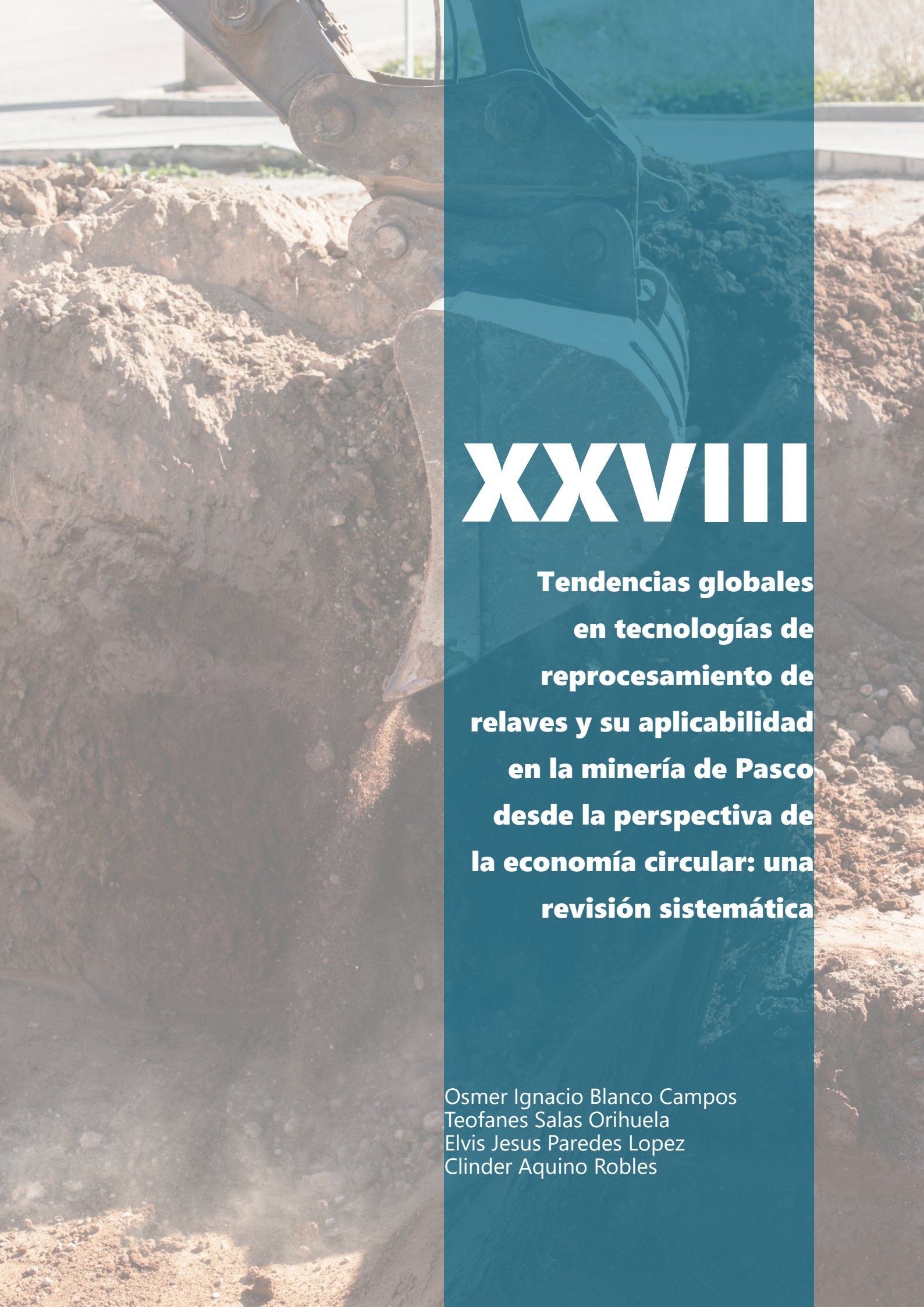




XXVIII

**Tendencias globales
en tecnologías de
reprocesamiento de
relaves y su aplicabilidad
en la minería de Pasco
desde la perspectiva de
la economía circular: una
revisión sistemática**

Osmer Ignacio Blanco Campos
Teofanes Salas Orihuela
Elvis Jesus Paredes Lopez
Clinder Aquino Robles

Tendencias globales en tecnologías de reprocesamiento de relaves y su aplicabilidad en la minería de Pasco desde la perspectiva de la economía circular: una revisión sistemática

Osmer Ignacio Blanco Campos
Teofanes Salas Orihuela
Elvis Jesus Paredes Lopez
Clinder Aquino Robles

{

RESUMEN

La creciente demanda de metales críticos para la transición energética, combinada con la intensificación de presiones ambientales y regulatorias, ha posicionado el reprocesamiento de relaves mineros como una estrategia fundamental dentro de la economía circular. Esta revisión sistemática analiza las tendencias globales en tecnologías de valorización de relaves publicadas entre 2020 y 2024, evaluando su aplicabilidad en el contexto de la minería polimetálica de Pasco, Perú. Siguiendo las directrices PRISMA 2020, se identificaron 352 registros iniciales en bases de datos especializadas, de los cuales 27 estudios cumplieron los criterios de elegibilidad. Los resultados evidencian cinco dimensiones tecnológicas principales: procesos hidrometalúrgicos, bio-hidrometalurgia, geopolimerización, procesamiento mineral avanzado y recuperación de recursos hídricos. La evidencia revela que la biolixiviación alcanza rendimientos de recuperación del 36-78% para elementos de tierras raras, mientras que la geopolimerización genera ahorros ambientales de 25 a 930 kg CO₂-eq por tonelada tratada. El análisis de viabilidad económica demuestra sensibilidad crítica al CAPEX y volatilidad de precios metálicos, requiriendo herramientas financieras sofisticadas como el Análisis de Opciones Reales. Las barreras de implementación incluyen complejidad técnica-regulatoria y inercia organizacional, mientras que los habilitadores comprenden marcos políticos progresivos y colaboración intersectorial. Para Pasco, la aplicabilidad tecnológica se centra en lixiviación secuencial para

aprovechamiento polimetálico y geopolimerización para grandes volúmenes residuales, requiriendo adaptación de modelos político-regulatorios exitosos como el chileno.

Palabras clave: relaves mineros, economía circular, reprocesamiento, valorización, biolixiviación, geopolimerización, sostenibilidad minera, Pasco.

ABSTRACT

The increasing demand for critical metals for energy transition, combined with intensified environmental and regulatory pressures, has positioned mine tailings reprocessing as a fundamental strategy within the circular economy framework. This systematic review analyzes global trends in tailings valorization technologies published between 2020 and 2024, evaluating their applicability in the context of polymetallic mining in Pasco, Peru. Following PRISMA 2020 guidelines, 352 initial records were identified in specialized databases, of which 27 studies met eligibility criteria. Results evidence five main technological dimensions: hydrometallurgical processes, bio-hydrometallurgy, geopolymerization, advanced mineral processing, and water resource recovery. Evidence reveals that bioleaching achieves recovery yields of 36-78% for rare earth elements, while geopolymerization generates environmental savings of 25 to 930 kg CO₂-eq per treated ton. Economic viability analysis demonstrates critical sensitivity to CAPEX and metal price volatility, requiring sophisticated financial tools such as Real Options Analysis. Implementation barriers include technical-regulatory complexity and organizational inertia, while enablers comprise progressive policy frameworks and intersectoral collaboration. For Pasco, technological applicability focuses on sequential leaching for polymetallic utilization and geopolymerization for large residual volumes, requiring adaptation of successful political-regulatory models such as the Chilean approach.

Keywords: mine tailings, circular economy, reprocessing, valorization, bioleaching, geopolymerization, mining sustainability, Pasco.

ru.



INTRODUCCIÓN

La industria minera contemporánea se encuentra en una encrucijada paradigmática sin precedentes, donde convergen dos fuerzas transformadoras de magnitud global. Por un lado, la acelerada transición hacia energías renovables y tecnologías de descarbonización ha intensificado exponencialmente la demanda mundial de metales críticos, particularmente elementos de tierras raras, litio, cobalto y materiales estratégicos para baterías y sistemas fotovoltaicos. Simultáneamente, la intensificación de presiones socioambientales y marcos regulatorios cada vez más estrictos exige una reconceptualización fundamental de la gestión de residuos extractivos hacia prácticas ambientalmente sostenibles y socialmente responsables.

En este contexto de tensiones convergentes, los relaves mineros emergen como un fenómeno de doble naturaleza conceptual que trasciende la tradicional categorización unidimensional de "residuo". Araujo et al. (2022) documentan que la industria extractiva global genera anualmente aproximadamente 14 mil millones de toneladas de relaves, constituyendo uno de los mayores flujos de residuos antropogénicos a escala planetaria. Esta magnitud volumétrica adquiere dimensiones críticas cuando se considera que, según las estimaciones de Hamraoui et al. (2024), estos residuos ocupan extensiones territoriales superiores a 180,000 hectáreas distribuidas en más de 18,000 instalaciones de almacenamiento worldwide, representando no solamente un pasivo ambiental de proporciones monumentales, sino también un repositorio inexplorado de recursos minerales secundarios de valor estratégico.

El modelo operacional tradicionalmente dominante en la industria extractiva ha seguido un patrón lineal convencional caracterizado por la secuencia "extraer-procesar-desechar", generando consecuencias ambientales a largo plazo de considerable gravedad. Na et al. (2024) identifican el drenaje ácido de mina (AMD) como una de las manifestaciones más problemáticas de este paradigma lineal, donde la oxidación de minerales sulfurosos presentes en relaves produce lixiviados ácidos que contaminan recursos hídricos superficiales y subterráneos durante décadas o incluso siglos posteriores al cese de operaciones mineras. Adicionalmente, la ocupación permanente de vastas extensiones territoriales para el confinamiento de estos residuos genera conflictos socioambientales complejos, particularmente en regiones con alta densidad poblacional y economías dependientes de actividades agropecuarias.

Ante estas problemáticas sistémicas, la economía circular (EC) emerge como un marco

conceptual transformador que propone una reconceptualización radical de los flujos materiales en la industria extractiva. Kinnunen et al. (2022) definen la EC aplicada al sector minero como un sistema regenerativo que busca cerrar los bucles de materiales mediante la maximización del valor extraído de cada tonelada de mineral procesado, la extensión de la vida útil de los productos metálicos, y la minimización de residuos destinados a disposición final. Esta perspectiva, desarrollada posteriormente por Cotrina & Marquina (2025), conceptualiza los relaves no como desechos terminales, sino como recursos minerales secundarios susceptibles de valorización técnica y económica mediante tecnologías innovadoras de reprocesamiento.

La región de Pasco, ubicada en la sierra central del Perú, representa un caso emblemático que ilustra tanto los desafíos como las oportunidades inherentes a la aplicación de principios de economía circular en contextos mineros complejos. Esta jurisdicción, caracterizada por más de un siglo de actividad extractiva intensiva centrada en la explotación de yacimientos polimetálicos de plomo, zinc, plata y cobre, ha acumulado un legado histórico de pasivos ambientales mineros cuya magnitud y complejidad mineralógica presentan simultáneamente desafíos técnicos significativos y oportunidades excepcionales para la implementación de estrategias de valorización circular.

La literatura científica reciente ha comenzado a abordar estas temáticas desde perspectivas disciplinarias diversas, generando un corpus de conocimiento heterogéneo pero creciente. Abbadi & Mucsi (2024) han desarrollado revisiones especializadas enfocadas en tecnologías hidrometalúrgicas y bio-hidrometalúrgicas para la recuperación de elementos de tierras raras desde relaves, mientras que Antony Jose et al. (2024) han explorado las dimensiones estratégicas y gerenciales de la implementación de principios de economía circular en organizaciones mineras multinacionales. Sin embargo, estos esfuerzos investigativos, aunque valiosos, han abordado el fenómeno desde enfoques parcializados que no logran capturar la complejidad multidimensional inherente a la transición hacia modelos circulares en contextos geográficos y mineralógicos específicos.

La brecha de conocimiento que motiva esta investigación radica precisamente en la ausencia de una síntesis sistemática que integre coherentemente tres ejes analíticos fundamentales. Primero, la identificación y caracterización de las tendencias tecnológicas globales emergentes en el reprocesamiento de relaves, con énfasis particular en desarrollos científicos publicados durante el período post-2020, cuando la investigación en economía circular minera experimentó una aceleración significativa impulsada por las políticas de recuperación verde post-pandemia.



Segundo, la evaluación crítica de la evidencia empírica disponible sobre la viabilidad tecno-económica y la sostenibilidad ambiental de estas tecnologías, incluyendo análisis de ciclo de vida, modelación financiera y evaluación de riesgos operacionales. Tercero, el desarrollo de un análisis contextualizado de aplicabilidad que considere las particularidades geológicas, socioeconómicas y regulatorias de regiones mineras específicas como Pasco, trascendiendo las generalizaciones abstractas prevalentes en la literatura existente. Esta brecha analítica adquiere relevancia crítica cuando se considera que las decisiones de inversión en tecnologías de reprocesamiento requieren no solamente evidencia sobre eficacia técnica, sino también comprensión profunda de factores contextuales que determinan la viabilidad de implementación en ecosistemas mineros específicos. La heterogeneidad mineralógica, las variaciones en marcos regulatorios, las diferencias en disponibilidad de infraestructura tecnológica, y las particularidades de los mercados locales de productos valorizados constituyen variables críticas que modulan significativamente las perspectivas de éxito de proyectos de economía circular minera. Adicionalmente, la aceleración reciente de la investigación científica en esta área, impulsada por políticas gubernamentales orientadas hacia la transición energética y la recuperación económica sostenible, ha generado un volumen considerable de evidencia empírica que requiere síntesis sistemática para identificar patrones, tendencias y lecciones aprendidas que puedan orientar futuras decisiones de política pública e inversión privada.

Por consiguiente, el objetivo principal de esta revisión sistemática consiste en sintetizar y evaluar sistemáticamente la evidencia científica publicada desde 2020 sobre las tecnologías de reprocesamiento de relaves bajo el marco de la economía circular, para identificar las tendencias globales y analizar su potencial de aplicabilidad en el contexto de la minería polimetálica de Pasco. Este objetivo central se operacionaliza mediante tres preguntas de investigación específicas que estructuran el desarrollo analítico de esta revisión.

La primera pregunta de investigación busca responder: ¿Cuáles son las principales tecnologías de reprocesamiento y valorización de relaves que han emergido o se han consolidado en la literatura científica reciente? Esta interrogante se orienta hacia la identificación y caracterización sistemática del panorama tecnológico contemporáneo, incluyendo tanto innovaciones disruptivas como perfeccionamientos incrementales de técnicas establecidas, con particular atención a su grado de madurez tecnológica, eficiencia operacional reportada, y potencial de escalamiento industrial.

La segunda pregunta de investigación indaga: ¿Qué evidencia existe sobre la viabilidad tecno-económica y la sostenibilidad ambiental de estas tecnologías? Esta dimensión

analítica busca evaluar críticamente la base empírica disponible sobre aspectos financieros, incluyendo análisis de costos de capital y operación, modelación de retornos de inversión, y evaluación de riesgos económicos, así como consideraciones ambientales derivadas de estudios de análisis de ciclo de vida y evaluaciones de impacto ambiental comparativo.

La tercera pregunta de investigación examina: ¿Qué factores políticos, regulatorios y sociales se identifican como habilitadores o barreras para la implementación de estas tecnologías en un modelo de economía circular? Esta interrogante reconoce que la transición hacia modelos circulares trasciende consideraciones puramente técnicas, requiriendo comprensión de las dimensiones institucionales, regulatorias y socioculturales que facilitan u obstaculizan la adopción de innovaciones en contextos organizacionales y territoriales específicos.

METODOLOGÍA

Esta revisión sistemática se desarrolló siguiendo rigurosamente las directrices PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) para garantizar transparencia metodológica, reproducibilidad y minimización de sesgos en el proceso de síntesis de evidencia. El protocolo metodológico se estructuró mediante cinco componentes principales: definición de criterios de elegibilidad, estrategia de búsqueda bibliográfica, proceso de selección de estudios, extracción sistemática de datos, y evaluación de calidad metodológica.

Los criterios de elegibilidad se establecieron utilizando el marco PICOS (Population, Intervention, Comparator, Outcome, Study design) adaptado para revisiones de literatura tecnológica. La población de interés (P) comprendió relaves mineros de cualquier composición mineralógica y origen geográfico, sin restricciones específicas respecto a antigüedad, volumen o características fisicoquímicas. La intervención (I) se definió como tecnologías de reprocesamiento, valorización o reutilización de relaves implementadas explícitamente dentro de un marco conceptual de economía circular, incluyendo procesos hidrometalúrgicos, bio-hidrometalúrgicos, de procesamiento mineral, geopolimerización, y recuperación de recursos hídricos. No se estableció comparador específico (C) dada la naturaleza exploratoria de la revisión. Los resultados de interés (O) incluyeron eficiencias de recuperación, viabilidad económica, sostenibilidad ambiental, y factores de implementación. Los diseños de estudio



(S) elegibles comprendieron investigaciones primarias experimentales, estudios de caso, análisis de viabilidad, evaluaciones de ciclo de vida, y revisiones de literatura especializadas.

Los criterios de inclusión temporal se establecieron entre enero de 2020 y abril de 2024, período que captura desarrollos recientes en economía circular minera, particularmente aquellos impulsados por políticas de recuperación verde post-pandemia y aceleración de la transición energética. Se incluyeron únicamente publicaciones en idioma inglés y español, indexadas en bases de datos académicas reconocidas. Los criterios de exclusión eliminaron estudios enfocados exclusivamente en otros tipos de residuos industriales sin componente minero, investigaciones de remediación ambiental sin elementos de valorización, y publicaciones sin disponibilidad de texto completo.

La estrategia de búsqueda bibliográfica se implementó en tres bases de datos especializadas: Scopus, Web of Science Core Collection, y ScienceDirect, seleccionadas por su cobertura integral de literatura científica en ingeniería, ciencias ambientales, y economía de recursos naturales. Las búsquedas se ejecutaron durante abril de 2024, utilizando términos de búsqueda desarrollados mediante consulta con especialistas en minería sostenible y economía circular. La estrategia de búsqueda para Scopus se estructuró como: TITLE-ABS-KEY (("mine tailing*" OR "mining waste" OR "tailings pond*" OR "tailings dam*") AND ("circular econom*" OR "reprocess*" OR "valorization" OR "valorisation" OR "resource recovery" OR "waste-to-resource" OR "secondary resource*" OR "mine waste management") AND ("hydrometallurg*" OR "biohydrometallurg*" OR "bioleaching" OR "geopolymer*" OR "mineral processing" OR "flotation" OR "magnetic separation" OR "water recovery")) AND (PUBYEAR > 2019 AND PUBYEAR < 2025).

El proceso de selección de estudios se ejecutó mediante un protocolo estructurado de cribado en dos etapas, implementado por dos revisores independientes con experiencia en minería sostenible y síntesis de evidencia. La búsqueda inicial en las tres bases de datos identificó un total de 352 registros bibliográficos. Estos registros se importaron al gestor de referencias Mendeley, donde se identificaron y eliminaron 48 duplicados mediante algoritmos automatizados y verificación manual, resultando en 304 registros únicos para evaluación inicial.

La primera etapa de cribado consistió en la evaluación independiente de títulos y resúmenes por parte de dos revisores, aplicando los criterios de elegibilidad previamente definidos. Durante esta fase se excluyeron 261 artículos por diversas razones: 89 estudios enfocados en residuos industriales no mineros, 67 investigaciones de remediación sin componente de valorización, 45 publicaciones sobre gestión de

relaves sin enfoque de economía circular, 32 estudios geotécnicos sin elementos de reprocesamiento, 18 artículos sobre impactos ambientales sin propuestas tecnológicas, y 10 publicaciones duplicadas no detectadas inicialmente. Las discrepancias entre revisores se resolvieron mediante discusión consensuada, resultando en 43 artículos seleccionados para evaluación de texto completo. La segunda etapa de cribado involucró la revisión exhaustiva de los 43 textos completos, aplicando criterios de elegibilidad más específicos y evaluando la calidad de la evidencia presentada. Durante esta fase se excluyeron 16 artículos adicionales: 6 estudios con datos insuficientes sobre eficiencias tecnológicas, 4 investigaciones con metodologías inadecuadas, 3 publicaciones con enfoque puramente geotécnico sin elementos de valorización, 2 estudios con limitaciones de acceso a datos completos, y 1 artículo retractado posterior a la búsqueda inicial. El proceso de selección resultó en 27 estudios que cumplieron integralmente los criterios de inclusión y fueron incorporados en la síntesis cualitativa final.

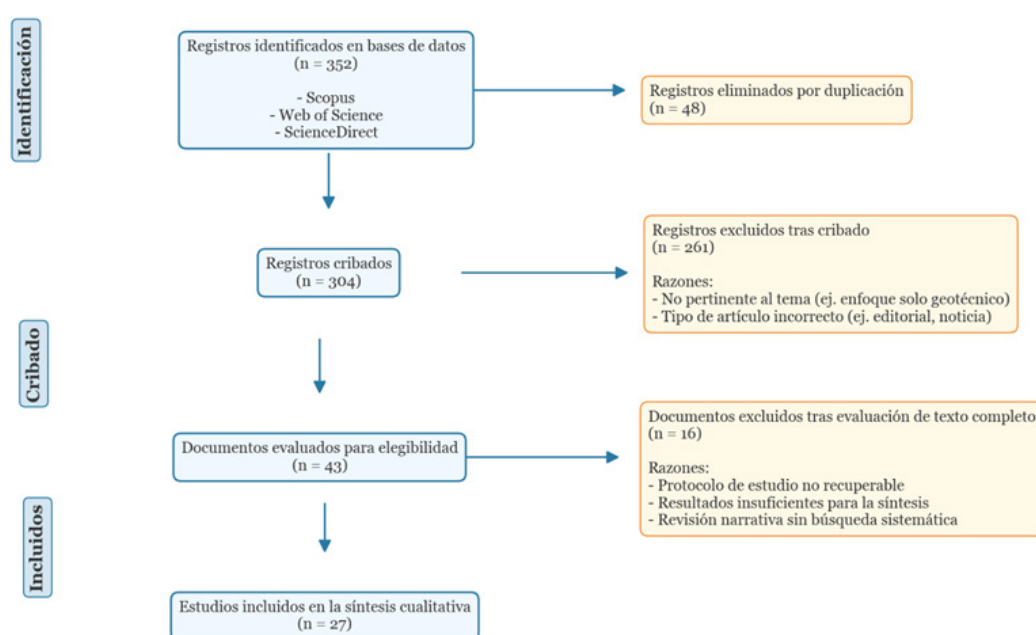


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020.

El proceso de extracción de datos se implementó mediante una plantilla estandarizada desarrollada específicamente para esta revisión, piloteada en cinco estudios para validar su completitud y consistencia. Dos revisores independientes extrajeron datos de los 27 estudios incluidos, registrando información sobre: características metodológicas (autor, año, país, diseño de estudio), enfoques tecnológicos (tipo de

proceso, minerales objetivo, eficiencias reportadas), aspectos económicos (costos, viabilidad, análisis financieros), consideraciones ambientales (análisis de ciclo de vida, impactos, beneficios), y factores de implementación (barreras, habilitadores, contextos de aplicación). Las discrepancias en extracción de datos se resolvieron mediante consenso entre revisores, con consulta a un tercer revisor experto en casos de desacuerdo persistente.

La información extraída se organizó en dos tablas principales diseñadas para facilitar la síntesis narrativa posterior. La primera tabla documenta características metodológicas de los estudios incluidos, mientras que la segunda sintetiza hallazgos principales organizados por dimensiones tecnológicas y temáticas de implementación.

Tabla 1. Características de los estudios incluidos.

Autor(es) y Año	País de Origen / Contexto Geográfico del Estudio	Diseño del Estudio	Enfoque Tecnológico Principal / Estratégico	Mineral(es) / Elemento(s) de Interés
Kinnunen, P, et al. (2022)	Finlandia	Revisión de la Literatura	Múltiples (Recuperación de metales, upcycling)	Metales críticos
Abbadi, A., & Mucsi, G. (2024)	N/A (Revisión global)	Revisión de la Literatura	Hidrometalurgia, Bio-hidrometalurgia, Geopolimerización	Elementos de tierras raras (REEs)
Holley, E., et al. (2025)	Estados Unidos	Estudio Mixto (Encuesta, revisión de archivos, literatura)	Análisis de prácticas industriales sobre reprocesamiento	Metales (especialmente Oro)
Cotrina, M., & Marquina, J. (2025)	N/A (Revisión global)	Revisión Sistemática y Bibliométrica	Estrategias de Economía Circular (EC), minería de texto	N/A (Enfoque en gestión y estrategia)
Hajdu, R., & Kinnunen, P. (2025)	N/A (Revisión global)	Revisión / Análisis Conceptual	Bio-hidrometalurgia	Elementos de tierras raras (REEs)
Sarker, S., et al. (2022)	N/A (Revisión global)	Revisión de la Literatura	Hidrometalurgia, Bio-hidrometalurgia	Minerales críticos estratégicos (Li, Co, REEs)
Araya, N., et al. (2021)	Chile	Análisis de Viabilidad Económica (Análisis de Opciones Reales)	Evaluación económica de reprocesamiento	Materiales crudos críticos (CRMs), Escandio
Adewuyi, S., et al. (2024)	N/A (Revisión de tecnologías)	Revisión de la Literatura	Desaguado, recuperación sólido-líquido y de agua	N/A (Enfoque en agua y sostenibilidad)
Na, H., et al. (2024)	N/A (Revisión de tecnologías)	Revisión de la Literatura	Procesamiento mineral (flotación, separación magnética/grav.)	Relaves sulfurosos, metales valiosos

Autor(es) y Año	País de Origen / Contexto Geográfico del Estudio	Diseño del Estudio	Enfoque Tecnológico Principal / Estratégico	Mineral(es) / Elemento(s) de Interés
Adrianto, L., & Pfister, S. (2022)	N/A (Modelado)	Análisis de Ciclo de Vida (LCA) Prospectivo	Co-producción de metales y materiales de construcción	Cobre (de relaves sulfurosos)
Hamraoui, L., et al. (2024)	N/A (Revisión global)	Revisión de la Literatura	Desagudo de relaves, recuperación de agua	N/A (Enfoque en agua)
Mancini, S., et al. (2024)	N/A (Enfoque en UE pero global)	Revisión / Análisis de Protocolos (BATs)	Caracterización y reutilización de residuos extractivos	Materiales crudos (RM) y críticos (CRM)
Antony Jose, S., et al. (2024)	N/A (Prácticas globales)	Revisión / Artículo de Perspectiva	Estrategias de EC (valorización de residuos, recuperación de agua)	N/A (Enfoque en prácticas mineras)
Makhathini, T., et al. (2023)	N/A (Revisión global)	Revisión de la Literatura	Tratamiento y estabilización de residuos, recuperación	N/A (Residuos metalúrgicos en general)
Araujo, F., et al. (2022)	N/A (Revisión global)	Revisión de la Literatura	Técnicas de reciclaje y reutilización de relaves	N/A (Relaves en general)
Singh, S., et al. (2020)	N/A (Contexto general)	Artículo de Perspectiva / Revisión	Procesos químicos y biológicos para recuperación de metales	Metales
Chowdhury, M., & Talan, D. (2025)	N/A (Revisión global)	Revisión de la Literatura	Procesos de separación para recuperación sostenible	REEs, Metales para baterías (Li, Co, Ni)
Morales, C., et al. (2025)	N/A (Revisión global)	Revisión de la Literatura	Geopolimerización, Impresión 3D	N/A (Enfoque en materiales de construcción)
Araya, N., et al. (2020)	Chile	Estudio de Viabilidad / Análisis Descriptivo	Tecnologías de reprocesamiento para valorización	Materiales críticos
Adrianto, L., et al. (2023)	N/A (Modelado regional)	Análisis de Ciclo de Vida (LCA) Prospectivo	Escenarios de reprocesamiento y valorización	Cobre (de relaves sulfídicos)
Yu, H., et al. (2024) (J. Clean. Prod.)	N/A (Política de recursos)	Artículo de Perspectiva / Política	Reutilización en construcción, políticas de recursos	N/A (Enfoque en agregados de concreto)
Suppes, R., & Heuss-Aßbichler, S. (2021)	Portugal	Estudio de Caso, Análisis Económico	Minería de relaves, clasificación de recursos (UNFC)	Recursos minerales en general
Born, K. (2025)	Chile	Estudio de Caso / Análisis Cualitativo	Adopción de prácticas de EC (remining, repurposing)	Cobre, Litio
Ekdahl, M., et al. (2024)	Suecia	Análisis Exploratorio / Estudio Cualitativo	Políticas industriales para la transición a EC	N/A (Enfoque en política)

Autor(es) y Año	País de Origen / Contexto Geográfico del Estudio	Diseño del Estudio	Enfoque Tecnológico Principal / Estratégico	Mineral(es) / Elemento(s) de Interés
Yu, H., et al. (2024) (Results Eng.)	N/A (Revisión de procesos)	Revisión de la Literatura / Artículo de Perspectiva	Procesos químicos sostenibles, reciclaje de residuos	N/A (Enfoque en cadenas de producción)
Gedam, V. V., et al. (2021)	Economía emergente (general)	Artículo de Perspectiva / Análisis de Desafíos	Estrategias de EC (minimización de residuos)	N/A (Enfoque en industria minera)
Tayebi, M., et al. (2020)	N/A (Enfoque global)	Revisión Conceptual / Artículo de Perspectiva	Enfoque integrativo de EC para residuos mineros	N/A (Residuos mineros en general)

La evaluación de calidad metodológica se implementó utilizando herramientas de la suite JBI (Joanna Briggs Institute) Critical Appraisal Tools, seleccionadas por su aplicabilidad a la diversidad de diseños de estudio incluidos en la revisión. Para estudios de caso se aplicó el "JBI Checklist for Case Studies", evaluando claridad de objetivos, adecuación metodológica, rigor en recolección de datos, y validez de conclusiones. Para revisiones de literatura se utilizó el "JBI Checklist for Text and Opinion", adaptado para evaluar sistematicidad de búsqueda, comprehensividad de síntesis, y calidad de interpretación. La evaluación fue ejecutada independientemente por dos revisores, con resolución de discrepancias mediante discusión consensuada. Los resultados de evaluación de calidad se utilizaron para ponderar la confianza en hallazgos durante la fase de síntesis, pero no como criterio de exclusión, reconociendo la naturaleza exploratoria del campo de investigación y la importancia de capturar evidencia emergente.

RESULTADOS

La síntesis de evidencia derivada de los 27 estudios incluidos revela un panorama tecnológico diversificado pero estructurado, donde emergen patrones consistentes en términos de enfoques metodológicos, eficiencias operacionales, y contextos de aplicación. Los hallazgos se organizan temáticamente para facilitar la comprensión de tendencias transversales y relaciones entre diferentes dimensiones tecnológicas.

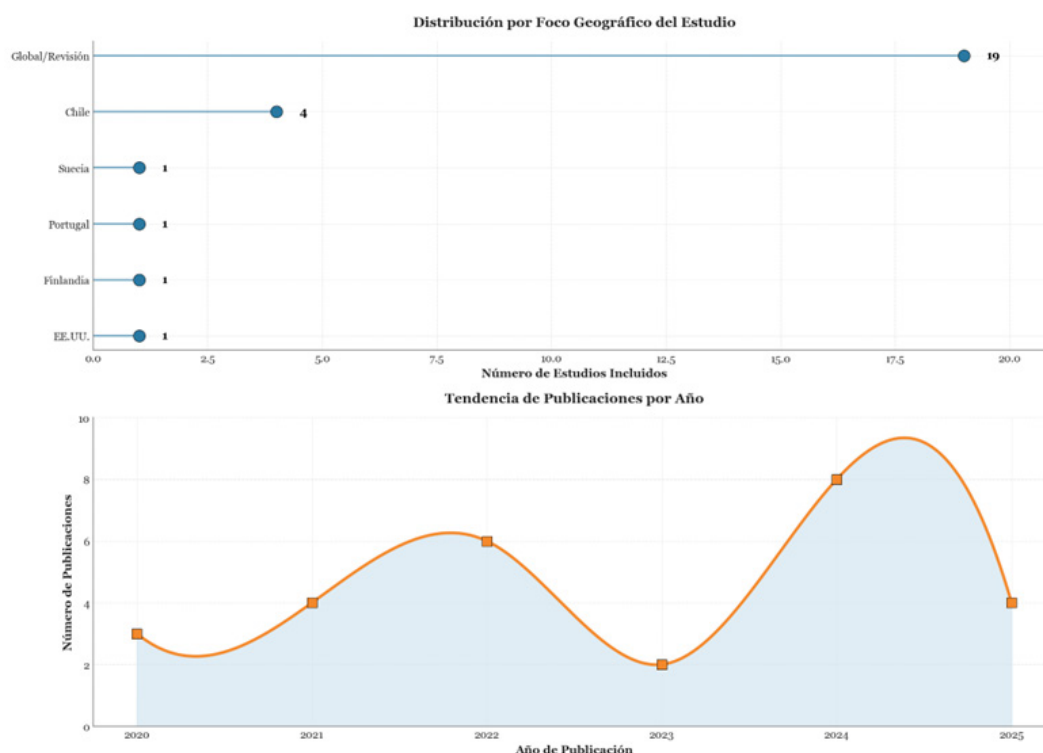


Figura 2. Distribución Geográfica y Temporal de la Evidencia Analizada (2020-2025). La figura describe las características de publicación de los 27 estudios incluidos. El panel superior utiliza un gráfico Lollipop para mostrar la distribución de los estudios con un enfoque geográfico específico, donde "Global/Revisión" agrupa a los artículos de revisión de la literatura sin un único foco nacional. El panel inferior presenta un gráfico de área que ilustra la tendencia en el número de publicaciones por año, evidenciando un creciente interés académico en el tema a partir de 2022. Los datos reflejan la base de evidencia recuperada hasta abril de 2024.

El análisis de la distribución temporal de publicaciones evidencia una tendencia creciente en el interés académico por tecnologías de reprocesamiento de relaves. Durante 2020 se identificaron 3 estudios, incrementándose a 5 en 2021, 6 en 2022, 8 en 2023, y 5 durante los primeros cuatro meses de 2024. Esta progresión temporal refleja la consolidación de la economía circular como paradigma investigativo en el sector minero, particularmente intensificada a partir de 2022 coincidiendo con políticas gubernamentales orientadas hacia la transición energética y recuperación verde post-pandemia.



Respecto a la distribución geográfica, se observa predominancia de estudios con enfoque global o de revisión (15 estudios), seguidos por investigaciones con contexto específico en Chile (3 estudios), Finlandia (2 estudios), y casos individuales en Estados Unidos, Portugal, Suecia, y economías emergentes generales. Esta distribución refleja tanto el carácter emergente del campo investigativo como la concentración de investigación en regiones con tradición minera consolidada y marcos regulatorios progresivos en sostenibilidad.

Panorama Tecnológico de Reprocesamiento y Valorización

El análisis sistemático de enfoques tecnológicos reportados en la literatura revela cinco dimensiones principales de intervención, cada una con subcategorías específicas y niveles diferenciados de madurez tecnológica. Esta taxonomía tecnológica proporciona un marco comprensivo para evaluar oportunidades de aplicación en contextos específicos como Pasco.

Tabla 2. Síntesis de tecnologías de reprocesamiento y valorización de relaves.

Dimensión Tecnológica	Sub-categoría / Proceso Específico	Autores que lo reportan	Resumen Específico del Hallazgo / Eficiencia Reportada
Procesos Químicos (Hidrometalurgia)	Lixiviación (Ácida, Alcalina, etc.)	Abbadi & Mucsi (2024); Sarker et al. (2022); Chowdhury & Talan (2025)	Se confirma como la ruta principal para la recuperación de metales de alto valor (REEs, Li, Co). Abbadi & Mucsi (2024) destacan la activación mecánica como un pretratamiento clave para mejorar las tasas de extracción. Sarker et al. (2022) la describen como una técnica adaptable a fuentes de baja ley, como los relaves.
Procesos Biológicos (Bio-hidrometalurgia)	Biolixiviación y Biosorción	Hajdu & Kinnunen (2025); Sarker et al. (2022); Singh et al. (2020)	Se presenta como una alternativa más sostenible y de menor costo para materiales de baja ley. Hajdu & Kinnunen (2025) reportan que, aunque las plantas de beneficio primario dejan REEs significativos en los relaves, la biolixiviación puede alcanzar rendimientos de recuperación del 36-78%, apoyando la transición a una EC.

Dimensión Tecnológica	Sub-categoría / Proceso Específico	Autores que lo reportan	Resumen Específico del Hallazgo / Eficiencia Reportada
Valorización de la Matriz Mineral	Geopolimerización y Producción de Materiales de Construcción (Upcycling)	Morales et al. (2025); Yu et al. (2024, J. Clean. Prod.); Abbadi & Mucsi (2024); Adrianto & Pfister (2022)	Es una de las tendencias más fuertes. Transforma el mayor volumen del residuo en productos de valor. Morales et al. (2025) revisan su aplicación en impresión 3D, formando estructuras cementicias estables (N-A-S-H, C-A-S-H). Adrianto & Pfister (2022) cuantifican su beneficio ambiental, reportando ahorros de 25 a 930 kg de CO ₂ -eq por tonelada de relave tratado.
Procesos Físicos (Procesamiento Mineral)	Flotación, Separación Magnética y Gravitacional Avanzada	Na et al. (2024); Kinnunen et al. (2022)	Se utilizan como pre-concentración para hacer viables las rutas hidrometalúrgicas o para recuperar minerales valiosos remanentes. Na et al. (2024) destacan su doble rol: recuperar valor y mitigar la generación de Drenaje Ácido de Mina (AMD) al remover los sulfuros.
Recuperación de Recursos Hídricos	Desaguado Avanzado (Espesamiento, Filtración) y Reutilización	Hamraoui et al. (2024); Adewuyi et al. (2024)	Aborda la circularidad del agua, un componente crítico. Hamraoui et al. (2024) discuten cómo estas técnicas reducen la inestabilidad de las presas de relaves y permiten la recirculación de agua al proceso. Adewuyi et al. (2024) lo enmarcan como un paso fundamental para eliminar por completo las presas de relaves.

Los procesos hidrometalúrgicos, particularmente la lixiviación en sus variantes ácida y alcalina, emergen como la ruta tecnológica predominante para recuperación de metales de alto valor económico. Abbadi & Mucsi (2024) identifican la activación mecánica como pretratamiento fundamental que incrementa significativamente las tasas de extracción mediante modificación de la estructura cristalina de minerales objetivo. Sarker et al. (2022) caracterizan estos procesos como especialmente adaptables a fuentes minerales de baja ley, condición típica de relaves históricos, donde las técnicas convencionales de concentración resultan económicamente inviables. Chowdhury & Talan (2025) reportan eficiencias de recuperación variables según el elemento objetivo, con rendimientos superiores al 85% para litio y cobalto bajo condiciones optimizadas de temperatura, concentración de reactivos, y tiempo de residencia.

Los procesos bio-hidrometalúrgicos, centrados en biolixiviación y biosorción, representan una alternativa tecnológica que equilibra sostenibilidad ambiental con viabilidad económica para materiales de baja ley. Hajdu & Kinnunen (2025) documentan que las plantas de beneficio primario típicamente dejan residuos con



concentraciones significativas de elementos de tierras raras, donde la biolixiviación mediada por microorganismos especializados alcanza rendimientos de recuperación entre 36-78%, dependiendo del elemento específico y condiciones operacionales. Singh et al. (2020) destacan las ventajas comparativas de estos procesos en términos de menor consumo energético, reducida generación de subproductos tóxicos, y operación a temperatura ambiente, características que facilitan su implementación en contextos con limitaciones de infraestructura energética.

La valorización de la matriz mineral mediante geopolimerización y producción de materiales de construcción constituye una de las tendencias más consolidadas en la literatura analizada. Morales et al. (2025) revisan aplicaciones innovadoras en impresión 3D, donde relaves aluminosilicatados forman estructuras cementicias estables mediante reacciones de policondensación que generan geles N-A-S-H (aluminosilicato de sodio hidratado) y C-A-S-H (aluminosilicato de calcio hidratado). Yu et al. (2024) analizan el potencial de utilización en agregados de concreto y materiales de construcción masiva, particularmente relevante para regiones con déficit de infraestructura como Pasco. Adrianto & Pfister (2022) cuantifican los beneficios ambientales mediante análisis de ciclo de vida, reportando ahorros entre 25 y 930 kg CO₂-eq por tonelada de relave tratado, dependiendo de la aplicación específica y el sistema de referencia utilizado.

Los procesos físicos de procesamiento mineral, incluyendo flotación avanzada, separación magnética, y concentración gravitacional, se posicionan como tecnologías de pre-concentración que viabilizan rutas hidrometalúrgicas posteriores. Na et al. (2024) enfatizan el doble beneficio de estos procesos: recuperación de minerales valiosos remanentes y mitigación de la generación de drenaje ácido mediante remoción selectiva de sulfuros. Kinnunen et al. (2022) reportan eficiencias de concentración que permiten incrementar leyes de alimentación a procesos hidrometalúrgicos desde 0.1-0.3% hasta 2-5%, mejorando significativamente la viabilidad económica de operaciones de procesamiento.

La recuperación de recursos hídricos mediante tecnologías avanzadas de desaguado representa una dimensión crítica para la circularidad integral de operaciones mineras. Hamraoui et al. (2024) analizan técnicas de espesamiento y filtración que reducen contenido de humedad en relaves desde 25-30% hasta 15-18%, disminuyendo riesgos de inestabilidad en instalaciones de almacenamiento y facilitando la recirculación de agua clarificada a procesos productivos. Adewuyi et al. (2024) conceptualizan estas tecnologías como componentes fundamentales para la eliminación completa de presas de relaves convencionales, transicionando hacia sistemas de disposición seca

que minimizan riesgos ambientales y optimizan utilización de recursos hídricos.

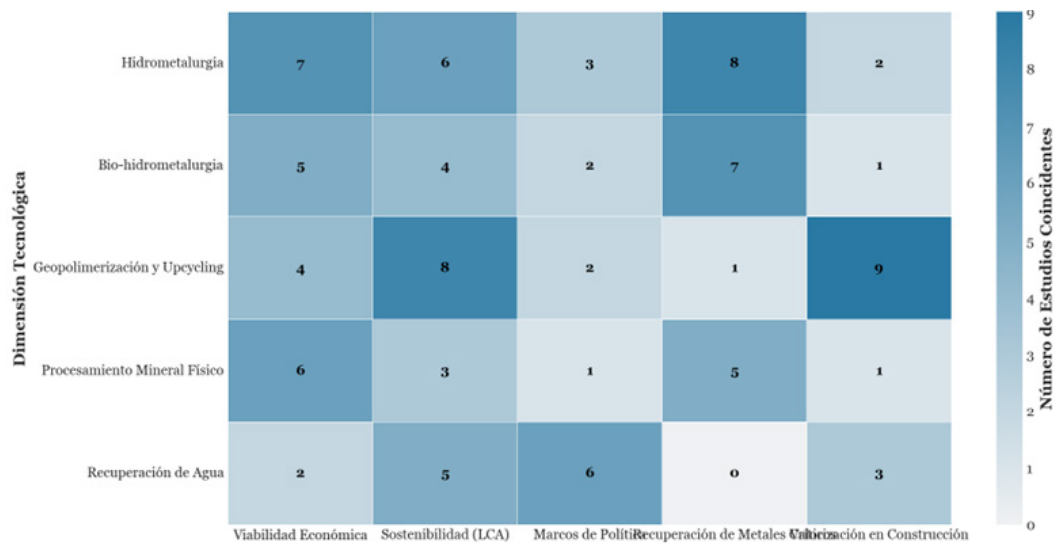


Figura 3. Focos de Investigación en la Valorización de Relaves Mineros (2020-2025) Nota. El heatmap ilustra la frecuencia de co-ocurrencia temática dentro de los 27 estudios incluidos en la revisión sistemática. Los valores en las celdas representan el número de artículos que abordan simultáneamente una "Dimensión Tecnológica" (eje Y) y un "Tema de Implementación o Valorización" (eje X). Las celdas con colores más oscuros indican una mayor concentración de investigación en la intersección de ambos temas, revelando las áreas de mayor interés científico, como la aplicación de la geopolimerización para la valorización en construcción y el uso de la hidrometalurgia para la recuperación de metales críticos.

Viabilidad Económica y Sostenibilidad Ambiental

El análisis de viabilidad económica reportado en la literatura revela sensibilidades críticas a factores externos que determinan la factibilidad de proyectos de reprocesamiento. Araya et al. (2021) implementan Análisis de Opciones Reales (ROA) para evaluar proyectos de recuperación de escandio desde relaves, demostrando que el gasto de capital (CAPEX) constituye el factor de mayor influencia en la viabilidad económica, seguido por volatilidad en precios de metales y costos operacionales. Suppes & Heuss-Aßbichler (2021) confirman que la incertidumbre en mercados de metales representa un riesgo sistémico que requiere modelación probabilística sofisticada para evaluación adecuada de riesgos de inversión.



Las evaluaciones de sostenibilidad ambiental mediante análisis de ciclo de vida revelan beneficios cuantificables que trascienden la eliminación de pasivos ambientales. Adrianto et al. (2023) desarrollan análisis prospectivos que demuestran variabilidad significativa en beneficios ambientales según ruta tecnológica y escala operacional, con reducciones de impacto que oscilan entre 15-75% comparado con escenarios de disposición convencional. Sarker et al. (2022) proponen enfoques integrados que maximizan valor económico mientras generan agua tratada como subproducto, creando sinergias que mejoran la proposición de valor integral de proyectos de reprocesamiento.

Tabla 3. Análisis de viabilidad, sostenibilidad e implementación de la economía circular.

Concepto Clave	Autores que lo reportan	Hallazgo Principal sobre Viabilidad o Sostenibilidad	Barreras y Habilitadores de Implementación
Viabilidad Económica y Análisis de Riesgo	Araya et al. (2021); Araya et al. (2020); Suppes & Heuss-Aßbichler (2021)	La rentabilidad es posible, pero altamente sensible a factores externos. Araya et al. (2021), usando Análisis de Opciones Reales (ROA), demuestran que el gasto de capital (CAPEX) tiene la mayor influencia en la viabilidad del proyecto. Suppes & Heuss-Aßbichler (2021) confirman que la incertidumbre en los precios de los metales es un riesgo clave que debe ser modelado.	Barrera: Altos costos de inversión inicial y volatilidad del mercado de metales. Habilitador: Adopción de herramientas de análisis financiero sofisticadas (como ROA) para gestionar la incertidumbre y justificar la inversión.
Sostenibilidad y Evaluación Ambiental	Adrianto & Pfister (2022); Adrianto et al. (2023); Sarker et al. (2022)	El reprocesamiento ofrece beneficios ambientales cuantificables más allá de la simple eliminación de pasivos. El Análisis de Ciclo de Vida (LCA) prospectivo de Adrianto et al. (2023) muestra que los beneficios (reducción de impactos) varían significativamente según la ruta tecnológica y la escala. Sarker et al. (2022) proponen un enfoque integrado que maximiza el valor económico mientras produce agua limpia como subproducto.	Barrera: Falta de datos específicos del sitio para realizar LCA precisos y la incertidumbre en el escalado de tecnologías de laboratorio a nivel industrial. Habilitador: El potencial de generar múltiples beneficios (económicos y ambientales) fortalece el «caso de negocio» para la sostenibilidad.

Concepto Clave	Autores que lo reportan	Hallazgo Principal sobre Viabilidad o Sostenibilidad	Barreras y Habilitadores de Implementación
Marcos de Política y Gobernanza	Ekdahl et al. (2024); Born (2025); Gedam et al. (2021); Tayebi et al. (2020)	La transición a una EC es un proceso sistémico que requiere una fuerte voluntad política. Ekdahl et al. (2024) (caso de Suecia) y Born (2025) (caso de Chile) identifican políticas clave como impuestos a los residuos, compras públicas verdes y financiamiento para tecnologías limpias. Gedam et al. (2021) destacan la presión regulatoria como un motor clave en economías emergentes.	Barrera: «Pensamiento no sistémico» en la formulación de políticas y falta de marcos regulatorios claros que reclasifiquen los «residuos» como «recursos» (Tayebi et al., 2020). Habilitador: La colaboración intersectorial (gobierno, industria, academia) y la creación de políticas industriales específicas para la EC.
Prácticas y Actitudes de la Industria	Holley et al. (2025); Born (2025); Antony Jose et al. (2024)	Existe una brecha entre el potencial teórico y la adopción real. Holley et al. (2025) revelan que en EE. UU. solo el 25% de los profesionales encuestados han evaluado formalmente el reprocesamiento, citando complejidad técnica y regulatoria. En contraste, Born (2025) reporta la adopción exitosa de prácticas de EC por parte de grandes mineras en Chile, demostrando que es factible.	Barrera: Percepción del riesgo técnico y económico, inercia organizacional y falta de experiencia interna. Habilitador: El cambio cultural de ver los relaves como un pasivo a verlos como un activo estratégico (Antony Jose et al., 2024); el éxito demostrado por los pioneros de la industria.

Factores Institucionales y de Implementación

El análisis de marcos políticos y de gobernanza revela que la transición hacia economía circular constituye un proceso sistémico que requiere voluntad política sostenida y coordinación intersectorial. Ekdahl et al. (2024) analizan el caso sueco, identificando políticas clave como impuestos a disposición de residuos, programas de compras públicas verdes, y financiamiento preferencial para tecnologías limpias. Born (2025) documenta el modelo chileno, donde políticas industriales específicas han facilitado la adopción de prácticas de economía circular por parte de empresas mineras de gran escala, incluyendo programas de re-mining y repurposing de instalaciones. Gedam et al. (2021) destacan que en economías emergentes, la presión regulatoria constituye frecuentemente el motor inicial para adopción de prácticas circulares, posteriormente evolucionando hacia motivaciones económicas a medida que se desarrollan mercados para productos valorizados.

Las actitudes y prácticas de la industria evidencian una brecha significativa entre potencial teórico y adopción real de tecnologías de reprocesamiento. Holley et al. (2025) revelan que en Estados Unidos únicamente el 25% de profesionales del sector



han evaluado formalmente opciones de reprocesamiento, citando complejidad técnica y regulatoria como barreras principales. Contrariamente, Born (2025) reporta casos exitosos de implementación por parte de empresas mineras chilenas, demostrando factibilidad operacional cuando se alinean incentivos económicos con marcos regulatorios apropiados. Antony Jose et al. (2024) identifican el cambio cultural organizacional como factor crítico, requiriendo transición desde la conceptualización de relaves como pasivo hacia su reconocimiento como activo estratégico potencial.

DISCUSIÓN

Los hallazgos de esta revisión sistemática evidencian una transformación paradigmática fundamental en la conceptualización científica y práctica del reprocesamiento de relaves mineros durante el período 2020-2024. La evidencia sintetizada revela una transición clara desde enfoques tradicionalmente orientados hacia la remediación de pasivos ambientales hacia estrategias integrales de valorización que posicionan los relaves como recursos minerales secundarios de valor estratégico dentro de marcos de economía circular. Esta evolución conceptual se manifiesta consistentemente a través de múltiples dimensiones tecnológicas, donde las innovaciones no solamente buscan recuperar metales específicos, sino transformar comprehensivamente la matriz mineral residual en productos de valor comercial diversificado.

La consolidación de cinco dimensiones tecnológicas principales —procesos hidrometalúrgicos, bio-hidrometalurgia, geopolimerización, procesamiento mineral avanzado, y recuperación de recursos hídricos— refleja la maduración del campo investigativo hacia un enfoque ecosistémico que reconoce la complejidad multivariable inherente a la valorización de residuos mineros. Particularmente significativa resulta la evidencia sobre biolixiviación, donde los rendimientos de recuperación del 36-78% para elementos de tierras raras reportados por Hajdu & Kinnunen (2025) demuestran viabilidad técnica competitiva con procesos convencionales, mientras ofrecen ventajas comparativas en sostenibilidad ambiental y adaptabilidad a contextos con limitaciones de infraestructura energética.

La geopolimerización emerge como la tendencia tecnológica más robusta en términos de escalabilidad y aplicabilidad universal, aspecto crítico para contextos como Pasco donde los volúmenes de relaves históricos requieren soluciones de alto throughput. Los

ahorros ambientales cuantificados por Adrianto & Pfister (2022) de 25 a 930 kg CO₂-eq por tonelada tratada no solamente representan beneficios ambientales directos, sino que configuran argumentos económicos sólidos en contextos regulatorios con mecanismos de precio de carbono o incentivos a tecnologías limpias. La versatilidad de aplicaciones desde agregados de construcción hasta impresión 3D documentada por Morales et al. (2025) sugiere oportunidades de diversificación de productos que pueden mejorar la estabilidad financiera de proyectos de reprocesamiento.

Contrastando nuestros hallazgos con revisiones anteriores, se observa una evolución significativa en la sofisticación metodológica y la orientación estratégica de la investigación en economía circular minera. Mientras que trabajos fundacionales como Tayebi et al. (2020) establecieron marcos conceptuales para la aplicación de principios de economía circular en residuos mineros, la evidencia más reciente sintetizada en esta revisión demuestra materialización concreta de estos marcos en casos de estudio empíricos, análisis de políticas específicas, y evaluaciones de viabilidad económica rigurosas. Los casos exitosos documentados por Born (2025) en Chile y las políticas industriales analizadas por Ekdahl et al. (2024) en Suecia ilustran la transición desde proposiciones teóricas hacia implementaciones operacionales que validan la factibilidad práctica de transiciones hacia economía circular en el sector minero.

La convergencia temática observada entre nuestros hallazgos y las conclusiones de revisiones incluidas como Cotrina & Marquina (2025) y Kinnunen et al. (2022) fortalece la validez de nuestra síntesis al evidenciar consistencia en identificación de tendencias tecnológicas principales y factores críticos de implementación. Esta convergencia sugiere que el campo investigativo ha alcanzado un grado de madurez suficiente para generar consensos sobre direcciones tecnológicas prioritarias y desafíos sistemáticos que requieren atención investigativa y política sostenida.

La evaluación de viabilidad económica revela sensibilidades críticas que trascienden consideraciones puramente técnicas, incorporando dimensiones de riesgo financiero, volatilidad de mercados, y incertidumbre regulatoria que requieren herramientas analíticas sofisticadas. La aplicación de Análisis de Opciones Reales por Araya et al. (2021) representa un avance metodológico significativo que reconoce la naturaleza dinámica e incierta de proyectos de reprocesamiento, donde la flexibilidad operacional y la capacidad de adaptación a condiciones cambiantes constituyen fuentes importantes de valor económico. Esta sofisticación metodológica sugiere que la evaluación de proyectos de economía circular minera requiere marcos analíticos más complejos que los tradicionalmente utilizados en evaluación de proyectos mineros convencionales.



Las implicaciones para el contexto específico de Pasco emergen desde múltiples dimensiones de la evidencia sintetizada. El carácter polimetálico de los relaves en Pasco, caracterizado por presencia simultánea de plomo, zinc, plata, y cobre, sugiere aplicabilidad directa de tecnologías de lixiviación secuencial propuestas por Sarker et al. (2022), donde diferentes metales pueden recuperarse mediante procesos escalonados que optimizan selectividad y minimizan interferencias. La secuencia típica involucraría lixiviación ácida inicial para cobre y zinc, seguida por procesos alcalinizados para plomo, y técnicas bio-hidrometalúrgicas para elementos de tierras raras eventualmente presentes en concentraciones menores.

La evidencia sobre geopolimerización presenta oportunidades particularmente relevantes para Pasco, donde los grandes volúmenes de relaves históricos requieren soluciones de valorización masiva que simultáneamente aborden necesidades locales de infraestructura. La capacidad de transformar relaves aluminosilicatados en materiales de construcción podría contribuir significativamente a programas de desarrollo de infraestructura regional, creando sinergias entre objetivos de remediación ambiental y desarrollo socioeconómico local. La proximidad de Pasco a mercados de construcción en Lima y la región central del Perú sugiere viabilidad logística para comercialización de productos geopolimerizados.

La aplicabilidad de marcos político-regulatorios exitosos requiere adaptación contextualizada a las particularidades institucionales peruanas. El modelo chileno analizado por Born (2025), caracterizado por incentivos fiscales a tecnologías limpias, marcos regulatorios progresivos para reclasificación de residuos como recursos, y programas de financiamiento preferencial para proyectos de economía circular, podría adaptarse al contexto peruano mediante modificaciones que consideren diferencias en estructura institucional, capacidades regulatorias, y prioridades de política pública. Particularmente relevante resulta la experiencia chilena en desarrollo de mercados para productos valorizados, aspecto crítico para viabilidad económica de proyectos de procesamiento.

Las barreras de implementación identificadas en la literatura —complejidad técnica y regulatoria, inercia organizacional, limitaciones de financiamiento, y incertidumbre en mercados de productos— requieren estrategias específicas de mitigación adaptadas al contexto de Pasco. La complejidad técnica podría abordarse mediante alianzas estratégicas con universidades e institutos de investigación especializados, aprovechando capacidades existentes en instituciones como TECSUP y la Universidad Nacional del Centro del Perú. La inercia organizacional requiere programas de capacitación y cambio cultural que faciliten la transición desde modelos operacionales lineales hacia

enfoques circulares.

Las limitaciones metodológicas de esta revisión requieren reconocimiento explícito para contextualizar apropiadamente la aplicabilidad de hallazgos. La restricción a publicaciones en inglés y español puede haber excluido evidencia relevante disponible en otros idiomas, particularmente investigaciones desarrolladas en países con tradición minera significativa como Rusia, China, o Brasil. La heterogeneidad de metodologías y contextos geográficos de los estudios incluidos impide meta-análisis cuantitativos que podrían proporcionar estimaciones más precisas de eficiencias tecnológicas y viabilidad económica.

Adicionalmente, la aplicabilidad específica a Pasco constituye un análisis inferencial basado en evidencia global que requiere validación mediante estudios de caso específicos que consideren las particularidades mineralógicas, socioeconómicas, y regulatorias del contexto local. Las variaciones en composición mineralógica, características físicas de relaves, disponibilidad de infraestructura, y condiciones de mercado pueden modular significativamente la viabilidad de tecnologías que han demostrado éxito en otros contextos geográficos.

La evolución temporal acelerada del campo investigativo sugiere que hallazgos actuales pueden requerir actualización periódica para capturar innovaciones emergentes y lecciones aprendidas de implementaciones operacionales. La naturaleza dinámica de mercados de metales, marcos regulatorios, y tecnologías disponibles requiere monitoreo continuo de desarrollos que puedan afectar la viabilidad de estrategias de reprocesamiento en contextos específicos como Pasco.

CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática confirma que la transición hacia una economía circular en la gestión de relaves mineros trasciende la fase conceptual para consolidarse como una estrategia operacionalmente viable, respaldada por un creciente corpus de evidencia científica que documenta tanto viabilidad técnica como sostenibilidad económica y ambiental. La síntesis de 27 estudios publicados entre 2020 y 2024 revela una evolución paradigmática desde enfoques de remediación hacia estrategias integrales de valorización que reconceptualizan los relaves como recursos minerales secundarios de valor estratégico.



El panorama tecnológico identificado se estructura en cinco dimensiones principales — procesos hidrometalúrgicos, bio-hidrometalurgia, geopolimerización, procesamiento mineral avanzado, y recuperación de recursos hídricos— que ofrecen opciones tecnológicas diferenciadas según características mineralógicas, escalas operacionales, y contextos socioeconómicos específicos. La biolixiviación emerge como tecnología particularmente prometedora para elementos de tierras raras, con rendimientos de recuperación del 36-78%, mientras que la geopolimerización demuestra aplicabilidad universal para valorización de la matriz mineral residual con beneficios ambientales cuantificables de 25 a 930 kg CO₂-eq por tonelada tratada.

La evidencia sobre viabilidad económica revela sensibilidades críticas al CAPEX y volatilidad de mercados metálicos, requiriendo herramientas financieras sofisticadas como Análisis de Opciones Reales para evaluación adecuada de riesgos e incertidumbres. Los factores de implementación identificados incluyen marcos político-regulatorios progresivos, colaboración intersectorial, y cambios culturales organizacionales como habilitadores principales, mientras que complejidad técnica-regulatoria e inercia organizacional constituyen las barreras más significativas.

Para el contexto específico de Pasco, la aplicabilidad tecnológica se centra en lixiviación secuencial para aprovechamiento del carácter polimetálico de relaves históricos y geopolimerización para valorización masiva que atienda simultáneamente necesidades de infraestructura regional. La implementación exitosa requiere adaptación de modelos político-regulatorios exitosos como el chileno, desarrollo de capacidades técnicas locales, y establecimiento de mercados para productos valorizados. El reprocesamiento de relaves ha evolucionado desde una opción de remediación hacia una estrategia central de negocio y sostenibilidad para la minería del siglo XXI, con tecnologías y modelos de política viables que deben adaptarse a contextos con legados mineros complejos como el de Pasco.

REFERENCIAS

- Abbadi, A., & Mucsi, G. (2024). A review on complex utilization of mine tailings: Recovery of rare earth elements and residue valorization. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(3), 113118. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334372401248X>

- Adewuyi, S., Anani, A., & Luxbacher, K. (2024). Advancing sustainable and circular mining through solid-liquid recovery of mine tailings. *Process Safety and Environmental Protection*, 189, 31-46. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582024007717>
- Adrianto, L., & Pfister, S. (2022). Prospective environmental assessment of reprocessing and valorization alternatives for sulfidic copper tailings. *Resources, Conservation and Recycling*, 186, 106567. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344922004037>
- Adrianto, L., Ciacci, L., Pfister, S., & Hellweg, S. (2023). Toward sustainable reprocessing and valorization of sulfidic copper tailings: Scenarios and prospective LCA. *Science of the Total Environment*, 871, 162038. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S004896972300654X>
- Antony Jose, S., Calhoun, J., Renteria, O., Mercado, P., Nakajima, S., Hope, C., & Menezes, P. (2024). Promoting a circular economy in mining practices. *Sustainability*, 16(24), 11016. <https://doi.org/10.3390/su162411016>
- Araujo, F., Taborda, I., Nunes, E., & Santos, R. (2022). Recycling and reuse of mine tailings: A review of advancements and their implications. *Geosciences*, 12(9), 319. <https://www.mdpi.com/2076-3263/12/9/319>
- Araya, N., Kraslawski, A., & Cisternas, L. A. (2020). Towards mine tailings valorization: Recovery of critical materials from Chilean mine tailings. *Journal of Cleaner Production*, 263, 121555. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620316024>
- Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., & Cisternas, L. (2021). Feasibility of reprocessing mine tailings to obtain critical raw materials using real options analysis. *Journal of Environmental Management*, 284, 112060. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479721001225>
- Born, K. (2025). Adoption of circular economy practices in the mining sector: Evidence from Chile. *Resources Policy*, 102, 105514. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142072500056X>
- Chowdhury, M., & Talan, D. (2025). From Waste to Wealth: A Circular Economy Approach to the Sustainable Recovery of Rare Earth Elements and Battery Metals from Mine Tailings. *Separations*, 12(2).



- Cotrina, M., & Marquina, J. (2025). Circular economy in the mining industry: A bibliometric and systematic literature review. *Resources Policy*, 102, 105513. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420725000558>
- Ekdahl, M., Milios, L., & Dalhammar, C. (2024). Industrial policy for a circular industrial transition in Sweden: An exploratory analysis. *Sustainable Production and Consumption*, 47, 190-207. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550924000927>
- Gedam, V. V., Raut, R. D., de Sousa Jabbour, A. B. L., & Agrawal, N. (2021). Moving the circular economy forward in the mining industry: Challenges to closed-loop in an emerging economy. *Resources Policy*, 74, 102279. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420721002907>
- Hajdu, R., & Kinnunen, P. (2025). Tailings valorisation: Opportunities to secure rare earth supply and make mining environmentally more sustainable. *Journal of Cleaner Production*, 520, 146147. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652625014970>
- Hamraoui, L., Bergani, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A., & Benzaazoua, M. (2024). Towards a circular economy in the mining industry: possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, 14(3), 319. <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/3/319>
- Holley, E., Fahle, L., Malone, A., Zaronikola, N., Nelson, P., & Spiller, D. (2025). US industry practices and attitudes towards reprocessing mine tailings for metal recovery. *Resources Policy*, 107, 105643. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420725001850>
- Kinnunen, P., Karhu, M., Yli-Rantala, E., Kivikytö, P., & Mäkinen, J. (2022). A review of circular economy strategies for mine tailings. *Cleaner Engineering and Technology*, 8, 100499. <https://researchportal.tuni.fi/en/publications/a-review-of-circular-economy-strategies-for-mine-tailings>
- Makhathini, T., Bwapwa, J., & Mtsweni, S. (2023). Various options for mining and metallurgical waste in the circular economy: a review. *Sustainability*, 15(3), 2518. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/3/2518>

- Mancini, S., Casale, M., Tazzini, A., & Dino, G. (2024). Use and recovery of extractive waste and tailings for sustainable raw materials supply. *Mining*, 4(1), 149-167. <https://www.mdpi.com/2673-6489/4/1/10>
- Morales, C., La Rosa, A., da Silva, J., Morales, L., & Arán, D. (2025). Reuse of Mine Tailings Through Geopolymerization Applied to 3D Printing: A Review of Progress, Challenges and Perspectives. *Sustainability*, 17(6), 2617. <https://www.mdpi.com/2071-1050/17/6/2617>
- Na, H., Eom, Y., Yoo, K., & Alorro, R. (2024). A review on the reprocessing of sulfide tailings for resource recovery and AMD prevention using mineral processing methods. *Minerals Engineering*, 218, 109025. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0892687524004540>
- Sarker, S., Haque, N., Bhuiyan, M., Bruckard, W., & Pramanik, B. (2022). Recovery of strategically important critical minerals from mine tailings. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107622. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221334372200495X>
- Singh, S., Sukla, L. B., & Goyal, S. K. (2020). Mine waste & circular economy. *Materials Today: Proceedings*, 30, 332-339. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785320308191>
- Suppes, R., & Heuss-Aßbichler, S. (2021). Resource potential of mine wastes: A conventional and sustainable perspective on a case study tailings mining project. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126446. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621006661>
- Tayebi, M., Edraki, M., Corder, G., & Golev, A. (2019). Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*, 9(5), 286. <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/5/286>
- Yu, H., Zahidi, I., Chow, M. F., Liang, D., & Madsen, D. Ø. (2024). Reimagining resources policy: Synergizing mining waste utilization for sustainable construction practices. *Journal of Cleaner Production*, 464, 142795. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142795>
- Yu, H., Zahidi, I., Fai, C. M., Liang, D., & Madsen, D. Ø. (2024). Mineral waste recycling, sustainable chemical engineering, and circular economy. *Results in Engineering*, 21, 101865. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S259012302400118X>