

RECUPERACIÓN DE METALES A PARTIR DE RESIDUOS INDUSTRIALES: ESTADO
DEL ARTE Y PROSPECTIVAS DE IMPLEMENTACIÓN

Keyla Yurley Barbosa Quiñonez

Libro de monografía presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Metalúrgico

Director de Proyecto

Isaías Andrés Rentería Rincón

Magister en Ingeniería de Materiales

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicoquímicas

Escuela de Ingeniería Metalúrgica y Ciencia de los Materiales

Ingeniería Metalúrgica

Bucaramanga

2026

Dedicatoria

Quiero dedicar este título a mis padres, Niquelina Quiñonez y Elio Barbosa, por darme su apoyo, por guiarme en el camino, por brindarme su amor incondicional, por estar siempre presentes cuando los necesitaba y por todo el esfuerzo que hicieron para que yo pudiera salir adelante, pues sin su amor y sacrificio este logro no habría sido posible.

A mis hermanos, Elkin, Fabián y Deybi, por ser los mejores hermanos mayores, por estar ahí para guiarme, enseñarme y brindarme su cariño incondicional.

A mi cuñada, Jenny Rodríguez, por ser tan especial conmigo, escucharme cuando lo necesitaba y por darme a mis Y4 (Yarith, Yisell, Yurley y Yostin), mis sobrinos, que son mi motor, mi alegría y mis ganas de querer ser cada día mejor.

A mi pareja, Andrés Quintero, por ser mi primer amor y compañero de vida; por brindarme su amor, por animarme cada vez que lo necesitaba, por escucharme, apoyarme y por ser esa luz que ilumina mis días grises.

A mis mejores amigas, Mayerli Bernal y Hasly Acevedo, con quienes por más de 15 años he compartido hermosos momentos, quienes han estado para escucharme y siempre me han motivado cada vez que fue necesario.

A mis amigos universitarios, Juanpa Marín, Elkin Torrez y Brayan Molano, porque con ellos compartí varios momentos de estudio y aprendizaje, de los cuales nació una buena amistad; en especial a Juanpa, que se convirtió en un gran amigo, brindándome su apoyo en varios momentos.

A mi gran familia, por animarme, por siempre ser especiales conmigo, por estar siempre pendientes de mis logros y sentirse orgullosos de ellos.

Y a mi director de tesis, Isaías Rentería, por darme la oportunidad de aprender de él y por tener la paciencia de explicarme cada cosa que necesité, ya que sin su apoyo este proyecto no habría sido posible.

Keyla Yurley Barbosa Quiñonez

Agradecimientos

Primero que todo, quiero darle las gracias a Dios por escuchar mis oraciones, por abrirme las puertas para poder salir adelante, por las bendiciones que me ha dado y por ser el forjador de mi camino.

Quiero expresar mi agradecimiento a la Universidad Industrial de Santander por brindarnos la oportunidad de formar parte de su comunidad académica y por ofrecer los recursos y el apoyo necesarios para llevar a cabo este proyecto de grado.

Mi más sincero agradecimiento al profesor Isaías Andrés Rentería Rincón por darme la oportunidad de trabajar con él en este proyecto, por el tiempo brindado, por los conocimientos compartidos, por su orientación, por la paciencia con cada una de mis preguntas y por ayudarme a sacar este proyecto adelante. Su disposición fue muy importante para que todo saliera bien.

Agradezco a todos los profesores, quienes fueron muy importantes para mi formación profesional, ya que gracias a ellos pude adquirir valiosos conocimientos.

A la mejor secretaria, la gran Paty, quien es una excelente persona y siempre tuvo una gran sonrisa para recibirme cada vez que la busqué.

Finalmente, expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia. Gracias por siempre brindarme su apoyo, su confianza y por ser una parte fundamental de mi crecimiento como persona. Gracias a todos, porque cada uno aportó algo importante para poder llegar hasta aquí, dándome ánimo y sintiéndose orgullosos de mi crecimiento profesional.

Índice

Tabla de contenido

1.	Planteamiento del problema	8
2.	Objetivos	9
2.1	Objetivo general	9
2.2	Objetivos específicos.....	9
3.	Metodología	10
3.1	Artículos de revisión y definición de palabras clave.....	10
3.2	Estrategia de búsqueda bibliográfica.....	10
3.3	Clasificación temática	10
3.4	Análisis, organización y síntesis de información	11
4.	Revisión Bibliográfica	12
4.1	Residuos Industriales como fuentes secundarias de metales	12
4.1.1.1	Cenizas de procesos de combustión e incineración	12
4.1.1.2	Lodos industriales y de galvanoplastia	14
4.1.1.3	Escama de laminación y escorias metalúrgicas	15
4.1.1.4	Catalizadores gastados de la industria petroquímica	17
4.1.1.5	Otros residuos industriales.....	18
4.1.1.6	Relación entre características del residuo y recuperación de metales	18
5.	Recuperación de metales a partir de residuos industriales.....	20
5.1	Métodos hidrometalúrgicos.....	20
5.1.1.1	Lixiviación ácida.....	20
5.1.1.2	Lixiviación alcalina.....	21
5.1.1.3	Extracción por solventes	22
5.1.1.4	Intercambio iónico	23
5.2	Métodos pirometalúrgicos.....	24
5.2.2.1	Tostación y calcinación.....	24
5.2.2.2	Reducción carbotérmica.....	25
5.2.2.3	Reducción metalotérmica.....	26
5.3	Métodos Biohidrometalúrgicos.....	26

6. Prospectivas para la valorización residuos industriales colombianos.....	29
6.1 Residuos industriales relevantes en el contexto colombiano.....	29
6.2 Aprovechamiento de los residuos industriales	30
6.3 Implementación de metodologías de recuperación	32
Conclusiones.....	34
Referencias bibliográficas.....	35

Resumen

TÍTULO: RECUPERACIÓN DE METALES A PARTIR DE RESIDUOS INDUSTRIALES: ESTADO DEL ARTE Y PROSPECTIVAS DE IMPLEMENTACIÓN¹

AUTORA: Keyla Yurley Barbosa Quiñonez²

PALABRAS CLAVE: Residuos industriales, Recuperación de metales, Catalizadores gastados, Cenizas volantes, Escamas de laminación

DESCRIPCIÓN: La creciente demanda de metales y la disminución progresiva de menas primarias de alta ley han impulsado el interés por los residuos industriales como fuentes secundarias de metales. En esta revisión bibliográfica se analizó el potencial de valorización metalúrgica de distintos residuos industriales, incluyendo cenizas volantes de carbón, cenizas de incineración de residuos sólidos municipales (MSWI), lodos de galvanoplastia, escamas de laminación, escorias metalúrgicas y catalizadores gastados de la industria petroquímica. Se examinaron sus características fisicoquímicas, composición mineralógica y forma de ocurrencia de los residuos, destacando que la viabilidad de recuperación depende del contenido metálico total, de la especiación química y de las fases portadoras. Asimismo, se compararon las principales rutas de recuperación reportadas en la literatura, clasificadas en métodos hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos y biohidrometalúrgicos. Los procesos hidrometalúrgicos, particularmente la lixiviación ácida, mostraron mayor versatilidad frente a residuos complejos, mientras que las rutas pirometalúrgicas presentaron ventajas en residuos ricos en óxidos metálicos, aunque con mayores requerimientos energéticos. Los enfoques biohidrometalúrgicos surgen como alternativas sostenibles, aunque su aplicación industrial continúa limitada por restricciones cinéticas y operativas. Finalmente, se evaluó el contexto colombiano, identificando que residuos como cenizas de carbón, catalizadores gastados y cenizas de incineración presentan potencial para su aprovechamiento metalúrgico. Sin embargo, su valorización ha estado orientada principalmente hacia aplicaciones en materiales de construcción, evidenciando una oportunidad para desarrollar estrategias nacionales enfocadas en recuperación selectiva de metales.

¹ Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Metalúrgica.

² Facultad de fisicoquímicas Escuela de ingeniería metalúrgica y ciencia de los materiales . Director: Isaías Andrés Rentería Rincón. Magister en ingeniería de materiales. Autora: Keyla Yurley Barbosa Quiñonez.

Abstract

TITLE: METAL RECOVERY FROM INDUSTRIAL WASTE: STATE OF THE ART AND IMPLEMENTATION PROSPECTS³

AUTHOR: Keyla Yurley Barbosa Quiñonez⁴

KEYWORDS: industrial waste, metal recovery, spent catalysts, fly ash, mill scale

DESCRIPTION: The growing demand for metals and the progressive depletion of high-grade primary ores have increased interest in industrial waste as secondary metal resources. This bibliographic review analyzes the metallurgical valorization potential of different industrial residues, including coal fly ash, municipal solid waste incineration ash (MSWI), electroplating sludge, mill scale, metallurgical slags, and spent catalysts from the petrochemical industry. Their physicochemical characteristics, mineralogical composition, and occurrence forms were examined, highlighting that recovery feasibility depends on total metal content, chemical speciation, and the nature of the host phases. Likewise, the main recovery routes reported in the literature were compared and classified into hydrometallurgical, pyrometallurgical, and biohydrometallurgical methods. Hydrometallurgical processes, particularly acid leaching, showed greater versatility for complex residues, while pyrometallurgical routes presented advantages for wastes rich in metallic oxides, although with higher energy requirements. Biohydrometallurgical approaches emerge as sustainable alternatives; however, their industrial application remains limited by kinetic and operational constraints. Finally, the Colombian context was evaluated, identifying residues such as coal ash, spent catalysts, and incineration ash as promising resources for metallurgical recovery. Nevertheless, their valorization has been primarily directed toward applications in construction materials, highlighting an opportunity to develop national strategies focused on selective metal recovery.

³ Undergraduate thesis submitted as a requirement to obtain the degree of Metallurgical Engineer.

⁴ Faculty of Physicochemical Sciences, School of Metallurgical Engineering and Materials Science. Supervisor: Isaías Andrés Rentería Rincón, Master's Degree in Materials Engineering. Author: Keyla Yurley Barbosa Quiñonez.

1. Planteamiento del problema

La transición hacia esquemas de economía circular ha impulsado el interés por los residuos industriales como fuentes secundarias de metales, en un contexto marcado por el agotamiento progresivo de menas de alta ley (Krishnan et al., 2021). Los residuos industriales, como los catalizadores agotados de refinería, lodos de galvanoplastia, cenizas de combustión y escamas de laminación, entre otros, han sido identificados como fuentes relevantes de metales; sin embargo, su manejo convencional implica riesgos ambientales (Tian et al., 2023).

Desde el punto de vista técnico, estos residuos contienen metales de interés en proporciones competitivas frente a fuentes primarias; por ejemplo, la escama de laminación presenta contenidos significativos de hierro, mientras que las cenizas volantes de carbón han sido reportadas como fuentes no convencionales de litio y elementos de tierras raras (Rudnik, 2024; Sista et al., 2019). Adicionalmente, en los procesos de recuperación, la variabilidad composicional de estos residuos introduce fenómenos de competencia química que afectan la selectividad (Zhu et al., 2024). No obstante, la viabilidad de estos procesos está limitada por la complejidad fisicoquímica de los residuos, donde los metales pueden encontrarse en fases cristalinas estables o incorporados en fracciones amorfas de baja reactividad (Lassesson et al., 2014; Wolffers et al., 2021). Bajo este enfoque, la presente revisión se orienta a integrar el conocimiento disponible en la literatura sobre los principales residuos industriales empleados a nivel global como fuentes secundarias de metales, considerando cómo sus características físicas y químicas condicionan los procesos de extracción y recuperación. A partir de ello, se examinan las metodologías desarrolladas para la recuperación de metales en distintos contextos, evaluando su eficiencia, viabilidad económica y desempeño ambiental, con el fin de establecer criterios que permitan reconocer oportunidades de aplicación y adaptación en función de los residuos disponibles y las condiciones tecnológicas del entorno local.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar las estrategias de recuperación de metales a partir de residuos industriales, evaluando su viabilidad y potencial aplicación en el contexto de la industria metalúrgica local.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar, a partir de la información disponible en la literatura científica, los diferentes residuos industriales comúnmente utilizados para la recuperación de metales a nivel global.
- Analizar las metodologías empleadas en la recuperación de metales a partir de estos residuos, considerando su eficiencia, impacto ambiental y grado de desarrollo tecnológico.
- Proponer estrategias para la implementación de estas tecnologías, teniendo en cuenta las barreras tecnológicas, económicas y ambientales que pueden influir en su aplicación en la industria local.

3. Metodología

La presente investigación se desarrolló mediante una revisión documental de carácter descriptivo–analítico, orientada a identificar residuos industriales con potencial para la recuperación de metales, así como las tecnologías de aprovechamiento más empleadas y su posible aplicación en el contexto colombiano. Para ello, se estableció una metodología dividida en cuatro etapas.

3.1 Artículos de revisión y definición de palabras clave

Se realizó una búsqueda amplia de artículos de revisión en bases de datos científicas y literatura especializada, con el propósito de identificar los residuos industriales y subproductos sólidos más reportados como fuentes secundarias de metales. Esta fase permitió reconocer tendencias globales de aprovechamiento, establecer una clasificación preliminar de residuos de interés y construir un conjunto inicial de palabras clave para búsquedas posteriores más específicas.

3.2 Estrategia de búsqueda bibliográfica

Con base en la fase exploratoria, se diseñaron ecuaciones de búsqueda empleando operadores booleanos (AND, OR) para mejorar la recuperación de literatura científica indexada. Estas estrategias permitieron combinar simultáneamente palabras clave características de los residuos y las técnicas de recuperación de metales. Se consultaron las bases de datos Scopus, SpringerLink, Elsevier ScienceDirect, Google Académico y revistas científicas especializadas, con cobertura en ingeniería ambiental, metalurgia extractiva, aprovechamiento de residuos y economía circular.

3.3 Clasificación temática

Posteriormente, la literatura recopilada fue organizada de acuerdo con la naturaleza del residuo y el método predominante de recuperación de metales, permitiendo establecer relaciones entre composición fisicoquímica y viabilidad tecnológica. En esta etapa se observó, por ejemplo,

que residuos siderúrgicos, como las escamas de laminación, se encuentran comúnmente asociados a rutas pirometalúrgicas, mientras que matrices complejas de alta área superficial y presencia de metales lixiviables, como cenizas volantes, lodos galvánicos y catalizadores gastados, presentan mayor afinidad por procesos hidrometalúrgicos, particularmente lixiviación selectiva, extracción por solventes e intercambio iónico. Esta categorización permitió refinar los criterios de búsqueda y focalizar la revisión hacia estudios de mayor relevancia técnica.

3.4 Análisis, organización y síntesis de información

Finalmente, se realizó la lectura crítica, extracción y organización de la información científica proveniente de los documentos seleccionados, priorizando estudios indexados, artículos de revisión y reportes experimentales relacionados con caracterización de residuos, recuperación metálica y valorización industrial.

Para apoyar la sistematización, estructuración temática y redacción preliminar del manuscrito, se emplearon herramientas de inteligencia artificial como NotebookLM, OpenAI ChatGPT y Formalizer AI, utilizadas exclusivamente como herramientas de asistencia en la organización y síntesis textual. No obstante, la interpretación y discusión de la revisión, análisis crítico, selección bibliográfica sobre el contenido científico y técnico presentado corresponden íntegramente a la autora.

4. Revisión Bibliográfica

4.1 Residuos Industriales como fuentes secundarias de metales

En el contexto de la recuperación de metales a partir de residuos industriales, resulta necesario establecer una descripción inicial de los diferentes residuos usados para recuperación de metales, dado que su naturaleza fisicoquímica condiciona directamente su comportamiento durante los procesos de extracción (Wolffers et al., 2021). Entre los residuos considerados se incluyen catalizadores gastados de la industria del petróleo, cenizas de combustión de carbón, escamas de laminación y escorias siderúrgicas, lodos de galvanoplastia, cenizas de incineración de residuos sólidos municipales (MSWI), entre otros (Akcil et al., 2015; Gunarathne et al., 2022). Esta diversidad estructural y mineralógica establece la base para analizar, el comportamiento específico de cada residuo frente a diferentes rutas de recuperación.

4.1.1.1 Cenizas de procesos de combustión e incineración. Las cenizas generadas en procesos de combustión e incineración constituyen un conjunto de residuos sólidos de origen termoquímico cuya composición y estructura dependen del tipo de combustible o residuo alimentado y de las condiciones operativas del proceso. En este grupo se incluyen principalmente las cenizas volantes de carbón (coal fly ash, CFA), las cenizas derivadas de la combustión de petróleo pesado (oil fly ash, OFA) y las cenizas de incineración de residuos sólidos municipales (MSWI), las cuales pueden subdividirse en cenizas de fondo y cenizas volantes. Desde la perspectiva de la recuperación de metales, estos residuos se caracterizan por presentar asociaciones complejas entre fases cristalinas y fracciones amorfas, que controlan la accesibilidad química de los elementos de interés.

En las cenizas volantes de carbón, la composición química está dominada por SiO_2 , Al_2O_3 y Fe_2O_3 , configurando un sistema de aluminosilicatos donde más del 50% de la masa corresponde a una fase vítrea amorfa (Rudnik, 2024). Mineralógicamente, estas cenizas contienen mullita,

cuarzo y, en menor proporción, fases como corindón y plagioclasa, cuya formación depende de la temperatura de combustión (Li et al., 2026; Rudnik, 2024). La distribución granulométrica suele concentrarse en partículas esféricas finas ($<100 \mu\text{m}$), lo que favorece una alta área superficial; sin embargo, la incorporación de metales en la red vítrea o en fases cristalinas estables limita su lixiviabilidad. En particular, elementos como el litio pueden quedar atrapados en la estructura del aluminosilicato, lo que convierte a la ruptura de los enlaces Si–O–Al en el principal desafío para su recuperación.

Las cenizas derivadas de la combustión de petróleo pesado presentan una composición distinta, con altos contenidos de carbono residual y enriquecimiento en metales como V, Ni y Mo (Akcil et al., 2015). A nivel mineralógico, predominan óxidos, sulfuros y azufre elemental, configurando sistemas químicamente reactivos, pero también potencialmente inestables frente a procesos de lixiviación (Barik et al., 2012). La granulometría es generalmente más heterogénea que en las CFA, y la presencia de fases sulfuradas introduce limitaciones cinéticas asociadas a fenómenos de pasivación (Jung & Mishra, 2016).

En el caso de las cenizas de incineración de residuos sólidos municipales (MSWI), la heterogeneidad es aún más marcada debido a la diversidad del material de entrada. Las cenizas de fondo, formadas bajo condiciones de enfriamiento más lento, contienen principalmente fases cristalinas estables como silicatos cálcicos (gehlenita, akermanita), anhídrita y óxidos de hierro (Wolffers et al., 2021). En contraste, las cenizas volantes, capturadas en sistemas de control de emisiones, presentan una granulometría fina a submicrométrica y un enriquecimiento en metales volátiles (Zn, Pb, Cd) en forma de cloruros y sulfatos solubles. Este fenómeno de volatilización-condensación genera fases como halita, silvita y compuestos complejos tipo d'ansita, que resultan químicamente más accesibles para su recuperación (Funari et al., 2015; Wolffers et al., 2021).

Un aspecto transversal en estos residuos es la presencia de fases refractarias como espinelas y ferritas (por ejemplo, Fe_2ZnO_4), que encapsulan metales y reducen significativamente su disponibilidad química (Krishnan et al., 2021). Asimismo, se observa un enriquecimiento de metales en fracciones granulométricas finas, (Li et al., 2026; Šyc et al., 2015).

4.1.1.2 Lodos industriales y de galvanoplastia. Los lodos de galvanoplastia son residuos sólidos generados durante el tratamiento de efluentes industriales provenientes de procesos de electrodeposición metálica, en los cuales los metales disueltos se eliminan principalmente mediante precipitación química, usualmente en forma de hidróxidos metálicos, a través del ajuste del pH con agentes alcalinos (Zeng et al., 2022). Este mecanismo de formación se traduce en residuos con elevada carga metálica y una marcada variabilidad composicional, estrechamente relacionada con la naturaleza de los baños electrolíticos y de las corrientes de proceso que les dan origen (Pan et al., 2026). Desde el punto de vista composicional, estos residuos presentan concentraciones significativas de metales de interés, tales como Ni (1–10%), Cu (1–8%), Zn (0.5–5%) y Cr (1.5–15%), acompañados por elementos mayoritarios como Fe y Al, cuya concentración puede alcanzar hasta el 14.6% en peso (Du et al., 2023; Gunarathne et al., 2022). La coexistencia de múltiples cationes durante la etapa de precipitación da lugar a sistemas multimetálicos complejos, en los cuales la distribución y asociación de los elementos está fuertemente influenciada por parámetros fisicoquímicos como el pH, la fuerza iónica del medio y la presencia de especies complejantes o materia orgánica residual.

En consecuencia, la disponibilidad de los metales para su posterior recuperación depende de su concentración total y de su forma química y del grado de asociación con otras fases presentes en la matriz sólida. Desde una perspectiva estructural, los lodos de galvanoplastia se caracterizan por una naturaleza predominantemente amorfa o de baja cristalinidad, constituida

mayoritariamente por hidróxidos metálicos y óxidos hidratados formados durante los procesos de neutralización y precipitación (Zhu et al., 2024). No obstante, bajo condiciones específicas de tratamiento, pueden desarrollarse fases cristalinas secundarias; por ejemplo, el hierro puede presentarse como akaganeíta o transformarse en jarosita en medios ácidos ricos en sulfato y a temperaturas elevadas (≈ 75 °C), alterando de manera significativa su comportamiento durante los procesos de lixiviación (Kordloo et al., 2026; Xiao et al., 2022).

4.1.1.3 Escama de laminación y escorias metalúrgicas. Los residuos sólidos generados en la industria siderúrgica, principalmente la escama de laminación (mill scale) y las escorias metalúrgicas, se originan durante las distintas etapas de transformación térmica del acero. La escama de laminación se forma como una capa de óxidos que se desarrolla sobre la superficie del material metálico durante los procesos de laminado en caliente y la colada continua (Eissa et al., 2015), y representa aproximadamente entre el 1 y el 2% de la producción total de acero (Iluțiu-Varvara et al., 2018). La generación de este residuo alcanza varios millones de toneladas anuales, y su acumulación prolongada incrementa el riesgo de lixiviación de metales hacia el suelo y las aguas subterráneas (Jikar & Dhokey, 2020). En contraste, las escorias se producen durante la operación de hornos, como el alto horno o el horno de arco eléctrico, a partir de la interacción entre los fundentes, las impurezas del mineral y el baño metálico, dando lugar a materiales de mayor complejidad composicional (Kasina & Michalik, 2018; Nguyen et al., 2018).

La escama de laminación constituye una fuente secundaria directa de hierro, con un contenido de este metal cercano al 70% en peso (Eissa et al., 2015). No obstante, su composición no es uniforme y depende del tipo de acero procesado; en el caso de aceros aleados, pueden identificarse elementos adicionales como Cr, Ni, Mo y V (Iluțiu-Varvara et al., 2018). Por su parte, las escorias metalúrgicas corresponden a sistemas mayoritariamente dominados por óxidos del sistema CaO–

$\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-FeO}_x$ (Nowińska & Adamczyk, 2024), aunque su composición específica varía en función del proceso metalúrgico de origen. En determinados casos, estas matrices incorporan metales como Zn, Pb o Cu en proporciones variables (Nguyen et al., 2018), lo que introduce tanto oportunidades de valorización como restricciones técnicas para su aprovechamiento.

Desde el punto de vista físico, la escama de laminación presenta una densidad elevada, cercana a 5.4 g/cm^3 (Sista et al., 2019), y una distribución granulométrica predominantemente fina, con la mayor parte de las partículas por debajo de $150 \mu\text{m}$. Sin embargo, también se identifican fracciones de mayor tamaño y morfología laminar, así como lodos asociados con tamaños de partícula cercanos a 0.1 mm (Jikar & Dhokey, 2020). Esta heterogeneidad granulométrica, combinada con su baja porosidad, condiciona de manera directa su reactividad química. En el caso de las escorias, la variabilidad granulométrica y estructural es aún más marcada y depende fuertemente de la velocidad de enfriamiento durante su formación, parámetro que determina la proporción relativa entre fases cristalinas y fracciones vítreas.

La mineralogía de la escama de laminación está dominada por la coexistencia de hematita (Fe_2O_3), magnetita (Fe_3O_4) y wüstita (FeO) (Nowińska & Adamczyk, 2024), cuya proporción relativa depende de las condiciones de oxidación presentes durante su formación (Eissa et al., 2015). En las escorias, predominan silicatos como gehlenita, wollastonita y merwinita (Nguyen et al., 2018), junto con fases amorfas generadas por enfriamientos rápidos. Además, pueden desarrollarse estructuras tipo espinela, en las que elementos como Fe y Mn se incorporan en redes cristalinas altamente estables, reduciendo la disponibilidad química de determinados metales (Liu et al., 2021)..

La valorización de estos residuos se encuentra condicionada por diversos factores físico-químicos y operativos. En el caso de la escama de laminación, la presencia de aceites y lubricantes

genera interferencias en los procesos posteriores y hace necesarias etapas previas de acondicionamiento (Jikar & Dhokey, 2020). Asimismo, la presencia de fósforo puede provocar su enriquecimiento en la fase metálica durante determinados tratamientos, lo que constituye un desafío adicional desde el punto de vista metalúrgico (H. Wang et al., 2026). En las escorias, la incorporación de metales en silicatos o en estructuras tipo espinela limita su liberación efectiva (Kasina & Michalik, 2018), mientras que la fracción vítrea puede comportarse tanto como una barrera para la extracción como, bajo condiciones de procesamiento adecuadas, como una fase potencialmente reactiva.

4.1.1.4 Catalizadores gastados de la industria petroquímica. Los catalizadores gastados de la industria petroquímica son materiales sólidos que han perdido actividad durante procesos como hidroprocesamiento o craqueo catalítico, debido a la deposición de coque, la sinterización y la acumulación de impurezas. Están formados por fases refractarias, generalmente zeolitas, bauxita o sílice-alúmina, sobre los cuales se dispersan metales activos como Ni, Co o Mo (Akcil et al., 2015; Barik et al., 2012). Durante su operación, las corrientes de fracciones pesadas del petróleo contienen metales como V, Ni o Fe en forma de compuestos organometálicos, los cuales se descomponen y se depositan progresivamente sobre la superficie del catalizador (T. Wang et al., 2022). Este proceso conduce a un enriquecimiento metálico adicional al de su formulación original, de modo que, al final de su vida útil, estos materiales presentan concentraciones elevadas de metales acumulados, lo que permite considerarlos como fuentes secundarias de metales .

En términos de composición química, los catalizadores derivados de procesos de hidrodesulfuración son ricos en óxidos y sulfuros metálicos, destacando fases cristalográficas específicas como la alúmina (Al_2O_3), sulfuros de cobalto y molibdeno (CoS y MoS), óxido de molibdeno (MoO) y azufre elemental (S). La presencia de estas fases de azufre y sulfuros representa un

obstáculo termodinámico significativo para la recuperación de metales como níquel, cobalto, molibdeno y vanadio (Barik et al., 2012).

4.1.1.5 Otros residuos industriales. Dentro de otros residuos de interés, los polvos de chimenea (smelting flue dust) y los polvos de filtros de mangas generados en la metalurgia no ferrosa constituyen fuentes secundarias de metales con alta dispersión y reactividad, lo que dificulta su manejo y favorece su movilización ambiental. En el caso de la fundición de cobre, su generación alcanza aproximadamente 2.3 millones de toneladas anuales, correspondiendo a materiales de grano fino y baja densidad aparente (Zhang et al., 2025). Estos residuos presentan concentraciones relevantes de elementos como Ge, In, Au y Ag, en algunos casos superiores al 0.025%, lo que los sitúa dentro de rangos de interés para su recuperación, especialmente considerando la baja disponibilidad de estos metales en fuentes primarias (Y. Huang et al., 2024). Su comportamiento fisicoquímico guarda similitudes con otros sistemas particulados ricos en óxidos.

Por otra parte, los residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) representan una categoría adicional de fuentes secundarias caracterizadas por una elevada densidad de metales valiosos, incluyendo Au, Ag y Pd (Sadeghi et al., 2026). Su composición responde a sistemas multicomponente altamente heterogéneos, donde coexisten metales, polímeros y cerámicos, lo que introduce limitaciones en su procesamiento directo (Qin et al., 2025).

4.1.1.6 Relación entre características del residuo y recuperación de metales. En síntesis, los residuos industriales analizados presentan características comunes y variables que permiten establecer criterios para su clasificación y para el diseño de estrategias de extracción y recuperación metalúrgica. En la Tabla 1, se muestra un resumen de los diferentes tipos de residuos utilizados como fuentes secundarias de metales encontrados en la literatura, así como los metales de interés, su composición y fases cristalinas.

Tabla 1. Clasificación de residuos industriales como fuentes secundarias de metales según su composición y fases características.

Tipo de residuo	Composición	Fases cristalinas	Metales de interés	Referencias
Cenizas volantes de carbón	SiO ₂ , Al ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ como componentes mayoritarios; Li, Ga, Ge, Ti, REE	Fase vítrea amorfa dominante (>50%), cuarzo, mullita, magnetita, hematita, calcita, corindón	Li, Al, Ga, Ge, REE	Rudnik (2024); Li et al. (2026); Zhang et al. (2026)
Residuos de zinc (escorias)	Zn, Fe, Pb, S, Ca, Cu; trazas de Ga, In, Ge	Ferritas de Zn (ZnO·Fe ₂ O ₃), esfalerita (ZnS), óxidos y sulfuros mixtos	Zn, Ga, In, Ge	Song et al. (2021); Akcil et al. (2015)
Residuos electrónicos	In, Ga, Sn, Cu, Au, Ag, Al, As en matrices metal-polímero-cerámica	ITO (In ₂ O ₃ -SnO ₂), GaN; componentes metálicos	Au, Ag, Cu, In, Ga	Maarefvand et al. (2020); Qin et al. (2025)
Lodos de galvanoplastia	Ni, Cu, Zn, Cr con Fe y Al como mayoritarios; alta variabilidad composicional	Estructura amorfa o de baja cristalinidad; hidróxidos metálicos; fases secundarias como akaganeíta o jarosita	Ni, Cu, Zn, Cr, Al	Gunarathne et al. (2022); Du et al. (2023); Zhu et al. (2024); Kordloo et al. (2026)
MSWI	Zn, Pb, Cu, Cd, Fe, Ca; alta variabilidad según fracción	Cuarzo, anhidrita, gehlenita, akermanita, hematita; cloruros (halita, silvita) y fases como franklinita	Zn, Pb, Cu, Cd	Tang et al. (2018); Wolffers et al. (2021); Lassesson et al. (2014)
Polvos de fundición de aluminio	Al, Ca, Mg, Fe, Si; composición dependiente del proceso	Fases poco definidas; formación de aluminatos durante tratamiento; material fino y reactivo	Al (principal), Zn (trazas)	Jung & Mishra (2016); Mishra & Jung (2018)
Catalizadores gastados de refinera	Al ₂ O ₃ como soporte; Mo, Co, Ni, V, S y metales traza	Sulfuros (MoS ₂ , CoS), óxidos metálicos, γ -Al ₂ O ₃ , zeolitas (Y, ZSM-5)	Mo, Co, Ni, V	Akcil et al. (2015); Barik et al. (2012)
Escamas de laminación	Fe (~70%) con SiO ₂ , MnO y elementos de aleación (Cr, Ni, Mo, V)	Hematita (Fe ₂ O ₃), magnetita (Fe ₃ O ₄), wüstita (FeO); estructura densa y baja porosidad	Fe, Cr, Ni, Mn	Eissa et al. (2015); Sista et al. (2019); Bugdayci et al. (2018)

5. Recuperación de metales a partir de residuos industriales

Tras revisar en la literatura los principales residuos industriales considerados como fuentes secundarias de metales, se observa que su potencial de valorización depende de aspectos como el contenido total de los metales de interés y, en mayor medida, de la forma de ocurrencia y de la estabilidad de las fases portadoras (óxidos densos, hidróxidos amorfos, sulfuros, aluminosilicatos y fracciones vítreas). En consecuencia, este capítulo examina, desde una perspectiva comparativa, las rutas de extracción y recuperación más utilizadas y emergentes, organizadas en enfoques hidrometalúrgicos, pirometalúrgicos y biohidrometalúrgicos.

5.1 Métodos hidrometalúrgicos

5.1.1.1 Lixiviación ácida. La lixiviación ácida constituye uno de los métodos más usados para la disolución de metales desde residuos industriales, especialmente cuando estos se encuentran fases como óxidos, hidróxidos o amorfos en matrices complejas. El proceso se basa en la disolución o en la formación de complejos solubles de las especies de interés a un pH ácido. En lodos de aluminio con presencia de galio, el uso de HCl permite alcanzar eficiencias de extracción cercanas al 94.77%, debido a la formación del complejo aniónico $[\text{GaCl}_4]^-$, el cual estabiliza el galio en solución e inhibe procesos de hidrólisis o reprecipitación. Este comportamiento es característico de medios con cloruros, donde la especiación favorece la permanencia del metal en fase acuosa, seguida de la formación de especies complejas en solución (R. Huang et al., 2013). En residuos de baterías Zn-C, la lixiviación con H_2SO_4 es altamente efectiva para la recuperación de zinc, alcanzando eficiencias del 96% bajo altas concentraciones de ácido a 80 °C. Sin embargo, la presencia de MnO_2 introduce una limitación termodinámica significativa, ya que el Mn(IV) es prácticamente insoluble en condiciones ácidas estándar, restringiendo su recuperación a aproximadamente 40–43%. Esta limitación se supera mediante el uso de agentes reductores como glucosa, H_2O_2 o SO_2 ,

que permiten la conversión de Mn(IV) a Mn(II), especie soluble en medios sulfato (Buzatu et al., 2013). En cenizas volantes y polvos industriales que contienen germanio, la eficiencia de lixiviación puede incrementarse mediante el uso de agentes complejantes orgánicos y ultrasonido (Li et al., 2010). La combinación de H₂SO₄ con ácido tartárico favorece la formación de complejos aniónicos estables, elevando la extracción de Ge hasta 91.7%, mientras que la cavitación acústica mejora la transferencia de masa y reduce la energía de activación del proceso, permitiendo disminuir los tiempos y temperaturas de operación (Y. Huang et al., 2024).

5.1.1.2 Lixiviación alcalina. La lixiviación alcalina se emplea en sistemas donde se requiere selectividad frente a metales anfóteros o donde se busca minimizar la disolución de impurezas como el hierro (Brožová et al., 2025). Su fundamento radica en la formación de complejos solubles en medio básico, como aluminatos o zincatos, lo que permite separar metales dependiendo de su comportamiento químico y de la naturaleza de la matriz residual. En residuos con alta estabilidad estructural, como las escorias de soldadura por arco sumergido, donde el aluminio se encuentra en fases tipo espinela (MxOy·Al₂O₃), la eficiencia del proceso es limitada, alcanzando valores inferiores al 24% debido a la resistencia de estas fases al ataque químico, lo que evidencia la necesidad de pretratamientos térmicos (Annoni et al., 2013).

En contraste, en matrices más reactivas como cenizas volantes de carbón, donde los metales se encuentran en fases vítreas o amorfas, la lixiviación alcalina ha demostrado ser altamente efectiva, alcanzando recuperaciones de litio cercanas al 92–93%, especialmente cuando se emplean etapas previas de activación mecánica que incrementan la accesibilidad del metal (Rudnik, 2024). De manera similar, en cenizas de combustión y catalizadores gastados de la industria petroquímica, el uso de NaOH permite la extracción selectiva de metales como V, Zn y Pb,

reduciendo la co-disolución de especies como Fe y Ni, lo que facilita las etapas posteriores de purificación (Akcil et al., 2015).

No obstante, esta selectividad implica una reducción en la eficiencia global frente a sistemas ácidos, como se evidencia en residuos electroquímicos tipo baterías, donde la recuperación de Zn es inferior bajo condiciones alcalinas (Buzatu et al., 2013). Asimismo, el uso de agentes complejantes como NH_4OH introduce limitaciones operativas asociadas a la estabilización de los metales en solución (Chen et al., 2025).

5.1.1.3 Extracción por solventes. La extracción por solventes (SX) constituye una tecnología ampliamente empleada para la separación y purificación de metales a partir de soluciones acuosas obtenidas tras procesos de lixiviación, destacándose por su selectividad, bajos costos operativos y posibilidad de recuperación (Krishnan et al., 2021). Su implementación ha sido reportada en diversos tipos de residuos, incluyendo MSWI, cenizas de carbón y cenizas provenientes de la combustión de petróleo, las cuales contienen metales de interés como Cu, Zn, V y Ni en diferentes formas químicas (Mohanta et al., 2026). En cenizas MSWI, caracterizadas por altos contenidos de cobre y zinc, se ha desarrollado un esquema de lixiviación ácida seguido de SX utilizando extractantes como LIX860N-I y Cyanex 572, permitiendo la separación secuencial de estos metales bajo condiciones controladas de pH y concentración de orgánicos, con resultados favorables a escala piloto (Tang et al., 2018).

De manera complementaria, en lodos galvánicos, la integración de procesos biohidrometalúrgicos mediante reactores de membrana ha permitido generar soluciones enriquecidas en Ni, Cu y Zn, alcanzando concentraciones superiores a 10 g/L, y mejorando significativamente la eficiencia de las etapas posteriores de SX y electrodeposición (J. Wang et al., 2026). En cenizas de carbón, además, se han explorado sistemas de lixiviación con solventes que permiten obtener

soluciones adecuadas para procesos de recuperación, evidenciando el potencial de integración con enfoques biotecnológicos para la captura de metales traza (Bond et al., 2026). No obstante, la eficiencia global del proceso está condicionada por la etapa de lixiviación y la especiación química de los metales, ya que su presencia en formas poco solubles, como silicatos o fosfatos, puede limitar su transferencia a la fase acuosa y, por ende, su posterior extracción (Lassesson et al., 2014). En este sentido, la SX se consolida como una tecnología efectiva cuando se integra en esquemas secuenciales que consideran tanto la naturaleza del residuo como el ajuste de las condiciones fisicoquímicas del sistema.

5.1.1.4 Intercambio iónico. El intercambio iónico (IX) se ha usado en la recuperación de metales desde soluciones acuosas complejas, particularmente aquellas obtenidas tras la lixiviación de residuos industriales como lodos mineros, catalizadores agotados y escorias metalúrgicas. Su principio se basa en la afinidad diferencial de especies metálicas por grupos funcionales específicos presentes en resinas, permitiendo separar metales incluso en presencia de altas concentraciones de inter-ferentes. En soluciones de lixiviación de escorias, por ejemplo, el uso de resinas funcionalizadas con grupos iminodiacéticos y bispicolilamina ha permitido la adsorción selectiva de Fe(III), Al(III) y posteriormente Ni, alcanzando concentraciones de hasta 10 g/L en etapas de elución (Abeywi-ckrama et al., 2023). De manera similar, en lixiviados de catalizadores petroleros agotados, resinas aniónicas fuertes como Purogold™ A194 han mostrado alta selectividad hacia Pd, incluso en presencia de metales mayoritarios como Al, Ni y Mo, con comportamientos cinéticos ajustados a modelos de pseudo-segundo orden y capacidades de adsorción cercanas a 0.80 mmol/g (Bauwens et al., 2022). En sistemas más complejos, como residuos ricos en V, Sc y Cr, se ha observado que la movilidad de estos elementos depende en gran medida de su forma química, donde agentes como CaCl_2 promueven mecanismos de intercambio iónico sobre fracciones débilmente ligadas,

mientras que ácidos orgánicos favorecen la complejación (Arifin et al., 2025). Asimismo, la separación de metales como V y Fe en escorias de acero ha demostrado que la eficiencia del proceso depende de la especiación en solución y del tipo de intercambio (aniónico o catiónico), requiriendo control de estados de oxidación para favorecer la selectividad (Shakibania et al., 2022). En conjunto, estos estudios evidencian que el IX es altamente dependiente de las condiciones químicas del sistema, particularmente pH, especiación y competencia iónica, lo que exige un diseño cuidadoso para su implementación efectiva en matrices reales.

5.2 Métodos pirometalúrgicos

5.2.2.1 Tostación y calcinación. La tostación constituye un proceso térmico destinado a modificar la estabilidad mineralógica de residuos complejos como cenizas volantes, catalizadores agotados y cenizas de combustión, donde los metales se encuentran encapsulados en redes de aluminosilicatos o estructuras tipo zeolita (Akcil et al., 2015). Su función principal es inducir transformaciones de fase sólida que incrementen la reactividad química del sistema, facilitando la liberación posterior de especies metálicas mediante lixiviación o reducción.

En cenizas de petróleo, la tostación salina con carbonato de sodio (Na_2CO_3) permite convertir especies de vanadio poco solubles en vanadatos de sodio solubles en agua que son más fácilmente lixiviables en etapas posteriores. Este cambio estructural explica la diferencia de rendimiento entre procesos sin activación térmica, con recuperaciones inferiores al 5%, y sistemas con tostación previa, donde se alcanzan eficiencias superiores al 90% (Mishra & Jung, 2018). De manera análoga, en cenizas de carbón, la conversión del vidrio de aluminosilicato en fases solubles de sodio permite la liberación de litio previamente inmovilizado en la matriz vítrea (Rudnik, 2024).

La tostación por cloración introduce una vía de selectividad química basada en la formación de cloruros metálicos. En el contexto de la recuperación de metales a partir de lodos de

galvanoplastia, el uso de NH_4Cl a temperaturas intermedias (~ 400 °C) favorece la cloración de metales como Ni, Cu y Zn, mientras que especies más estables como el cromo requieren condiciones oxidantes más severas para su transformación a estados de mayor movilidad química (Tian et al., 2023). En sistemas más complejos, la oxidación de Cr^{3+} a Cr^{6+} mediante NaOH a temperaturas cercanas a 800 °C permite su posterior solubilización, aunque bajo condiciones energéticamente más exigentes (Pan et al., 2026). En conjunto, la eficiencia del proceso depende del control simultáneo de temperatura, atmósfera reactiva y dosificación del agente clorante u oxidante, lo que determina si el residuo se estabiliza o se vuelve tratable hidrometalúrgicamente.

5.2.2.2 Reducción carbotérmica. La reducción carbotérmica representa una de las rutas fundamentales para la obtención de metales a partir de óxidos presentes en residuos industriales, especialmente en escamas de laminación y residuos siderúrgicos. En este proceso, el carbono actúa como agente reductor y su relación estequiométrica respecto al óxido metálico define directamente la eficiencia de metalización. Relaciones cercanas a 1.5 veces el valor estequiométrico mejoran la recuperación de hierro, aunque excesos de carbono pueden inducir formación de carburos que afectan la pureza del producto final (Eissa et al., 2015). En la misma línea, se ha reportado que un control similar de la dosificación de carbono permite maximizar la reducción sin comprometer la calidad metalúrgica del hierro obtenido, aunque con sensibilidad elevada a variaciones de composición (Jikar & Dhokey, 2020).

En sistemas más complejos con impurezas como fósforo, la reducción de la escama debe complementarse con refinación de escorias para evitar su incorporación al metal. Un enfoque de dos etapas permite primero la desoxigenación del sistema y posteriormente la desfosforación mediante escorias diseñadas en el sistema $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{MgO}$, operando a temperaturas

inferiores a 1500 °C y bajo potenciales de oxígeno altamente reductores, lo que favorece la formación de fosfatos estables en la fase de escoria (H. Wang et al., 2026).

5.2.2.3 Reducción metalotérmica. La reducción metalotérmica, particularmente la aluminoter-mia, se basa en reacciones exotérmicas donde el aluminio actúa como agente reductor, eliminando la necesidad de aporte energético externo una vez iniciada la reacción. La viabilidad del proceso depende de alcanzar temperaturas superiores a ~1527 °C, lo que permite mantener tanto el metal reducido como la escoria de Al_2O_3 en estado fundido para facilitar la separación por densidad (Bugdayci et al., 2018). En formulaciones más avanzadas, el balance energético del sistema debe garantizar además un rango adecuado de energía específica para sostener la reacción completa sin interrupciones térmicas (Bugdayci et al., 2020). Este método permite recuperar hierro con eficiencias superiores al 95% cuando se emplean relaciones estequiométricas adecuadas de aluminio. Sin embargo, en la síntesis de aleaciones como Fe–Co o Fe–Ni, el control térmico es crítico, ya que desviaciones en la composición o en la velocidad de enfriamiento pueden inducir fases intermetá-licas frágiles como Fe–Co–Al, afectando las propiedades mecánicas y magnéticas del material final (Bugdayci et al., 2020).

5.3 Métodos Biohidrometalúrgicos

La biohidrometalurgia se basa en la transformación de fases minerales estables en especies químicas solubles mediante la acción combinada de microorganismos, agentes lixiviantes y condiciones redox moderadas. En la recuperación de metales a partir de residuos MSWI, los metales volátiles pueden redistribuirse desde fases primarias tipo gehlenita o akermanita hacia formas más reactivas como cloruros y sulfatos de Zn, Pb y otros metales pesados (Wolffers et al., 2021). Este comportamiento explica por qué las cenizas volantes presentan sistemáticamente mayor biolixiviabilidad que las cenizas de fondo (Funari et al., 2015).

Bajo estas condiciones, la biohidrometalurgia utiliza colonias bacterianas productoras de ácido como como *Acidithiobacillus ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans*, capaces de generar medios fuertemente ácidos mediante la oxidación de Fe^{2+} y compuestos sulfurados, alcanzando extracciones superiores al 90% de Zn y Cu en cenizas volantes (Funari et al., 2015). No obstante, la presencia de matrices ricas en silicatos limita la accesibilidad de Fe y otros metales, reduciendo la eficiencia en sistemas menos pretratados.

En paralelo, en la recuperación de Li a partir de cenizas volantes, el uso de metabolitos microbianos producidos por especies como *Pseudomonas putida* y *Pseudomonas koreensis* introduce una ruta alternativa basada en ácidos orgánicos, especialmente ácido glucónico, el cual mejora la complejidad de lixiviación mediante quelación y acidificación. Este enfoque ha permitido alcanzar recuperaciones de litio cercanas al 98%, superando el desempeño de ácidos convencionales en condiciones comparables (Y. Huang et al., 2024). Este comportamiento se explica por la capacidad del ácido glucónico de complejar cationes metálicos sin inducir la pasivación superficial típica de sistemas inorgánicos fuertes.

La biomineralización constituye un proceso en la cual la recuperación a partir de cenizas volantes no ocurre exclusivamente por disolución, sino por captura estructural de metales. Un caso representativo es el uso de bacterias como *Magnetospirillum gryphiswaldense* (MSR1), que biomineraliza hierro en magnetosomas intracelulares y puede interactuar con metales como Zn, Mg y Al mediante mecanismos de co-precipitación y adsorción superficial (Bond et al., 2026). Sin embargo, su aplicación industrial está limitada por la sensibilidad de los microorganismos a metales iones metálicos bactericidas, particularmente Cu^{2+} , cuya concentración por encima de 2.5 ppm inhibe su viabilidad celular. Para superar esta limitación, se requieren etapas previas de detoxificación química, como la precipitación con ferrocianuro de potasio trihidratado, reduciendo la toxicidad del

medio y permitiendo la formación de biominerales enriquecidos con Cu hasta 6.1 veces respecto a controles no tratados. En sistemas complementarios, la formación de jarosita de hidronio durante procesos de biolixiviación contribuye a la estabilización de fases residuales y a la inmovilización parcial de metales remanentes (Kordloo et al., 2026; Zhu et al., 2024).

En residuos de galvanoplastia, una mejoría en la extracción biohidrometalúrgica puede lograrse mediante la adición de fuentes de carbono biodegradables como sacarosa, la cual modifica el equilibrio ácido-base del sistema. En condiciones hidrotermales (~ 160 °C), la sacarosa favorece la hidrólisis selectiva del hierro, promoviendo la formación de fases como akaganeíta, mientras que elementos como Cr y Ni permanecen en solución debido a su mayor estabilidad en fase acuosa bajo esas condiciones redox (Zhu et al., 2024). Este tipo de control químico permite separar selectivamente matrices metálicas complejas mediante ajuste de especiación, sin requerir agentes inorgánicos altamente corrosivos (Li et al., 2026).

Desde el punto de vista cinético, predominan mecanismos difusionales. En catalizadores agotados, este control cinético es esencial para la remoción selectiva de V_2O_5 y VO_2 , mientras que fases como $NiAl_2O_4$, Ni_2SiO_4 , Fe_3O_4 y Fe_2SiO_4 presentan alta refractariedad y requieren condiciones más agresivas para su disolución (T. Wang et al., 2022). A escala piloto, los biorreactores de membrana (MBR) han demostrado capacidad de operación continua para la recuperación de Ni, Cu y Zn en sistemas multimetálicos (J. Wang et al., 2026). Sin embargo, persiste una limitación fundamental asociada a la heterogeneidad de los residuos y a los largos tiempos de residencia requeridos para completar la extracción, lo que restringe su escalabilidad industrial. A pesar de ello, la biohidrometalurgia presenta una ventaja energética clara frente a rutas pirometalúrgicas, operando a temperaturas más bajas (R. Huang et al., 2013; Krishnan et al., 2021).

6. Prospectivas para la valorización residuos industriales colombianos

6.1 Residuos industriales relevantes en el contexto colombiano.

En Colombia, los residuos industriales más estudiados provienen de la generación eléctrica a base de carbón, la refinación petroquímica, la industria metalmeccánica y la incineración de residuos sólidos. Predominan las cenizas de carbón y los catalizadores gastados de procesos de refinación, seguidos por escorias y lodos galvánicos.

En residuos derivados de la combustión de carbón, particularmente cenizas volantes, se observa una matriz compuesta por óxidos de silicio y aluminio, con presencia significativa de óxidos de hierro como magnetita, hematita y maghemita. Estas fases suelen coexistir con aluminosilicatos de baja cristalinidad, donde se reporta una contribución relevante de material amorfo (Santos et al., 2023). También se identifican fases salinas como halita y silvita, particularmente en fracciones finas, donde el contenido de Cl y Na₂O puede representar una proporción mayoritaria de la masa total (Bedoya-Henao et al., 2025).

En términos de elementos traza, estos residuos contienen Zn, Pb, Cd, Cu y Co, asociados principalmente a materiales particulados, fases secundarias o recubrimientos sobre partículas finas. En sistemas de incineración de residuos más complejos, estos elementos pueden presentarse como óxidos metálicos o sales parcialmente solubles, con distribución heterogénea entre fracciones finas y gruesas (Cobo et al., 2009).

En residuos catalíticos de la industria petroquímica, particularmente catalizadores de craqueo catalítico, la estructura está compuesta por una fase zeolítica dispersa en una matriz de óxidos inorgánicos. Estos materiales presentan contenidos apreciables de Zn, Cr, Pb, As y La, incorporados tanto en la red porosa como en superficies activas del sólido (Torres Agredo et al., 2012). En catalizadores gastados de hidrotratamiento, se ha observado acumulación progresiva de Ni, V, Fe

y carbono tipo coque, con deposición preferencial en la superficie externa del pellet catalítico, generando gradientes composicionales asociados a la posición dentro del reactor (Cobo et al., 2009; Duarte et al., 2019).

En residuos MSWI, la fracción de cenizas presenta una composición con predominancia por fases salinas solubles, principalmente NaCl y KCl, junto con óxidos alcalinos como Na₂O y K₂O. Estas fases se encuentran frecuentemente en estado amorfo o microcristalino (Bedoya-Henao et al., 2025). En contraste, las cenizas de fondo presentan una matriz más mineralizada, dominada por SiO₂, CaO y Al₂O₃, con presencia adicional de Fe₂O₃, MgO y óxidos alcalinos en menores proporciones. En estas fracciones también se identifica material amorfo cuya cuantificación requiere métodos de refinamiento estructural como Rietveld, debido a su baja cristalinidad (Bedoya-Henao et al., 2025). La distribución de metales pesados en estos sistemas está asociada tanto a fases cristalinas secundarias como a superficies particuladas. Elementos como Pb, Cd y Cu se encuentran frecuentemente asociados a recubrimientos superficiales o incrustados en matrices vítreas, lo cual condiciona su accesibilidad química y su comportamiento en procesos de lixiviación (Cobo et al., 2009). En sistemas con alto contenido de cloruros, la movilidad de estos metales tiende a incrementarse por formación de especies más solubles.

6.2 Aprovechamiento de los residuos industriales

Las estrategias de recuperación de metales desde residuos industriales y energéticos se han abordado de forma puntual mediante rutas hidrometalúrgicas, separación física y procesos de estabilización química. En cenizas volantes de carbón, por ejemplo, se han usado lixiviaciones ácidas para extraer zinc y plomo y se han logrado tasas de recuperación superiores al 90% para zinc y cerca del 40% para plomo, siguiendo etapas secuenciales de disolución y control sobre las fases sulfuradas (Borda et al., 2023). En los residuos catalíticos de la industria petrolera, los

investigadores han identificado que metales como níquel, vanadio, hierro y manganeso están ligados a depósitos carbonosos y óxidos, con potencial de extracción, pero no se han desarrollado procesos a escala industrial (Duarte et al., 2019; Santos et al., 2023). También residuos MSWI, se ha reportado separación magnética y fraccionamiento mineralógico para aislar fases ricas en hierro o aluminosilicatos, junto a elementos asociados, dejando la oportunidad para una valorización metalúrgica parcial (Bedoya-Henao et al., 2025; Cobo et al., 2009).

A pesar de estas limitadas aproximaciones, la mayor parte de los desarrollos tecnológicos en el país se concentra en la valorización de residuos dentro del sector de materiales de construcción y en procesos de estabilización de contaminantes. Residuos como cenizas volantes, cenizas de fondo, catalizadores FCC y subproductos de incineración han sido ampliamente estudiados como sustitutos de cemento Portland, agregados o adiciones puzolánicas, con desempeños mecánicos adecuados y reducción de impactos ambientales asociados a su disposición final (Caicedo-Caicedo et al., 2015; Torres Agredo et al., 2012; Yepes Gaviria et al., 2023). En paralelo, también se emplean estrategias de encapsulación en cemento endurecido para inmovilizar metales potencialmente tóxicos como Pb, Cd o Cr, reduciendo su lixiviación por debajo de límites normativos (Maury-Ramírez & De Belie, 2023).

Este enfoque predominante hacia la construcción y la contención química de contaminantes ha limitado la implementación de rutas específicas de recuperación de metales a escala aplicada, a pesar de que múltiples residuos presentan contenidos significativos de metales valiosos o estratégicos. En cenizas de carbón, por ejemplo, se han identificado fases enriquecidas en Fe, Ni y Zn; en catalizadores gastados, acumulaciones de V y Ni asociadas a depósitos carbonosos; y en residuos de incineración, fracciones minerales con Ca, Al y trazas metálicas susceptibles de separación y procesamiento (Bedoya-Henao et al., 2025; Duarte et al., 2019; Santos et al., 2023).

Esta situación convierte dichos residuos en matrices con potencial para su posible aprovechamiento como fuentes secundarias de metales mediante rutas hidrometalúrgicas, pirometalúrgicas o de separación aún poco desarrolladas en el contexto nacional. Esto abre espacio para evaluar tecnologías de recuperación orientadas a la valorización de metales presentes en estos residuos.

6.3 Implementación de metodologías de recuperación

En el contexto de los residuos industriales y energéticos en Colombia, la selección de rutas de valorización metalúrgica depende directamente de la composición y la forma de asociación de los metales en cada residuo. En cenizas volantes de carbón, catalizadores gastados, cenizas de incineración y lodos galvánicos, los metales se encuentran principalmente como óxidos (Fe_2O_3 , ZnO , PbO), aluminosilicatos o incrustados en estructuras carbonosas.

Dentro de los métodos hidrometalúrgicos, las rutas más viables para el contexto colombiano son la lixiviación ácida y la lixiviación secuencial, debido a la alta presencia de fases oxidadas y sales metálicas en cenizas y residuos de combustión. Estas condiciones favorecen la disolución de Zn, Pb, Cu y parcialmente Fe, como se ha evidenciado en cenizas volantes donde se alcanzan altas eficiencias de extracción bajo condiciones controladas (Borda et al., 2023; Wolffers et al., 2021). La lixiviación alcalina presenta mayor utilidad en matrices ricas en sílice y aluminosilicatos, como bottom ash o residuos de incineración, donde se busca disolver fases reactivas o activar procesos posteriores. En cambio, la extracción por solventes y el intercambio iónico son menos viables de forma directa, ya que requieren soluciones previamente purificadas y concentraciones metálicas homogéneas, condición que rara vez se cumple en residuos multicomponentes como cenizas o lodos industriales.

En los métodos pirometalúrgicos, la viabilidad es más restringida. La tostación y la calcinación pueden aplicarse en residuos con sulfuros residuales, carbonatos o hidróxidos, pero su uso

en Colombia se limita por el alto contenido de fases oxidadas ya presentes en los residuos, lo que reduce el beneficio de transformación previa. La reducción carbotérmica o metalotérmica presenta potencial en residuos con altos contenidos de óxidos metálicos (Fe, Zn, Ni), aunque su aplicación se ve limitada por el consumo energético y la heterogeneidad de las matrices. Un caso particular podría corresponder a la separación de fases ferromagnéticas en cenizas de carbón, donde se recuperan ferrosferas con contenidos significativos de Fe, Ni y Mn mediante rutas físicas acopladas a tratamiento térmico (Santos et al., 2023).

En los métodos biohidrometalúrgicos, se identifica un potencial importante pero aún no desarrollado a gran escala. La presencia de metales en forma oxidada o parcialmente solubilizable en cenizas volantes y lodos galvánicos permite considerar procesos de biolixiviación para Zn, Cu o Fe; sin embargo, la heterogeneidad química, la presencia de cloruros y la alcalinidad de algunos residuos limitan la estabilidad de los sistemas biológicos, lo que restringe su implementación actual.

En síntesis, las rutas más viables para el contexto colombiano corresponden a la hidrometalurgia ácida y secuencial, complementada con procesos físicos de separación y recuperación de fases específicas, mientras que los métodos pirometalúrgicos avanzados y la biohidrometalurgia permanecen como opciones de desarrollo condicionado. Esto se relaciona directamente con la naturaleza de los residuos disponibles, caracterizados por matrices complejas con fases oxidadas, aluminosilicatadas y carbonosas donde los metales se encuentran dispersos o parcialmente encapsulados, lo que exige rutas selectivas de disolución más que procesos térmicos intensivos.

Conclusiones

Los residuos industriales representan fuentes secundarias relevantes de metales de interés económico y estratégico, sin embargo, su potencial de recuperación depende principalmente de la forma de asociación mineralógica de los metales, su especiación química, la estabilidad de las fases portadoras y de su contenido de metales de interés.

Los métodos hidrometalúrgicos, particularmente la lixiviación ácida, constituyen las rutas más versátiles para la extracción de metales a partir de residuos complejos, debido a su capacidad de solubilización selectiva y a su integración con etapas posteriores de purificación como extracción por solventes o intercambio iónico.

Los métodos pirometalúrgicos y biohidrometalúrgicos representan alternativas complementarias con ventajas específicas; no obstante, su viabilidad depende fuertemente de la naturaleza del residuo, de la demanda energética del proceso y de la necesidad de pretratamientos que incrementen la accesibilidad química de los metales presentes.

En Colombia, el aprovechamiento de residuos industriales se ha orientado principalmente hacia aplicaciones en materiales de construcción y contención de contaminantes, mientras que la recuperación metálica continúa siendo un campo poco desarrollado, restringido a estudios puntuales de lixiviación ácida, separación física y caracterización composicional.

Residuos como cenizas volantes de carbón, cenizas de incineración, catalizadores gastados y lodos industriales presentan condiciones favorables para su aprovechamiento como fuentes secundarias de metales en el contexto colombiano, siendo las rutas hidrometalúrgicas secuenciales, complementadas con pretratamientos físicos y etapas selectivas de separación, la alternativa más prometedora para su implementación futura.

Referencias bibliográficas

- Akcil, A., Vegliò, F., Ferella, F., Okudan, M. D., & Tuncuk, A. (2015). A review of metal recovery from spent petroleum catalysts and ash. *Waste Management*, *45*, 420–433. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.007>
- Annoni, R., Souza, P. S., Petrániková, M., Miskufova, A., Havlík, T., & Mansur, M. B. (2013). Submerged-arc welding slags: Characterization and leaching strategies for the removal of aluminum and titanium. *Journal of Hazardous Materials*, *244–245*, 335–341. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.11.053>
- Barik, S. P., Park, K. H., Parhi, P. K., & Park, J. T. (2012). Direct leaching of molybdenum and cobalt from spent hydrodesulphurization catalyst with sulphuric acid. *Hydrometallurgy*, *111–112*(1), 46–51. <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2011.10.001>
- Bedoya-Henao, C. A., Carmona-Ramírez, J. D., Betancur-Granados, N., Cabrera-Poloche, F. D., Viana-Casas, G. A., Restrepo-Baena, O. J., & Tobón, J. I. (2025). Characterization and potential uses of municipal solid waste incineration remnants in San Andrés Islands – Colombia. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, *11*. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2024.101047>
- Bond, J., Maso-Martinez, M., Sutherland, A., Overton, T. W., Goddard, A., Najdanovic, V., Chevrier, D. M., Gomez Gonzalez, M. A., & Fernandez-Castane, A. (2026). Green solvents for the extraction and bioutilisation of metals from coal fly ash by *Magnetospirillum gryphiswaldense* MSR1. *Chemosphere*, *396*, 144839. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2026.144839>
- Borda, J., González, C., & Torres, R. (2023). Aqueous Recovery of Zinc and Lead from Coal Fly Ashes of a Colombian Thermoelectric Plant. *Ingeniería e Investigación*, *43*(1), e95364. <https://doi.org/10.15446/ing.investig.95364>
- Brožová, S., Orlová, D., Brož, J., Slíva, A., Dižo, J., Macháčková, A., Marasová, D., Hružík, L., Bindzár, P., & Simha Martynková, G. (2025). Selective separation and recovery of copper from industrial waste by leaching. *Acta Montanistica Slovaca*, *30*(2), 297–308. <https://doi.org/10.46544/AMS.v30i2.02>
- Bugdayci, M., Alkan, M., Turan, A., & Yücel, O. (2018). Production of Iron Based Alloys from Mill Scale through Metallothermic Reduction. *High Temperature Materials and Processes*, *37*(9–10), 889 – 898. <https://doi.org/10.1515/htmp-2017-0073>

- Bugdayci, M., Deniz, G., Ziyreker, C., Turan, A., & Oncel, L. (2020). Thermodynamic modeling and production of FeCo alloy from mill scale through metallothermic reduction. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 23(5), 1259 – 1265.
<https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.03.003>
- Buzatu, T., Popescu, G., Birloaga, I., & Săceanu, S. (2013). Study concerning the recovery of zinc and manganese from spent batteries by hydrometallurgical processes. *Waste Management*, 33(3), 699–705. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.10.005>
- Caicedo-Caicedo, E. A., Mejía-De-Gutiérrez, R., Gordillo-Suárez, M., & Torres-Agredo, J. (2015). Reutilización de un residuo de la industria petrolera (FCC) en la producción de elementos constructivos. *Ingeniería y Universidad*, 19(1), 135–154.
<https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu19-1.rip>
- Chen, K., Dai, S., Li, J., Lin, L., Qin, W., Gao, Y., Hu, E., & Jiang, J. (2025). Towards circular economy: Sustainable valorization of municipal solid waste incineration fly ash for recovery of high-purity chlorides and calcium, and separation of heavy metals. In *Environmental Research* (Vol. 277). Academic Press Inc.
<https://doi.org/10.1016/j.envres.2025.121536>
- Cobo, M., Gálvez, A., Conesa, J. A., & Montes de Correa, C. (2009). Characterization of fly ash from a hazardous waste incinerator in Medellin, Colombia. *Journal of Hazardous Materials*, 168(2–3), 1223–1232. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.02.169>
- Du, J., Zeng, L., Zhang, S., Xiao, C., Zhang, G., Cao, Z., Li, Q., Wang, M., Guan, W., & Wu, S. (2023). Complete recycling of valuable metals from electroplating sludge: Green and selective recovery of chromium. *Chemical Engineering Journal*, 467.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143484>
- Duarte, L., Garzón, L., & Baldovino-Medrano, V. G. (2019). An analysis of the physicochemical properties of spent catalysts from an industrial hydrotreating unit. *Catalysis Today*, 338, 100–107. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2019.05.025>
- Eissa, M., Ahmed, A., & El-Fawkhry, M. (2015). Conversion of Mill Scale Waste into Valuable Products via Carbothermic Reduction. *Journal of Metallurgy*, 2015, 1–9.
<https://doi.org/10.1155/2015/926028>

- Funari, V., Braga, R., Bokhari, S. N. H., Dinelli, E., & Meisel, T. (2015). Solid residues from Italian municipal solid waste incinerators: A source for “critical” raw materials. *Waste Management*, *45*, 206–216. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.005>
- Gunarathne, V., Rajapaksha, A. U., Vithanage, M., Alessi, D. S., Selvasembian, R., Naushad, M., You, S., Oleszczuk, P., & Ok, Y. S. (2022). Hydrometallurgical processes for heavy metals recovery from industrial sludges. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *52*(6), 1022–1062. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1847949>
- Huang, R., Huang, K. L., Lin, Z. Y., Wang, J. W., Lin, C., & Kuo, Y. M. (2013). Recovery of valuable metals from electroplating sludge with reducing additives via vitrification. *Journal of Environmental Management*, *129*, 586–592. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.08.019>
- Huang, Y., Wang, M., Liu, B., Su, S., Sun, H., Yang, S., & Han, G. (2024). The Extraction and Separation of Scarce Critical Metals: A Review of Gallium, Indium and Germanium Extraction and Separation from Solid Wastes. In *Separations* (Vol. 11, Number 4). Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI). <https://doi.org/10.3390/separations11040091>
- Iluțiu-Varvara, D.-A., Aciu, C., Maria Mârza, C., Sas - Boca, I.-M., & Tintelecan, M. (2018). Assessment of recycling potential of the oily mill scale in the steelmaking industry. *Procedia Manufacturing*, *22*, 228–232. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.03.035>
- Jikar, P. C., & Dhokey, N. B. (2020). Overview on production of reduced iron powder from mill scale waste. *Materials Today: Proceedings*, *44*, 4324 – 4329. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.552>
- Jung, M., & Mishra, B. (2016). Kinetic and Thermodynamic Study of Aluminum Recovery from the Aluminum Smelter Baghouse Dust. *Journal of Sustainable Metallurgy*, *2*(3), 257–264. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0056-6>
- Kasina, M., & Michalik, M. (2018). Iron Metallurgy Slags as a Potential Source of Critical Elements - Nb, Ta and REE. *Mineralogia*, *47*(1–4), 15–28. <https://doi.org/10.1515/mipo-2017-0004>
- Kordloo, M., Jafari, N., Rezaei, A., Noeparast, H., Nasab, M. H., & Ghorbani, Y. (2026). Enhanced detoxification and valuable metal extraction from electroplating sludge via

- ultrasonic-assisted ferric sulfate bio acid. *Scientific Reports*, 16(1).
<https://doi.org/10.1038/s41598-026-37924-x>
- Krishnan, S., Zulkapli, N. S., Kamyab, H., Taib, S. M., Din, M. F. B. M., Majid, Z. A., Chaiprapat, S., Kenzo, I., Ichikawa, Y., Nasrullah, M., Chelliapan, S., & Othman, N. (2021). Current technologies for recovery of metals from industrial wastes: An overview. In *Environmental Technology and Innovation* (Vol. 22). Elsevier B.V.
<https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101525>
- Lassesson, H., Fedje, K. K., & Steenari, B.-M. (2014). Leaching for recovery of copper from municipal solid waste incineration fly ash: Influence of ash properties and metal speciation. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 32(8), 755–762. <https://doi.org/10.1177/0734242X14542147>
- Li, C., Xie, F., Ma, Y., Cai, T., Li, H., Huang, Z., & Yuan, G. (2010). Multiple heavy metals extraction and recovery from hazardous electroplating sludge waste via ultrasonically enhanced two-stage acid leaching. *Journal of Hazardous Materials*, 178(1–3), 823–833.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.02.013>
- Li, C., Zhou, C., French, D., Graham, I. T., Wang, Z., Li, Y., Wang, F., Li, D., & Liu, G. (2026). The synergistic recovery of aluminum, lithium and gallium from fly ash using physical enrichment followed by an alkali fusion-organic acid leaching method. *Minerals Engineering*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2026.110228>
- Liu, B., Zhang, L., Zhang, Y., Han, G., & Zhang, B. (2021). Innovative methodology for co-treatment of mill scale scrap and manganese ore via oxidization roasting-magnetic separation for preparation of ferrite materials. *Ceramics International*, 47(5), 6139 – 6153.
<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2020.10.193>
- Maury-Ramírez, A., & De Belie, N. (2023). Environmental and Economic Assessment of Eco-Concrete for Residential Buildings: A Case Study of Santiago de Cali (Colombia). *Sustainability*, 15(15), 12032. <https://doi.org/10.3390/su151512032>
- Mishra, B., & Jung, M. (2018). Recovery and Recycling of Valuable Metals from Fine Industrial Waste Materials. *International Journal of the Society of Material Engineering for Resources*, 23(1), 105 – 108. <https://doi.org/10.5188/ijmsmer.23.105>
- Mohanta, S., Kumar, A., Das, S., Dash, A., Sahu, K. K., & Mishra, D. (2026). Prospects of Vanadium Extraction from Different Secondary Sources: A Review. In *Mining, Metallurgy*

- and Exploration*. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH.
<https://doi.org/10.1007/s42461-025-01348-4>
- Nguyen, T. C., Loganathan, P., Nguyen, T. V., Kandasamy, J., Naidu, R., & Vigneswaran, S. (2018). Adsorptive removal of five heavy metals from water using blast furnace slag and fly ash. *Environmental Science and Pollution Research*, 25(21), 20430–20438.
<https://doi.org/10.1007/s11356-017-9610-4>
- Nowińska, K., & Adamczyk, Z. (2024). Pyrometallurgical Recovery of Valuable Metals from Zn-Pb Slags. *METAL - International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings, 2024-May*(May), 554–561. <https://doi.org/10.37904/metal.2024.4961>
- Pan, Y., Wu, X., & Liu, Y. (2026). A brief review of copper recovery from electroplating sludge. *Discover Sustainability*. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-02572-0>
- Qin, J., Li, S., Zhao, L., Liu, B., & Zhang, Y. (2025). Precious metal recycling technology in electronic waste: Progress, challenges, and sustainable development path. *Green and Smart Mining Engineering*, 2(4), 459–482. <https://doi.org/10.1016/j.gsme.2025.10.005>
- Rudnik, E. (2024). Coal and Coal By-Products as Unconventional Lithium Sources: A Review of Occurrence Modes and Hydrometallurgical Strategies for Metal Recovery. *Minerals*, 14(8), 849. <https://doi.org/10.3390/min14080849>
- Sadeghi, B., Allam, S. N., Khazaei, A., & Cavaliere, P. (2026). Closed-loop extraction of precious metals from e-waste via NH₄HCO₃ desulfurization and secondary lead smelting. *Waste Management*, 210. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115228>
- Santos, A. C., Cruz, C., Font, E., French, D., Guedes, A., Moreira, K., Sant’Ovaia, H., Vieira, B. J. C., Waerenborgh, J. C., & Valentim, B. (2023). Physicochemical Properties of Fe-Bearing Phases from Commercial Colombian Coal Ash. *Minerals*, 13(8).
<https://doi.org/10.3390/min13081055>
- Sista, K. S., Dwarapudi, S., & Nerune, V. P. (2019). Direct reduction recycling of mill scale through iron powder synthesis. *ISIJ International*, 59(5), 787–794.
<https://doi.org/10.2355/isijinternational.ISIJINT-2018-628>
- Šyc, M., Kameníková, P., Krausová, A., Zach, B., Pohořelý, M., Svoboda, K., & Punčochář, M. (2015). MSWI Bottom Ash Characterization and Resource Recovery Potential Assessment. *Inżynieria Mineralna*, 1(2). <https://doi.org/10.29227/IM-2015-02-14>

- Tang, J., Su, M., Zhang, H., Xiao, T., Liu, Y., Liu, Y., Wei, L., Ekberg, C., & Steenari, B.-M. (2018). Assessment of copper and zinc recovery from MSWI fly ash in Guangzhou based on a hydrometallurgical process. *Waste Management*, *76*, 225–233.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.02.040>
- Tian, B., Cui, Y., Zhao, J., Liu, M., Shang, H., Gao, W., Wen, J., & Ma, J. (2023). Stepwise recovery of Ni, Cu, Zn, and Cr: A green route to resourceful disposal of electroplating sludge. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, *11*(3).
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109767>
- Torres Agredo, J., Trochez Serna, J. J., & Mejia de Gutierrez, R. (2012). Reutilización de un residuo de la industria petroquímica como adición al cemento portland. *ingeniería y Ciencia.*, *8*(18), 141–156.
- Wang, H., Ma, J., Li, Y., Chen, Z., Dai, F., Li, G., Yan, W., & Wang, Q. (2026). Sustainable recycling of alloy steel mill scale via tailored slag refining: A low-carbon route for in-process resource recovery. *Journal of Environmental Management*, *399*.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2026.128625>
- Wang, J., Wang, M., Tong, P., Jiang, L., Yang, Y., Cui, Y., & Xin, B. (2026). Bioleaching the Valuable Metals from Electroplating Sludge Through the Membrane Biological Reactor. *Journal of Sustainable Metallurgy*. <https://doi.org/10.1007/s40831-025-01370-2>
- Wang, T., Ren, J., Ravindra, A. V., Lv, Y., & Le, T. (2022). Kinetics of Ni, V and Fe Leaching from a Spent Catalyst in Microwave-Assisted Acid Activation Process. *Molecules*, *27*(7).
<https://doi.org/10.3390/molecules27072078>
- Wolffers, M., Eggenberger, U., Schlumberger, S., & Churakov, S. V. (2021). Characterization of MSWI fly ashes along the flue gas cooling path and implications on heavy metal recovery through acid leaching. *Waste Management*, *134*, 231–240.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.022>
- Xiao, Y., Li, L., Huang, M., Liu, Y., Xu, J., Xu, Z., & Lei, Y. (2022). Treating Waste with Waste: Metals Recovery from Electroplating Sludge Using Spent Cathode Carbon Combustion Dust and Copper Refining Slag. *SSRN Electronic Journal*.
<https://doi.org/10.2139/ssrn.4073416>

- Yepes Gaviria, O. N., Jaramillo, H. Y., & Gómez Camperos, J. A. (2023). Fly Ashes for Concrete Blocks. *International Review of Civil Engineering*, 14(2), 94–100.
<https://doi.org/10.15866/irece.v14i2.22019>
- Zeng, Q., Huang, H., Tan, Y., Chen, G., & Hao, T. (2022). Emerging electrochemistry-based process for sludge treatment and resources recovery: A review. In *Water Research* (Vol. 209). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117939>
- Zhang, T., Liu, X., Qu, G., Lu, P., Wang, J., Wu, F., & Ren, Y. (2025). Secondary resource utilization of metallurgical solid waste: Current status and future prospects of wet extraction of valuable metals. *Separation and Purification Technology*, 361, 131278.
<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2024.131278>
- Zhu, S., Zhang, Y., Xin, L., Htet Oo, K., Zheng, M., Ma, S., Guo, J., & Chen, Y. (2024). Near-complete recycling of real mix electroplating sludge as valuable metals via Fe/Cr co-crystallization and stepwise extraction route. *Journal of Environmental Management*, 358.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120821>