120 °C usando H₂ en 2-propanol. Bajo condiciones de hidrogenación por transferencia, se obtuvo un rendimiento del 70 %, que aumentó hasta 98 % a temperaturas mayores a 150 °C,

alcanzando resultados similares a los obtenidos con hidrógeno molecular. El catalizador también pudo transformar otros sustratos como 5-hidroximetilfurfural, benzaldehído, acetofenona y ciclohexanona, con rendimientos variables, lo que indica un amplio rango de aplicabilidad. Estos resultados demuestran que la reducción del material reciclado a formas metálicas de Co y Ni es clave para lograr una alta actividad catalítica en procesos de hidrogenación (Paone et al., 2022).

8. El artículo de Shivamurthy y colaboradores presentan un enfoque sostenible para reutilizar el material catódico de baterías de ion-litio gastadas, para generar un catalizador heterogéneo para la oxidación de alcohol bencílico a ácido benzoico. El material fue recuperado mediante descarga, desmontaje, molienda y calcinación a 800 °C, y caracterizado mediante XRD, XPS, SEM-EDX e ICP-OES, confirmando la presencia activa de óxidos de Li, Mn, Ni y Co. El catalizador logró 100 % de conversión de oxidación de alcohol bencílico a ácido benzoico con selectividad mayor del 99 %, bajo las siguientes condiciones como 140 °C, O₂ como oxidante, 2 % de carga catalítica, agua como solvente, K₂CO₃ como base y se mantuvo activo hasta 5 ciclos con mínima lixiviación de metales. También se realizó una comparación con catalizadores comerciales como Pd/C y AuNPs, como resultado el catalizador reciclado mostró igual o mejor desempeño sin necesidad de metales nobles, posicionándose como una alternativa ecológica y efectiva para valorizar residuos electrónicos y producir compuestos químicos valiosos (Shivamurthy et al., 2024).
9. El estudio de Li y asociados presentan un proceso verde y eficiente para reciclar cátodos gastados de baterías de ion-litio (NCM) usando un disolvente eutéctico profundo (DES) hecho de cloruro de colina y ácido oxálico, que extrae metales como níquel y cobalto de forma selectiva, sin recurrir a ácidos agresivos ni procesos contaminantes. A partir

de los metales recuperados, los autores sintetizan NiCo₂O₄ con estructura nanométrica mediante un proceso hidrotermal y calcinación, obteniendo un catalizador con alta superficie y excelente actividad. Este material reciclado se aplica como catalizador en baterías de litio-oxígeno (Li–O₂), donde muestra una capacidad muy alta, baja sobretensión y gran estabilidad durante ciclos de carga y descarga, demostrando que es posible convertir residuos de baterías en catalizadores funcionales de alto valor, contribuyendo así a la economía circular y al desarrollo de tecnologías energéticas más sostenibles (Q. Li et al., 2025).

Tabla 2. Resumen de catalizadores heterogéneos realizados de baterías desechadas

Catalizadores heterogéneos realizados de baterías desechadas			
Catalizador reciclado	Método de reciclaje	Reacción catalítica aplicada	Referencia
Óxidos de manganeso	Biohidrometalurgia	Oxidación total de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) como etanol y heptano	(Gallegos et al., 2013)
Óxidos de manganeso (MnO _x) y óxidos de manganeso-zinc (ZnMnO)	Biohidrometalurgia	Oxidación total de compuestos orgánicos volátiles (VOCs) como etanol y tolueno	(Gallegos et al., 2017)
Ferrita de manganeso-zinc (Mn-Zn ferrite, Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄)	Lixiviación ácida (H ₂ SO ₄ /H ₂ O ₂), ajuste de composición metálica, gelificación con ácido cítrico y calcinación (400°C)	Activación electro-asistida de peroxodisulfato (PDS) para degradación de bisfenol A (BPA) en agua	(Deng et al., 2018)
Mn _{0.6} Zn _{0.4} Fe ₂ O ₄	Síntesis por método de combustión con citrato a partir de metales recuperados	Activación de peroximonosulfato (PMS) para degradación de bisfenol A (BPA)	(Lin et al., 2019)
LiCoO ₂ calcinado	Tratamiento térmico a 500 °C para eliminar orgánicos	Degrado del colorante azul de metileno mediante H ₂ O ₂ activado	(Gonçalves et al., 2015)
LiBBM-600 (óxidos de Ni, Mn, Co en grafito)	Pirolización del electrodo negro a 600 °C en aire	Oxidación de glucosa a ácido glicólico usando O ₂ y NaOH	(Amarasekara, Herath, et al., 2022)

LiBBM-600 (óxidos de Ni, Mn, Co)	Pirolización del electrodo negro a 600 °C en aire	Dimerización y descarboxilación de ácido levulínico (LA)	(Amarasekara & Wang, 2023)
LiBBM-600 (óxidos de Ni, Mn, Co)	Pirolización del electrodo negro a 600 °C en aire	Oxidación de biofuranos (furfural, HMF, bisfurfural) a ácidos carboxílicos	(Amarasekara, Pinzon, et al., 2022)
LiNi _x Co _y Mn _z O ₂ en masa negra reducida	Molienda de bolas, calcinación y reducción con H ₂	Hidrogenación de furfurales	(Paone et al., 2022)
LiNi _x Co _y Mn _z O ₂	Descarga, desmontaje, trituración, calcinación a 800 °C, molienda y tamizado	Oxidación de alcohol bencílico a ácido benzoico usando O ₂	(Shivamurthy et al., 2024)
NiCo ₂ O ₄	Disolución en disolvente eutéctico profundo (DES) extracción selectiva de metales y síntesis hidrotermal con calcinación	Catálisis en baterías de litio-oxígeno	(Q. Li et al., 2025)

2.1.3. Aguas residuales.

En el contexto actual de crisis hídrica global, el acceso al agua limpia y al saneamiento sigue siendo un desafío urgente, tal como lo destaca el *Sustainable Development Goals Report 2024*. Para el 2022, más de 2.200 millones de personas carecían de acceso a agua potable segura y 3.500 millones no contaban con un sistema de saneamiento adecuado. Además, el tratamiento de aguas residuales solo cubría el 60 % en los países con datos disponibles, y el estrés hídrico afectaba especialmente a regiones como Asia Central y África del Norte. Esta situación, se empeora por el cambio climático y la creciente demanda industrial, que podría derivar en un déficit del 40 % de agua para el año 2030. Ante este panorama, la regeneración de aguas residuales se ha convertido en una línea prioritaria de investigación, con el objetivo de recuperar agua para consumo humano, reducir la contaminación de cuerpos hídricos y reutilizar el agua en actividades humanas, todo ello bajo el marco del ODS 6 de la ONU (Astrid C & Machuca-Martínez, 2022)(Rigg, 2024).

Dentro de esta línea de acción, el tratamiento de aguas contaminadas con metales pesados, provenientes de efluentes industriales o escorrentías urbanas, se vuelve especialmente relevante. Estos metales representan un grave riesgo para la salud y el medio ambiente, y su eliminación convencional implica un alto consumo energético. No obstante, se han desarrollado estrategias innovadoras que permiten no solo remover estos metales, sino transformarlos en catalizadores útiles para procesos de química verde. Esta conversión se logra mediante estructuras porosas tridimensionales con superficies funcionales que actúan como adsorbentes selectivos, capaces de captar metales específicos y formar partículas catalíticas a escala nanométrica. Como podemos ver en los siguientes ejemplos, las aguas residuales dejan de ser un pasivo ambiental para convertirse en una fuente valiosa de recursos funcionales y sostenibles (Wink & Hartmann, 2024).

1. En un estudio sobre la reducción de CO₂, Zhu y asociados presentaron un nuevo material llamado Metal–Organic Framework (MOF) para la adsorción selectiva de AuCl₄⁻ desde solución y su posterior transformación en un catalizador (Zhu et al., 2022). La síntesis del MOF se realizó mediante síntesis solvotérmica, utilizando como precursores ZrCl₄, Ni(NO₃)₂ e ácido isonicotínico en DMF. El MOF mostró una alta área superficial de 1570 m²/g y una elevada capacidad de adsorción de Au(III) de 415 mg/g. La inmersión del MOF en una solución artificial de e-waste que contenía AuCl₄⁻, seguida de una calcinación a 200 °C bajo atmósfera de H₂/Ar, dio como resultado nanopartículas de Au distribuidas uniformemente dentro de la red del MOF, con tamaños ajustables entre 2.4 y 4.4 nm, dependiendo de la concentración inicial de AuCl₄⁻. La selectividad para la adsorción de Au(III) fue notablemente robusta. A pesar de la presencia de iones metálicos competidores como Fe, Ni, Cu, Co, Zn y Mn en concentraciones diez veces mayores que AuCl₄⁻, la interferencia en la adsorción fue mínima. El sistema Au/MOF

demostró ser altamente eficiente para la reducción electroquímica de CO₂ a CO, alcanzando una eficiencia faradaica del 95 %, y mantuvo su rendimiento durante 15 horas, con solo una ligera disminución de la actividad (-13 %) y de la eficiencia (-7 %).

Este avance destaca el enorme potencial multifuncional de los MOF, capaces de obtener catalizadores de Au de bajo costo, alto rendimiento y tamaño ajustable a partir de aguas residuales (Wink & Hartmann, 2024).

2. El estudio “Turning precious metal loaded e-waste to useful catalysts: Investigation into supercilious recovery and catalyst viability for peroxyomonosulfate activation” propone que los residuos electrónicos (e-waste) líquidos que son ricos en metales preciosos como Au y Pd en transformar en catalizador es activos para la descontaminación ambiental. Se utilizó una espuma de grafeno funcionalizada con un MOF de cobre (Cu-pPDT) para capturar selectivamente Pd(II) y Au(III) desde soluciones ácidas de e-waste, con eficiencias de adsorción superiores al 96 %. Tras la captura, el material fue calcinado a 800 °C bajo N₂/H₂, formando catalizadores de nanopartículas metálicas de CuPd/C y CuAu/C. Estos se evaluaron en la activación de peroxyomonosulfato (PMS) para la degradación del contaminante 4-nitrofenol, logrando hasta un 92 % de eliminación en 15 minutos, con buena estabilidad y baja lixiviación. El trabajo demuestra una vía eficaz de convertir desechos electrónicos en catalizadores verdes reutilizables para el tratamiento de aguas contaminadas (S. Li et al., 2023).
3. Un grupo de investigadores, liderado por Song, creó un nuevo material poroso llamado CITCF, que funciona como una especie de esponja sólida con muchísimos huecos microscópicos. Este material está diseñado para atrapar paladio (Pd), un metal muy valioso que se encuentra en aguas residuales industriales. Lo especial de la estructura de CITCF es que tiene átomos de azufre, lo que permite capturar muy rápida y eficaz al

paladio, incluso cuando hay otros metales alrededor. Después de atrapar el Pd, lo reducen químicamente para convertirlo en pequeñas partículas metálicas dentro del mismo material. Así, el paladio atrapado se transforma en un catalizador. Lo probaron en una reacción llamada Suzuki–Miyaura, que sirve para unir moléculas orgánicas. Este es muy usado para fabricar medicinas y plásticos. Descubrieron que el catalizador reciclado funcionó igual o mejor que otros catalizadores comerciales, obteniendo altos rendimientos de 81.6% al 99 % y se pudo reutilizar al menos 5 veces sin perder efectividad. Es decir que el catalizador se convierte en una opción eficiente, reutilizable y ecológica para recuperar y reutilizar metales valiosos que normalmente se desechan (Song et al., 2022).

4. Oladeji e investigadores presentaron, un método innovador para revalorizar un metal noble, usando electroquímica de impacto para la recuperación de paladio (Pd) desde solución y después como uso de catalizador. Los autores emplearon la técnica de nanoimpacto para generar catalizadores de Pd soportados en carbono, a partir de aguas residuales artificiales con bajas concentraciones de PdCl_2 . La síntesis consistió en provocar la colisión de nanopartículas de negro de carbono (CB NPs) con un electrodo sumergido en la solución, lo que causó la reducción y deposición irregular del Pd sobre la superficie de las nanopartículas. En ausencia de estas nanopartículas, la tasa de recuperación de Pd(II) fue de aproximadamente 65 %, pero al agregarlas, dicha tasa aumentó hasta 85 %. Es importante destacar que la presencia de CB NPs durante los experimentos de chronoamperometría redujo notablemente la deposición de Pd sobre el electrodo, evitando interferencias. Para demostrar las propiedades catalíticas del material obtenido, se llevaron a cabo dos pruebas: una reacción de acoplamiento Suzuki–Miyaura entre ácido fenilborónico e iodobenceno, y una reacción de generación

electrocatalítica de hidrógeno. Aunque no se presentaron detalles sobre la selectividad del método para el Pd, este trabajo demuestra el potencial de las técnicas electroquímicas para la extracción de metales y la producción directa de catalizadores a partir de aguas residuales (Oladeji et al., 2022).

5. Otra estrategia prometedora para recuperar Pd desde aguas residuales fue demostrada por Smith y asociados (Albino et al., 2023; Piras et al., 2020; Slavik & Smith, 2020). El concepto clave se basa en el uso de un material gelatinoso para capturar selectivamente Pd desde soluciones acuosas y aprovechar luego ese Pd como catalizador. Los hidrogeles híbridos desarrollados poseen una gran afinidad y especificidad por los iones Pd(II), y pueden reducir a Pd(0). Este enfoque es especialmente relevante cuando se considera el reciclaje de aguas residuales ricas en Pd. El material catalíticamente activo se preparó mediante la encapsulación de nanopartículas de Pd, lograda a través de una reducción *in situ* de Pd(II) dentro de un hidrogel híbrido fabricado a partir de un gelador de bajo peso molecular funcionalizado con acilhidrazida (1,3:2,4-dibenzilidenesorbitol, DBS-CONHNH₂), combinado con un gelador polimérico como alginato. La solución de Pd(II) utilizada era una solución ácida de PdCl₂ que imitaba aguas residuales. El material catalítico podía prepararse tanto en forma de bloque de gel catalítico (Slavik & Smith, 2020) como en forma de esferas o filamentos de gel catalítico (Piras et al., 2020). En particular, las esferas catalíticas elaboradas con agarosa como gelador polimérico resultaron ser mecánicamente más estables, más fáciles de reutilizar y menos propensas a la lixiviación de Pd en comparación con los bloques de gel o las esferas/filamentos de gel preparados con alginato (Albino et al., 2023). Las esferas también demostraron estabilidad térmica hasta 99 °C y pudieron reutilizarse hasta tres veces tras filtrado y lavado. Estos materiales que contienen Pd se probaron extensamente como

catalizadores eficaces en reacciones de acoplamiento cruzado, incluidas las reacciones de Sonogashira y Heck (Piras et al., 2020; Slavik & Smith, 2020), y Suzuki–Miyaura (Albino et al., 2023), bajo condiciones suaves y respetuosas con el medio ambiente, logrando altos rendimientos (Wink & Hartmann, 2024).

6. Yao y asociados, desarrollaron un método novedoso para fabricar catalizadores basados en rutenio (Ru) utilizando residuos ricos en Ru procedentes de procesos industriales donde se descompone el lignito (Yao et al., 2022). El catalizador reciclado mostró eficiencias comparables a las de los catalizadores comerciales de Ru en la hidrogenación de etil levulinato a γ -valerolactona, manteniendo su actividad a lo largo de varios ciclos. La síntesis del catalizador se llevó a cabo mediante un método de impregnación, en el cual un soporte de niobio-carbono (Nb–carbon) se mezcló con aguas residuales que contenían Ru, se agitó durante 2 horas y posteriormente se redujo directamente con una solución de NaBH₄ en un baño de hielo durante 2 horas. El propio soporte Nb–carbon se sintetizó mezclando oxalato de Nb con carbón activado, seguido de secado, molienda y calcinación en atmósfera inerte. El catalizador se aplicó a una amplia gama de sustratos y demostró ser eficaz en la reducción de aldehídos y cetonas saturados a sus correspondientes alcoholes. Sin embargo, presentó limitaciones en la hidrogenación de compuestos aromáticos, en particular benzaldehído y acetofenona, donde los rendimientos se redujeron significativamente debido a la hidrogenación completa del anillo o a reacciones secundarias de desoxigenación (Wink & Hartmann, 2024).

Tabla 3. Resumen de catalizadores heterogéneos realizado de aguas residuales

Catalizadores heterogéneos realizados de Aguas Residuales			
Catalizador reciclado	Método de reciclaje	Reacción catalítica aplicada	Referencia
Au	Adsorción selectiva por MOF y calcinación/reducción con H ₂	Reducción electroquímica del CO ₂	(Zhu et al., 2022)
Au, Pd	Adsorción selectiva mediante absorbente híbrido y calcinación/reducción con H ₂	Oxidación del 4-nitrofenol	(S. Li et al., 2023)
Pd	Extracción selectiva de Pd(II) mediante polímero poroso y NaBH ₄ reducción	Acoplamiento cruzado	(Song et al., 2022)
Pd	Reducción electroquímica de Pd(II) sobre carbono partículas negras	Acoplamiento cruzado y generación electrocatalítica de H ₂	(Oladeji et al., 2022)
Pd	Extracción y reducción in situ de Pd(II) por un hidrogel híbrido	Acoplamiento cruzado	(Albino et al., 2023); (Piras et al., 2020); (Slavik & Smith, 2020)
Ru en el soporte de carbono Nb	Método de impregnación seguido de reducción NaBH ₄	Hidrogenación de furfurales	(Yao et al., 2022)

2.1.4. Diversos residuos.

El reciclaje y la química verde se destacan en estos estudios por su enfoque en la economía circular, reutilizando desechos de cobre provenientes tanto de laboratorios como de residuos metalúrgicos para generar catalizadores altamente eficientes. Por un lado, el óxido cuproso recuperado de residuos de laboratorio se aplicó exitosamente como catalizador en síntesis orgánica, manteniendo su actividad catalítica, reduciendo costos y promoviendo una formación académica orientada hacia la sostenibilidad. Por otro lado, el uso de residuos metalúrgicos como soporte para catalizadores de cobre en la reacción RWGS no solo permitió

valorizar un desecho minero sin valor comercial, sino que también alcanzó elevadas conversiones de CO₂ con una selectividad superior al 99% hacia CO, demostrando así su potencial industrial y su contribución a la mitigación del cambio climático. En ambos casos que se detalla a continuación, se evidencia que recuperar cobre de diversas fuentes de residuos y reutilizarlo en el mayor número de ciclos posible no solo es clave para controlar la contaminación y satisfacer la demanda del mercado, sino que también cumple con los principios fundamentales de la química verde, abriendo el camino hacia procesos más limpios, sostenibles, económicos y responsables con el medio ambiente.

1. Randhir Rai, presenta un proceso innovador y sostenible donde se recupera óxido de cobre (Cu₂O) generado como residuo en prácticas de laboratorio, específicamente en la reacción del reactivo de Fehling al detectar azúcares. En lugar de desechar este residuo, fue filtrado, lavado y secado, luego caracterizado para confirmar su pureza, y reutilizado como catalizador heterogéneo. Se utilizó para sintetizar β-keto-1,2,3-triazoles en un medio acuoso, ya que este compuesto es útil en aplicaciones farmacéuticas y otras ciencias. Se comparó la actividad catalítica del Cu₂O reciclado con Cu₂O comercial, demostrando que tiene rendimientos similares. Además se observó que el catalizador de Cu₂O reciclado se puede utilizar varias veces sin perder demasiada eficiencia (Rai, 2025).
2. En este estudio, Vu y otros investigadores desarrollaron un catalizador eficiente a base de cobre utilizando como soporte de un residuo metalúrgico como el UGSO, que es una escoria rica en óxidos metálicos. Mediante un proceso de precipitación por deposición, donde el cobre se deposita sobre el UGSO y luego se calcina a alta temperatura. Se obtienen catalizadores Cu/UGSO con distintas concentraciones de cobre (5–20%). El catalizador resultante fue caracterizado por diversas técnicas y probado en la reacción

inversa de gas de agua (RWGS), que convierte dióxido de carbono (CO_2) en monóxido de carbono (CO) usando hidrógeno. El mejor desempeño se logró con un 15% de cobre, alcanzando una conversión de CO_2 del 36.1% y una selectividad hacia CO del 99.3% a 400 °C. Este trabajo demuestra que es posible reutilizar residuos industriales para fabricar catalizadores estables y efectivos, promoviendo la economía circular y el aprovechamiento del CO_2 en procesos sostenibles (Vu et al., 2022).

Tabla 4. Resumen de catalizadores heterogéneos realizado de diferentes residuos

Catalizadores heterogéneos realizados de diferentes residuos				
Fuente	Catalizador reciclado	Método de reciclaje	Reacción catalítica aplicada	Referencia
Residuo de laboratorio	Óxido de cobre (Cu_2O)	Filtrado, lavado con agua, secado al aire; caracterización fisicoquímica	Síntesis de β -keto-1,2,3-triazoles en reacción multicomponente tipo "click"	(Rai, 2025)
Residuo metalúrgico	Catalizador Cu/UGSO (cobre soportado en UGSO(óxidos de escoria de titanio))	Deposición por precipitación y calcinación a 600 °C	Reacción inversa de gas de agua (RWGS): $\text{CO}_2 + \text{H}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$	(Vu et al., 2022)

3. El futuro de la aplicación de los catalizadores

Los catalizadores derivados de residuos metálicos representan una alternativa prometedora en la química verde, pues permiten transformar desechos peligrosos en materiales funcionales de alto valor. Estos catalizadores verdes están diseñados para ser sostenibles y respetuosos con el medio ambiente, ya que pueden fabricarse a partir de biomasa, residuos o minerales naturales, evitando el uso de metales pesados o solventes tóxicos. Sus principales ventajas incluyen facilitar procesos más limpios y eficientes, con menor consumo energético, menos pasos y menos residuos, contribuyendo así a la economía circular mediante la valorización de residuos en productos útiles y de alto valor agregado (Khalaf et al., 2025).

Sin embargo, persisten diversos desafíos que limitan su adopción generalizada. La variabilidad en la composición de los residuos metálicos dificulta su estandarización, mientras que los métodos actuales de recuperación suelen requerir altas temperaturas o el uso de sustancias químicas, con el riesgo asociado de contaminación secundaria. Además, la escalabilidad es un problema importante, ya que los procesos desarrollados en laboratorio aún no son rentables ni suficientemente eficientes para implementarse a nivel industrial. Por ello, es crucial avanzar en la química verde mediante la optimización de procesos y el uso de tecnologías innovadoras, como la automatización y la clasificación impulsada por inteligencia artificial, que permitan mejorar la eficiencia en la recuperación de materiales y reducir los costos operativos (Paone & Mauriello, 2024).

La colaboración entre responsables de políticas, industrias e investigadores es fundamental para desarrollar tecnologías escalables y garantizar un suministro constante y seguro de materias primas derivadas de residuos. Al abordar estos retos, la visión de transformar los residuos metálicos en un pilar de la innovación industrial ecológica que puede realizar una realidad en un futuro. Este enfoque no solo disminuye los riesgos ambientales y de salud pública, sino que también posiciona a los residuos como recursos clave para el avance de la química sostenible y las prácticas de economía circular. Así, se allana el camino hacia un futuro más limpio, seguro y eficiente, donde los catalizadores verdes desempeñen un papel central en la construcción de una industria química responsable con el medio ambiente y la sociedad (Khalaf et al., 2025) (Paone & Mauriello, 2024) (Mishra et al., 2023) (Sai Bharadwaj et al., 2025).

CONCLUSIONES

Basados en esta revisión se destacan los catalizadores como herramientas esenciales en diversos procesos químicos, ya que facilitan las reacciones y permite obtener productos de manera eficiente y rentable. Estudios previos han impulsado el desarrollo y las aplicaciones de catalizadores en diversos campos, como la industria farmacéutica, la remediación ambiental y el control de la contaminación. Con el paso de los años, la catálisis se ha consolidado como una disciplina transversal, que actualmente resulta imprescindible en la producción de combustibles, sustancias químicas de alto valor y en tecnologías energéticas avanzadas.

Los estudios analizados muestran que es beneficioso reciclar metales de residuos de placas de circuitos, baterías desechadas, desecho de laboratorio y aguas residuales industriales, para transformarlos en catalizadores tanto heterogéneos como homogéneos. Estos catalizadores reciclados han demostrado gran eficacia en múltiples aplicaciones, como reacciones de oxidación y reducción, procesos de acoplamiento cruzado en síntesis orgánica, y en catálisis ambiental para degradación de contaminantes. Los materiales obtenidos presentan alta actividad, selectividad y estabilidad, con rendimientos que en muchos casos superan el 80-90 % y una buena capacidad de reutilización, validando el concepto de economía circular al convertir residuos peligrosos en productos de alto valor añadido.

Sin embargo, estos procesos aún enfrentan desafíos significativos. Muchos requieren calcinaciones a altas temperaturas, agentes reductores o condiciones especiales como atmósferas reductoras de hidrógeno, lo que aumenta los costos energéticos y limita la sostenibilidad completa. Además, varios métodos están todavía en etapa de laboratorio, sin haberse escalado a nivel industrial, lo que implica retos técnicos y económicos para su adopción masiva. Aun así, los avances reflejados en los trabajos revisados apuntan a un futuro prometedor, donde reciclar residuos metálicos no solo resolverá problemas ambientales, sino

que se convertirá en una vía clave para producir catalizadores verdes y tecnologías energéticas sostenibles.

En un futuro cercano, estos catalizadores reciclados podrán apoyar la sostenibilidad en sectores como la agricultura, la preservación forestal, la conversión de hidrocarburos y el tratamiento de agua. Para maximizar sus beneficios será imprescindible diseñar materiales aún más eficientes, evaluar rigurosamente su desempeño y comparar su impacto frente a alternativas convencionales. Así, la química verde seguirá avanzando hacia procesos más limpios, económicos y energéticamente responsables, integrando completamente la valorización de residuos como motor de innovación y sostenibilidad.

REFERENCIAS

- Albino, M., Burden, T. J., Piras, C. C., Whitwood, A. C., Fairlamb, I. J. S., & Smith, D. K. (2023). Mechanically Robust Hybrid Gel Beads Loaded with “Naked” Palladium Nanoparticles as Efficient, Reusable, and Sustainable Catalysts for the Suzuki–Miyaura Reaction. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 11(5), 1678–1689. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c05484>
- Amarasekara, A. S., Herath, H. N. K., Grady, T. L., & Gutierrez Reyes, C. D. (2022). Oxidation of glucose to glycolic acid using oxygen and pyrolyzed spent Li-ion battery electrode material as catalyst. *Applied Catalysis A: General*, 648(June), 118920. <https://doi.org/10.1016/j.apcata.2022.118920>
- Amarasekara, A. S., Pinzon, S. K., Rockward, T., & Herath, H. N. K. (2022). Spent Li-Ion Battery Electrode Material with Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide as a Reusable Catalyst for Oxidation of Biofurans. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 10(38), 12642–12650. https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.2C03346/SUPPL_FILE/SC2C03346_SI_001.PDF
- Amarasekara, A. S., & Wang, D. (2023). Decarboxylative - Dimerization of levulinic acid using spent Li-ion battery electrode material with lithium nickel cobalt manganese oxide as a catalyst. *Fuel Processing Technology*, 250(June), 107913. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2023.107913>
- Astrid C, A.-O., & Machuca-Martínez, F. (2022). *Ozonización catalítica en el tratamiento de aguas residuales : Un análisis bibliométrico.* 24(1), 27. <https://doi.org/10.25100/iyc.24i1.11603>
- Chicaiza Ortiz, C. D., Salazar García, K. V., Diéguez Santana, K., Chicaiza Ortiz, Á. F., Navarrete Villa, V. P., & Zhang, J. (2021). Aplicaciones de los catalizadores y su evaluación a través de análisis de ciclo de vida. *CIENCIA UNEMI*, 14(37), 60–72. <https://doi.org/10.29076/issn.2528-7737vol14iss37.2021pp60-72p>
- Davis, B. H. (2008). Development of the Science of Catalysis. In *Handbook of Heterogeneous Catalysis* (pp. 16–37). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527610044.hetcat0002>
- Deng, B., Li, Y., Tan, W., Wang, Z., Yu, Z., Xing, S., Lin, H., & Zhang, H. (2018). Degradation of bisphenol A by electro-enhanced heterogeneous activation of peroxydisulfate using Mn-Zn ferrite from spent alkaline Zn-Mn batteries. *Chemosphere*, 204, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.03.194>
- Fechete, I., Wang, Y., & Védrine, J. C. (2012). The past, present and future of heterogeneous catalysis. *Catalysis Today*, 189(1), 2–27. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2012.04.003>
- Gallegos, M. V., Falco, L. R., Peluso, M. A., Sambeth, J. E., & Thomas, H. J. (2013). Recovery of manganese oxides from spent alkaline and zinc–carbon batteries. An application as catalysts for VOCs elimination. *Waste Management*, 33(6), 1483–1490.

<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.03.006>

Gallegos, M. V., Peluso, M. A., Finocchio, E., Thomas, H. J., Busca, G., & Sambeth, J. E. (2017). Removal of VOCs by catalytic process. A study of MnZnO composites synthesized from waste alkaline and Zn/C batteries. *Chemical Engineering Journal*, 313, 1099–1111. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.11.001>

García Aguilar, J. (2017). Procesos más eficientes en catálisis mediante la síntesis de nuevos recubrimientos y rellenos. *Tesis*, 379. https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/71581/1/tesis_jaime_garcia_aguilar.pdf

Gonçalves, M. C. A., Garcia, E. M., Taroco, H. A., Gorgulho, H. F., Melo, J. O. F., Silva, R. R. A., & Souza, A. G. (2015). Chemical recycling of cell phone Li-ion batteries: Application in environmental remediation. *Waste Management (New York, N.Y.)*, 40, 144–150. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.02.014>

Isahak, W. N. R. W., & Al-Amiry, A. (2024). Catalysts driving efficiency and innovation in thermal reactions: A comprehensive review. *Green Technologies and Sustainability*, 2(2), 100078. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2024.100078>

Khalaf, H. A., Shehata, N., & Abdelbaqi, R. F. (2025). Green Catalyst: Definitions, Recent Development, Applications, and Circular Economy. In *Comprehensive Green Materials* (Vol. 2, pp. 180–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-443-15738-7.00013-1>

Lacanau, V., Bonneté, F., Wagner, P., Schmitt, M., Meyer, D., Bihel, F., Contino-Pépin, C., & Bourgeois, D. (2020). From Electronic Waste to Suzuki–Miyaura Cross-Coupling Reaction in Water: Direct Valuation of Recycled Palladium in Catalysis. *ChemSusChem*, 13(19), 5224–5230. <https://doi.org/10.1002/cssc.202001155>

Li, H., Pan, Y., Wu, F., Zhou, Y., & Pan, J. (2022). Turning waste into wealth: efficient and rapid capture of gold from electronic waste with a thiourea functionalised magnetic core stirring rod adsorbent and its application for heterogeneous catalysis. *Green Chemistry*, 24(19), 7592–7601. <https://doi.org/10.1039/D2GC02622H>

Li, N., Lu, X., & Zhang, S. (2014). A novel reuse method for waste printed circuit boards as catalyst for wastewater bearing pyridine degradation. *Chemical Engineering Journal*, 257, 253–261. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2014.07.043>

Li, Q., Wang, X., Tan, D. Q., Su, S., Duan, L., & Wang, J. (2025). Efficient and green recycling of waste $\text{LiNi}_{1-x-y}\text{Co}_x\text{Mn}_y\text{O}_2$ cathodes to NiCo_2O_4 catalysts for lithium-oxygen batteries. *Sustainable Materials and Technologies*, 45(March), e01479. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2025.e01479>

Li, S., Ali, S., Zuhra, Z., Abbas, Y., Xie, G., Wang, X., & Ding, S. (2023). Turning precious metal-loaded e-waste to useful catalysts: Investigation into supercilious recovery and catalyst viability for peroxyomonosulfate activation. *Chemosphere*, 336(June), 139170. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139170>

Lin, H., Li, S., Deng, B., Tan, W., Li, R., Xu, Y., & Zhang, H. (2019). Degradation of bisphenol

- A by activating peroxyomonosulfate with Mn_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄ fabricated from spent Zn-Mn alkaline batteries. *Chemical Engineering Journal*, 364(September 2018), 541–551. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.01.189>
- Lindström, B., & Pettersson, L. J. (2003). A brief history of catalysis. *CatTech*, 7, 130–138. [https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1025001809516](https://doi.org/10.1023/A:1025001809516)
- López, V., Hilbert, I., Gascón, L., Manhart, A., García, D., Nkongdem, B., Dumitrescu, R., Sucre, C. G., & Ferreira Herrera, C. (2024). *Revisión analítica de prácticas globales y regionales*. <http://www.iadb.org>
- Martín Sánchez, M., & Martín Sánchez, M. T. (2009). Estudio histórico-experimental de la catálisis en enseñanzas no universitarias. *Aula y Laboratorio de Química*, 105(2), 120–125. <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1625/2194>
- Martins, T. A. G., Falconi, I. B. A., Pavoski, G., de Moraes, V. T., Galluzzi Baltazar, M. dos P., & Espinosa, D. C. R. (2021). Green synthesis, characterization, and application of copper nanoparticles obtained from printed circuit boards to degrade mining surfactant by Fenton process. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(6), 106576. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106576>
- McCarthy, S., Desaunay, O., Jie, A. L. W., Hassatzky, M., White, A. J. P., Deplano, P., Braddock, D. C., Serpe, A., & Wilton-Ely, J. D. E. T. (2022). Homogeneous Gold Catalysis Using Complexes Recovered from Waste Electronic Equipment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 10(48), 15726–15734. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.2c04092>
- Mishra, K., Siwal, S. S., Nayaka, S. C., Guan, Z., & Thakur, V. K. (2023). Waste-to-chemicals: Green solutions for bioeconomy markets. *Science of the Total Environment*, 887(April), 164006. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164006>
- Moulijn, J. A., & van Santen, R. A. (2017). History of Catalysis. In *Contemporary Catalysis: Science, Technology, and Applications* (Vol. 123, pp. 1–28). The Royal Society of Chemistry. <https://doi.org/10.1039/9781849739900-00001>
- Oladeji, A. V., Courtney, J. M., Fernandez-Villamarin, M., & Rees, N. V. (2022). Electrochemical Metal Recycling: Recovery of Palladium from Solution and In Situ Fabrication of Palladium-Carbon Catalysts via Impact Electrochemistry. *Journal of the American Chemical Society*, 144(40), 18562–18574. <https://doi.org/10.1021/jacs.2c08239>
- Paone, E., & Mauriello, F. (2024). E-Waste Wars: The Catalyst Awakens. *Sustainable Chemistry*, 5(4), 324–326. <https://doi.org/10.3390/suschem5040022>
- Paone, E., Miceli, M., Malara, A., Ye, G., Mousa, E., Bontempi, E., Frontera, P., & Mauriello, F. (2022). Direct Reuse of Spent Lithium-Ion Batteries as an Efficient Heterogeneous Catalyst for the Reductive Upgrading of Biomass-Derived Furfural. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 10(7), 2275–2281. https://doi.org/10.1021/ACSSUSCHEMENG.1C08008/SUPPL_FILE/SC1C08008_SI_01.PDF

- Piras, C. C., Slavik, P., & Smith, D. K. (2020). Self-Assembling Supramolecular Hybrid Hydrogel Beads. *Angewandte Chemie (International Ed. in English)*, 59(2), 853–859. <https://doi.org/10.1002/anie.201911404>
- Piumetti, M. (2014). A brief history of the science of catalysis – I: from the early concepts to single-site heterogeneous catalysts. *Chimica Oggi*, 32, 22–27. https://www.researchgate.net/publication/279317175_A_brief_history_of_the_science_of_catalysis_-_I_From_the_early_concepts_to_single-site_heterogeneous_catalysts/citations
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) y la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). (2024). *The global E-waste Monitor 2024 – Electronic Waste Rising Five Times Faster than Documented E-waste Recycling: UN*. https://ewastemonitor.info/wp-content/uploads/2024/12/GEM_2024_ES_11_NOV-web.pdf
- Rai, R. (2023). Copper-based laboratory waste: Its application as a catalyst and recovery. *Journal of Cleaner Production*, 432(November), 139775. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139775>
- Rai, R. (2025). Catalytic application of second cycle copper-based laboratory waste for synthesis of beta-keto-1,2,3-triazole: A micro circular economy approach. *Sustainable Chemistry for the Environment*, 9(October 2024), 100205. <https://doi.org/10.1016/j.scenv.2024.100205>
- Rautela, R., Sharma, A., Ranjan, V. P., Rathika, K., Pratap, V., Yadav, B. R., & Kumar, S. (2024). Turning Solid Waste into Catalysts: A Path for Environmental Solutions. *ChemPlusChem*, 202400246. <https://doi.org/10.1002/cplu.202400246>
- Rigg, J. (2024). The Sustainable Development Goals (SDGS). In *The Companion to Development Studies* (pp. 253–257). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429282348-52>
- Ryabchuk, P., Anwar, M., Dastgir, S., Junge, K., & Beller, M. (2021). From Mobile Phones to Catalysts: E-Waste-Derived Heterogeneous Copper Catalysts for Hydrogenation Reactions. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(30), 10062–10072. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c01772>
- Sai Bharadwaj, A. V. S. L., Nayak, R. R., Koteswararao, J., Sampath, C., Gaddala, B., Pawar, B. G., & Gupta, N. K. (2025). Environmental life-cycle assessment and green principles in process intensification: A review of novel catalysts from solid waste. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 211(October 2024), 110208. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2025.110208>
- Shivamurthy, B. P., Kirdant, S. P., Katajam, S., Rawat, P., Jadhav, V. H., & Nayaka, G. P. (2024). Performance scrutiny of spent lithium-ion batteries cathode material as a catalyst for oxidation of benzyl alcohol. *Next Sustainability*, 3(December 2023), 100017. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2023.100017>

- Slavik, P., & Smith, D. K. (2020). Hybrid hydrogels loaded with palladium nanoparticles – Catalysts for environmentally-friendly Sonogashira and Heck cross-coupling reactions. *Tetrahedron*, 76(31–32), 131344. <https://doi.org/10.1016/j.tet.2020.131344>
- Song, K. S., Ashirov, T., Talapaneni, S. N., Clark, A. H., Yakimov, A. V., Nachtegaal, M., Copéret, C., & Coskun, A. (2022). Porous polyisothiocyanurates for selective palladium recovery and heterogeneous catalysis. *Chem*, 8(7), 2043–2059. <https://doi.org/10.1016/j.chempr.2022.05.009>
- Vu, T. T. N., Desgagnés, A., Fongarland, P., & Iliuta, M. C. (2022). Development of highly efficient Cu-based catalyst derived from a metallurgical waste for the reverse water-gas shift reaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(90), 38170–38184. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.001>
- Wang, C., Cao, Y., & Wang, H. (2019). Copper-based catalyst from waste printed circuit boards for effective Fenton-like discoloration of Rhodamine B at neutral pH. *Chemosphere*, 230, 278–285. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.068>
- Wang, C., Jiang, X., Huang, R., Cao, Y., Xu, J., & Han, Y. (2019). Copper/carbon composites from waste printed circuit boards as catalysts for Fenton-like degradation of Acid Orange 7 enhanced by ultrasound. *AIChE Journal*, 65(4), 1234–1244. <https://doi.org/10.1002/aic.16519>
- Wang, C., Wang, H., & Cao, Y. (2019). Waste printed circuit boards as novel potential engineered catalyst for catalytic degradation of orange II. *Journal of Cleaner Production*, 221, 234–241. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.240>
- Wang, S., Yan, W., & Zhao, F. (2020). Recovery of solid waste as functional heterogeneous catalysts for organic pollutant removal and biodiesel production. *Chemical Engineering Journal*, 401(June 2020), 126104. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126104>
- Wink, K., & Hartmann, I. (2024). Recent Progress in Turning Waste into Catalysts for Green Syntheses. *Sustainable Chemistry*, 5(1), 27–39. <https://doi.org/10.3390/suschem5010003>
- Wisniak, J. (2010). The History of Catalysis. From the Beginning to Nobel Prizes. *Educacion Quimica*, 21(1), 60–69. [https://doi.org/10.1016/S0187-893X\(18\)30074-0](https://doi.org/10.1016/S0187-893X(18)30074-0)
- Yao, X., Teng, Y., Chen, Y., Ding, Z., Liu, Q., Wang, M., Li, N., Zhou, H., & Liu, Q. (2022). Novel Approach of Reusing the Precious Ru in the Wastewater Derived from the Depolymerization of Lignite to Prepare Ru-AC Catalysts Doped with Nb₂O₅. *Energy and Fuels*, 36(12), 6305–6316. https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.1C04172/SUPPL_FILE/EF1C04172_SI_001.PDF
- Zhu, Z. H., Liang, Z. L., Jiao, Z. H., Jiang, X. L., Xie, Y., Xu, H., & Zhao, B. (2022). A Facile Strategy to Obtain Low-Cost and High-Performance Gold-Based Catalysts from Artificial Electronic Waste by [Zr48Ni6] Nano-Cages in MOFs for CO₂ Electroreduction to CO. *Angewandte Chemie - International Edition*, 61(49), e202214243. <https://doi.org/10.1002/ANIE.202214243;SUBPAGE:STRING:ACCESS>

