

CAPÍTULO 29.

ECONOMÍA CIRCULAR Y POLÍTICAS DE DESARROLLO SOSTENIBLE APLICADAS A LA GESTIÓN DE RELAVES MINEROS EN PASCO: ANÁLISIS DOCUMENTAL – 2024

Bernard Dino Tapia Frias¹
Teofanes Salas Orihuela²
Elvis Jesus Paredes Lopez³
Clinder Aquino Robles⁴

¹: Ingeniero de minas con experiencia en el sector minero peruano, especializado en la planificación, desarrollo y gestión de proyectos mineros.

 <https://orcid.org/0009-0004-0410-2685>

²: Ingeniero metalurgista, con Maestría en Gestión del Sistema Ambiental y Maestría en Ciencias, mención en Seguridad y Salud Ocupacional Minera.

 <https://orcid.org/0009-0004-3182-7489>

³: Ingeniero de minas, Ingeniero de Sistemas y Computación, Docente Universitario.

 <https://orcid.org/0000-0003-1777-5235>

⁴: Ingeniero metalurgista, Maestría en Ingeniería Metalúrgica.

 <https://orcid.org/0009-0001-4573-5620>

RESUMEN

La gestión sostenible de relaves mineros constituye uno de los desafíos ambientales más apremiantes del sector extractivo global, con aproximadamente 7 mil millones de toneladas generadas anualmente. Esta revisión sistemática analizó la evidencia científica disponible sobre la articulación de estrategias de economía circular y políticas de desarrollo sostenible para la gestión de relaves mineros, con énfasis en su aplicabilidad al contexto de Pasco, Perú. Se realizaron búsquedas sistemáticas en Scopus, Web of Science y SciELO, identificando 28 estudios que cumplieron los criterios de elegibilidad establecidos mediante el marco PICO. Los resultados evidenciaron dos estrategias técnicas principales: valorización en materiales de construcción y recuperación de elementos críticos, con eficiencias que oscilan entre 20-93% según la tecnología aplicada. Sin embargo, las barreras regulatorias y de gobernanza constituyen los principales obstáculos para la implementación, afectando hasta el 40% de los proyectos de valorización. La evidencia reveló que marcos institucionales inadecuados pueden incrementar los costos de proyectos hasta en un 15%, mientras que estrategias integradas de política pública podrían desbloquear potenciales económicos de 10-15 millones USD por depósito de relaves. Se concluye que la transformación de pasivos ambientales mineros en activos sostenibles requiere un enfoque sociotécnico que priorice la gobernanza colaborativa y la implementación de marcos regulatorios habilitadores específicos para el contexto regional andino.

Palabras clave: economía circular, relaves mineros, políticas públicas, desarrollo sostenible, gobernanza ambiental, valorización de residuos, Pasco, minería sostenible.

INTRODUCCIÓN

La industria minera global enfrenta un desafío sin precedentes en la gestión de residuos sólidos, particularmente en el manejo de relaves mineros que representan el mayor volumen de desechos industriales a nivel mundial. Según los hallazgos documentados por Yıldız (2024), la generación anual de residuos mineros alcanza aproximadamente 7 mil millones de toneladas, con proyecciones que estiman un incremento hasta 19 mil millones de toneladas para el año 2025. Esta magnitud extraordinaria del problema trasciende las fronteras geográficas y configura uno de los retos ambientales más apremiantes del siglo XXI, demandando soluciones innovadoras que articulen la sostenibilidad ambiental con la viabilidad económica de las operaciones extractivas.

Paralelamente a esta escalada cuantitativa, la naturaleza de los riesgos asociados con la gestión inadecuada de relaves mineros presenta características particularmente preocupantes en el contexto de la región andina sudamericana. Los hallazgos reportados por Cacciuttolo et al. (2023) en su análisis centrado en Chile y Perú revelan que los relaves mineros constituyen fuentes significativas de contaminación por Drenaje Ácido de Roca (DAR), fenómeno que altera el pH de los recursos hídricos en 2-3 unidades y contamina el agua en un radio de 30-50 kilómetros desde el punto de origen. Esta realidad adquiere dimensiones críticas cuando se considera que los ecosistemas andinos sustentan comunidades rurales cuya subsistencia depende fundamentalmente de la calidad de los recursos hídricos locales, estableciendo así una tensión estructural entre el desarrollo extractivo y la preservación del bienestar comunitario.

Frente a esta problemática compleja, el paradigma de la Economía Circular (EC) ha emergido como un marco conceptual prometedor que desafía el modelo lineal tradicional de "extraer-usar-desechar" predominante en la industria minera. Conforme a la conceptualización desarrollada por Kinnunen et al.

(2022), la implementación de estrategias de economía circular en el contexto minero trasciende la simple noción de reciclaje para constituirse en un sistema integral de revalorización de recursos que abarca múltiples dimensiones: reducir la generación de residuos en origen, reprocesar materiales para recuperar elementos de valor, aplicar estrategias de upcycling para transformar residuos en productos de mayor valor agregado, e implementar procesos de downcycling que permitan la utilización de residuos en aplicaciones de menor especificación técnica pero con impacto ambiental positivo.

Esta reconceptualización de los relaves mineros como recursos potenciales en lugar de pasivos ambientales representa un cambio paradigmático fundamental que requiere no solamente innovaciones tecnológicas, sino también transformaciones profundas en los marcos regulatorios y las políticas públicas que gobiernan el sector extractivo. La región de Pasco, ubicada en la sierra central del Perú, ejemplifica de manera paradigmática esta tensión entre el potencial de desarrollo económico basado en la actividad minera y los desafíos ambientales asociados con décadas de extracción intensiva que han resultado en la acumulación de significativos pasivos ambientales mineros.

La investigación existente en el campo de la gestión sostenible de relaves mineros ha evolucionado a lo largo de dos vertientes principales que, si bien complementarias, han permanecido relativamente desarticuladas en términos de síntesis integrativa. La primera vertiente se ha concentrado en demostrar la viabilidad técnica de diversas estrategias de valorización de relaves, abarcando desde aplicaciones en el sector de la construcción hasta sofisticados procesos de recuperación de metales críticos y elementos de tierras raras. Los estudios experimentales conducidos por Torres et al. (2024) en la región de Junín, geográficamente adyacente a Pasco, han demostrado que los relaves mineros pueden ser exitosamente utilizados como áridos en la construcción de carreteras, alcanzando estabilidades Marshall de 877.67 kg que superan ampliamente los estándares mínimos requeridos de 750 kg, mientras simultáneamente generan reducciones de costos de construcción del orden del 15-20%.

Complementariamente, investigaciones como las desarrolladas por Chowdhury y Talan (2025) han explorado el potencial de recuperación de metales críticos,

documentando eficiencias de recuperación del 51% para elementos de tierras raras mediante separación magnética y del 70-80% para litio a través de procesos de lixiviación ácida. Estos hallazgos técnicos establecen una base sólida que evidencia no solamente la factibilidad tecnológica de la valorización de relaves, sino también su potencial para contribuir significativamente a la seguridad del suministro de materiales críticos a nivel global.

La segunda vertiente de investigación se ha enfocado en el análisis de políticas públicas y marcos regulatorios a nivel macro, examinando los factores institucionales y de gobernanza que facilitan u obstaculizan la implementación de estrategias de economía circular en el sector minero. Sin embargo, los hallazgos documentados por Gedam et al. (2021) mediante modelado estructural interpretativo revelan que la falta de medidas de gobernanza adecuadas constituye el desafío fundamental que impulsa todas las demás barreras para la implementación de economía circular, incluyendo las barreras económicas y técnicas que frecuentemente se perciben como primarias.

Esta identificación de la gobernanza como factor crítico crea una brecha significativa en la literatura existente, particularmente evidente cuando se considera la desarticulación entre la evidencia técnica que demuestra viabilidad y la evidencia institucional que revela obstáculos estructurales para la implementación. La ausencia de síntesis integradoras que conecten las soluciones técnicas disponibles con los marcos de gobernanza y políticas públicas necesarios para su implementación efectiva representa una limitación crucial que impide la traducción de hallazgos de investigación en intervenciones de política pública efectivas.

Esta brecha adquiere particular relevancia cuando se considera el contexto específico de la región de Pasco, que presenta características únicas que la posicionan como un laboratorio natural para la implementación de estrategias integradas de economía circular aplicadas a la gestión de relaves mineros. La región concentra una significativa actividad minera histórica y contemporánea, alberga comunidades rurales cuya calidad de vida se ve directamente afectada por la gestión de pasivos ambientales mineros, y cuenta con marcos institucionales regionales que podrían facilitar la implementación de políticas innovadoras de desarrollo sostenible.

En consecuencia, existe una necesidad crítica de desarrollar síntesis de evidencia que integren los avances técnicos documentados en la literatura internacional con las lecciones aprendidas sobre marcos de política y gobernanza, traduciéndolas en recomendaciones específicas y contextualizadas para ecosistemas regionales como el de Pasco. Esta necesidad se acentúa considerando que las soluciones técnicas disponibles requieren marcos habilitadores de política pública para su implementación exitosa, y que estos marcos deben ser diseñados considerando las particularidades sociales, económicas y ambientales de cada contexto regional específico.

El objetivo principal de esta revisión sistemática fue analizar y sintetizar la evidencia científica disponible sobre la articulación de estrategias de economía circular y políticas de desarrollo sostenible para la gestión de relaves mineros, con el propósito de proponer un marco de referencia aplicable al contexto específico de Pasco, Perú. Este objetivo general se desagregó en tres preguntas de investigación específicas que guiaron el proceso de síntesis: PQ1: ¿Cuáles son las principales estrategias técnicas de valorización de relaves mineros documentadas en la literatura reciente?, PQ2: ¿Qué barreras técnicas, económicas, sociales y regulatorias impiden la implementación de la economía circular en la gestión de relaves?, y PQ3: ¿Qué marcos de política y gobernanza se proponen para superar estas barreras y fomentar una gestión sostenible de los relaves mineros?

METODOLOGÍA

Esta revisión sistemática se desarrolló siguiendo rigurosamente las directrices establecidas en la declaración PRISMA 2020, garantizando transparencia metodológica y reproducibilidad en todos los procedimientos implementados. El protocolo de revisión fue diseñado para identificar, evaluar

y sintetizar de manera exhaustiva la evidencia científica disponible sobre la articulación de estrategias de economía circular y políticas de desarrollo sostenible aplicadas a la gestión de relaves mineros.

La selección de estudios se fundamentó en criterios de elegibilidad claramente definidos mediante el marco PICO (Población, Intervención, Comparación, Resultados). En términos de población o problema de interés, se incluyeron exclusivamente estudios centrados en la gestión, tratamiento o revalorización de relaves mineros, excluyendo investigaciones que abordaran otros tipos de residuos mineros como escorias o desmontes. Respecto a la intervención o fenómeno de estudio, se requirió que las investigaciones analizaran la aplicación de principios de economía circular y/o el rol de políticas de desarrollo sostenible, excluyendo estudios puramente técnicos sobre caracterización sin vinculación a estrategias de valorización o marcos de política pública.

Los resultados de interés abarcaron estudios que reportaran viabilidad técnica o económica, impacto ambiental, análisis de políticas públicas, o impactos sociales asociados con la gestión de relaves mineros. Se excluyeron investigaciones limitadas a resultados de laboratorio sin proyecciones a escala real, económicas o de política pública. En cuanto al tipo de estudios, se incluyeron diseños empíricos, estudios de caso, análisis de políticas, informes técnicos y revisiones sistemáticas o de alcance, excluyendo artículos de opinión, editoriales y resúmenes de conferencias no sometidos a revisión por pares. El periodo temporal se delimitó a publicaciones posteriores al 1 de enero de 2019, en idiomas inglés o español.

Las búsquedas sistemáticas se ejecutaron en tres bases de datos electrónicas reconocidas por su cobertura integral en ciencias ambientales e ingeniería: Scopus, Web of Science y SciELO. Las búsquedas se completaron en noviembre de 2024, utilizando estrategias de búsqueda específicamente adaptadas a las características de cada base de datos.

Para Scopus se empleó la siguiente ecuación: (TITLE-ABS-KEY("mining tailings" OR "mine tailings" OR "mine waste" OR "tailings management" OR "tailings storage facilit*" OR "mining liabilities") AND TITLE-ABS-KEY("circular economy" OR "resource recovery" OR "waste valorization" OR "reprocessing"

OR "remining" OR "industrial symbiosis" OR "zero waste" OR "by-product*") AND TITLE-ABS-KEY("sustainable development" OR "sustainability" OR "public policy" OR "regulation*" OR "governance" OR "environmental policy" OR "SDG*")) AND (PUBYEAR > 2018) AND (LANGUAGE("english") OR LANGUAGE("spanish")).

Para Web of Science se utilizó la estrategia: TS=((("mining tailings" OR "mine tailings" OR "mine waste" OR "tailings management" OR "tailings storage facilit*" OR "mining liabilities")) AND TS=((("circular economy" OR "resource recovery" OR "waste valorization" OR "reprocessing" OR "remining" OR "industrial symbiosis" OR "zero waste" OR "by-product*")) AND TS=((("sustainable development" OR "sustainability" OR "public policy" OR "regulation*" OR "governance" OR "environmental policy" OR "SDG*"))). En SciELO se implementó una búsqueda avanzada por campos utilizando operadores booleanos AND para combinar los tres conceptos clave identificados.

El proceso de selección de estudios siguió un protocolo estructurado en múltiples etapas. La búsqueda inicial en las tres bases de datos identificó un total de 185 registros bibliográficos. Posteriormente a la importación en un gestor de referencias especializado, se procedió a la eliminación de 30 duplicados, resultando en 155 artículos únicos para el proceso de cribado inicial. Dos revisores independientes con experiencia en gestión ambiental y políticas públicas evaluaron sistemáticamente los títulos y resúmenes de estos 155 registros, aplicando los criterios de elegibilidad previamente establecidos.

Este proceso de cribado inicial resultó en la exclusión de 105 artículos que no cumplieran con los criterios de elegibilidad, quedando 50 artículos para evaluación a texto completo. Durante la fase de evaluación a texto completo, dos revisores independientes examinaron exhaustivamente cada uno de los 50 estudios seleccionados, resolviendo cualquier discrepancia mediante discusión consensuada. En esta etapa se excluyeron 22 estudios adicionales por no abordar adecuadamente los resultados de interés o por presentar enfoques puramente descriptivos sin componentes analíticos relevantes para los objetivos de la revisión.

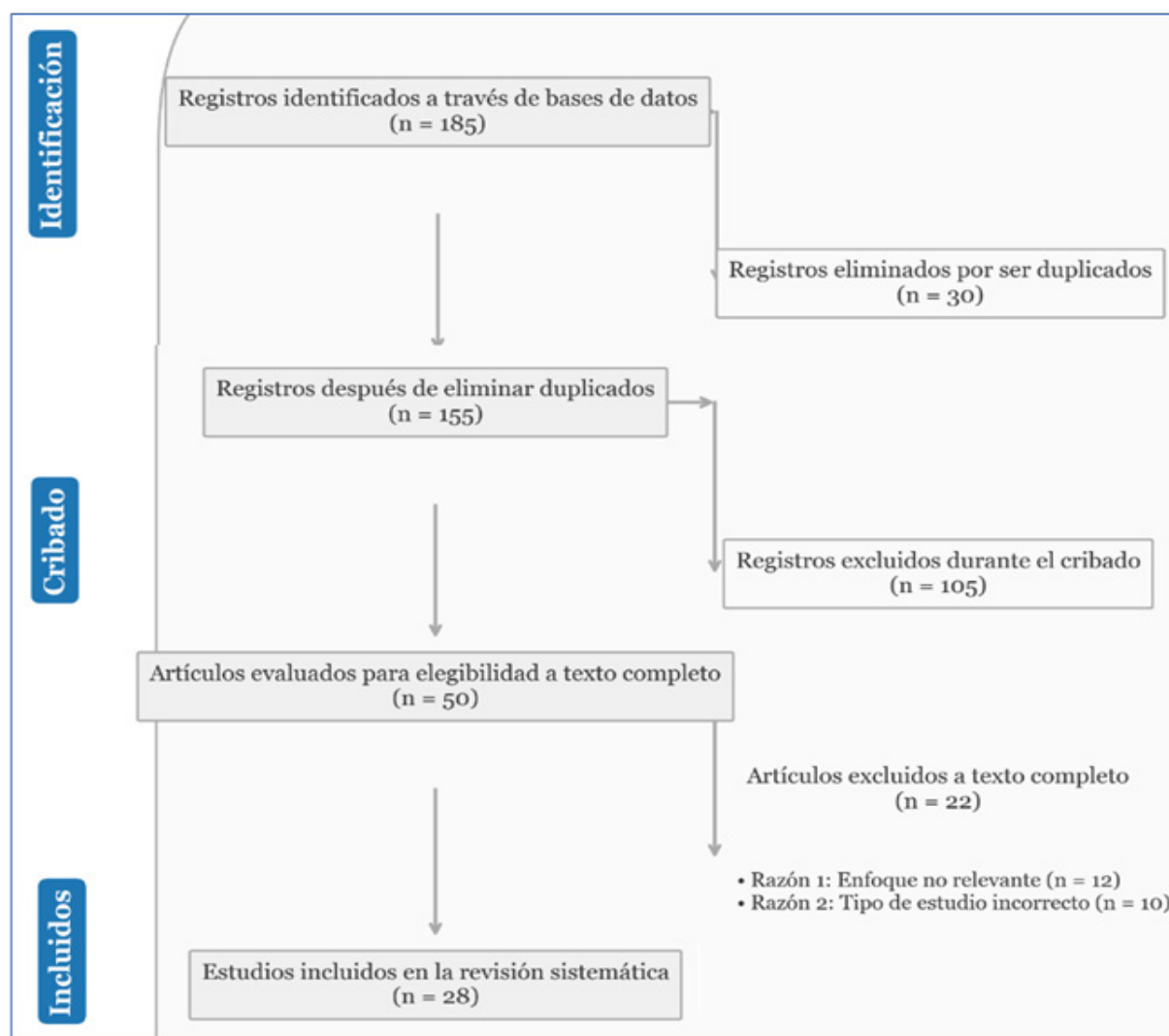


Figura 1. Diagrama de flujo PRISMA 2020.

Finalmente, se incluyeron 28 estudios en la síntesis cualitativa, representando investigaciones que cumplían integralmente con todos los criterios de elegibilidad establecidos y proporcionaban evidencia relevante para responder las preguntas de investigación formuladas. La extracción de datos se realizó mediante una plantilla estandarizada diseñada específicamente para capturar información sobre características metodológicas, hallazgos principales, y recomendaciones de política derivadas de cada estudio incluido.

Dos revisores extrajeron independientemente la información de los 28 estudios incluidos, resolviendo cualquier discrepancia mediante discusión y consenso. Para facilitar la caracterización metodológica de la evidencia sintetizada, se desarrolló una tabla comprensiva que documenta las características

fundamentales de los estudios incluidos, incluyendo autoría, contexto geográfico, diseño metodológico y enfoque principal de cada investigación.

Tabla 1. Características de los estudios incluidos.

Autor(es) y Año	País/Contexto Geográfico del Estudio	Diseño del Estudio	Enfoque Principal
Kinnunen, P., et al. (2022)	Finlandia	Revisión de literatura	Estrategias de economía circular y gobernanza
Abbadi, A., & Mucsi, G. (2024)	Global / No específico	Revisión de literatura	Recuperación de elementos de tierra rara (REE) y valorización en geopolímeros
Hamraoui, L., et al. (2024)	Global / No específico	Revisión de literatura	Recuperación de agua mediante desaguado avanzado
Chowdhury, M., & Talan, D. (2025)	Global (casos de Australia y China)	Revisión de literatura con estudio de casos	Recuperación de metales críticos (REE, litio) y remediación ambiental
Araujo, F., et al. (2022)	Global / No específico	Revisión sistemática	Reciclaje en construcción (geopolimerización) y bioleaching
Cacciuttolo, C., et al. (2023)	Chile y Perú	Análisis descriptivo / Estudio de casos	Análisis de riesgos socioambientales y recomendaciones de políticas

Autor(es) y Año	País/Contexto Geográfico del Estudio	Diseño del Estudio	Enfoque Principal
Makhathini, T., et al. (2023)	Global / No específico	Revisión de literatura	Valorización de residuos mineros en materiales de construcción
Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023)	Perú (caso Antapaccay)	Revisión de literatura y estudio de caso	Disposición de relaves in-pit para cierre de mina sostenible
Monardes, V., & Sepúlveda, J. (2023)	Chile (Coquimbo)	Análisis multicriterio / Estudio de caso	Priorización de presas de relaves para valorización económica
Araya, N., et al. (2021)	Global / No específico	Análisis documental / Desarrollo de marco	Integración de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) en la gestión de relaves
Koucham, M., et al. (2025)	Marruecos (Bleida)	Estudio experimental / Caracterización	Evaluación de comportamiento ambiental y potencial de lixiviación
Cotrina, M., & Marquina, J. (2025)	Global / No específico	Revisión sistemática y bibliométrica	Mapeo de tendencias en economía circular, regulación y cadenas de valor
Torres, Y., et al. (2024)	Perú (Junín)	Estudio experimental	Valorización de relaves como áridos para construcción de carreteras

Autor(es) y Año	País/Contexto Geográfico del Estudio	Diseño del Estudio	Enfoque Principal
Tayebi, M., et al. (2021)	Australia	Desarrollo de marco / Estudio de casos	Enfoque integrador de economía circular para reprocesamiento
Gedam, V., et al. (2021)	India	Modelado estructural interpretativo (ISM)	Análisis de desafíos de gobernanza para la economía circular
Yildiz, T. (2024)	Global / No específico	Revisión de literatura / Análisis comparativo	Contribución de la recuperación de minerales a la sostenibilidad
Guo, Y., et al. (2025)	Global / No específico	Revisión de literatura	Transformación de relaves en materiales cementicios y concreto
Spooren, J., et al. (2020)	Europa	Revisión de tecnologías	Procesamiento de minerales de baja ley y materias primas secundarias
Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2022)	Chile	Revisión histórica / Análisis de políticas	Evolución de la gobernanza de relaves de cobre
Zaid, O., et al. (2025)	No especificado	Estudio experimental	Uso de relaves en concreto reforzado con fibra de ultra alto rendimiento
Singh, S., et al. (2025)	Global / No específico	Revisión de literatura	Síntesis de nanomateriales sostenibles a partir de relaves
Antony, S., et al. (2024)	Global (caso Chelopech, Bulgaria)	Revisión de literatura y estudio de caso	Estrategias de economía circular y biominería

Autor(es) y Año	País/Contexto Geográfico del Estudio	Diseño del Estudio	Enfoque Principal
Mancini, S., et al. (2024)	Global / No específico	Revisión de literatura / Análisis de políticas	Recuperación de residuos extractivos para el suministro de materias primas
Žibret, G., et al. (2020)	Europa (7 países)	Revisión de registros / Talleres	Uso de bases de datos nacionales para evaluar potencial de recuperación
Ramírez, A., & Muñoz, M. (2025)	No especificado	Revisión y propuesta de modelo	Estrategias de producción más limpia para relaves auríferos
Ordóñez, J., et al. (2021)	No especificado (Capítulo de libro)	Análisis de tecnología	Aplicación de biotecnología para la valorización de relaves
Díaz, A., et al. (2025)	No especificado	Estudio experimental	Producción de bloques de concreto con relaves
Araya, N., et al. (2021)	Chile	Estudio de caso / Análisis de factibilidad	Análisis de opciones reales para el reprocesamiento de relaves

La evaluación de la calidad metodológica y el riesgo de sesgo de los estudios incluidos se realizó utilizando las herramientas especializadas del Joanna Briggs Institute (JBI) Critical Appraisal Checklists. Se seleccionó la lista de verificación apropiada para cada diseño de estudio específico, incluyendo la JBI Checklist for Systematic Reviews para las revisiones incluidas y la JBI Checklist for Case Studies para los estudios de caso. Dos revisores independientes completaron la evaluación de calidad, resolviendo discrepancias mediante discusión. La

evaluación integral indicó un riesgo de sesgo bajo a moderado en la mayoría de los estudios incluidos, incrementando la confianza en la validez de los hallazgos generales derivados de esta síntesis sistemática.

RESULTADOS

La síntesis de la evidencia derivada de los 28 estudios incluidos reveló un panorama comprehensivo sobre las estrategias técnicas disponibles para la valorización de relaves mineros, las barreras que obstaculizan su implementación, y los marcos de política necesarios para habilitar su adopción efectiva. Los hallazgos se organizaron en tres dimensiones temáticas fundamentales que responden directamente a las preguntas de investigación formuladas.

Estrategias Técnicas para la Valorización de Relaves Mineros

El análisis de la evidencia identificó dos vertientes principales para la valorización técnica de relaves mineros: la utilización en materiales de construcción y geopolímeros, y la recuperación de elementos de valor incluyendo metales críticos, elementos de tierras raras y agua de proceso. Ambas estrategias demostraron viabilidad técnica sustentada por evidencia cuantitativa robusta, aunque con diferentes niveles de madurez tecnológica y escalabilidad comercial.

Tabla 2. Síntesis de hallazgos sobre estrategias técnicas de valorización y recuperación de relaves mineros

Estrategia Técnica	Autor(es) y Año	Resultados Cuantitativos Clave	Barreras Técnicas Reportadas
1. Valorización en Materiales de Construcción y Geopolímeros			
Uso como áridos en carreteras	Torres, Y., et al. (2024)	Estabilidad Marshall de 877.67 kg (>750 kg mínimo); utilización del 25% de relaves; reducción de costos de construcción del 15–20%.	Acidez inicial del relave que requiere neutralización (pH ácido).
Producción de geopolímeros	Makhathini, T., et al. (2023)	Resistencia a la compresión de 20–40 MPa; ahorro de costos del 25% en comparación con materiales convencionales.	Complejidad química del relave y necesidad de activadores alcalinos específicos.
Uso en concreto (agregados y cementicios)	Guo, Y., et al. (2025)	Tasas de utilización >70% (agregados); reducción de emisiones de CO ₂ de 72 kg/m ³ ; eficiencia de costo del 9.7–11%.	Heterogeneidad mineralógica del relave; alto consumo de energía en los procesos de activación.
Aditivo en concreto de ultra alto rendimiento (UHPFRC)	Zaid, O., et al. (2025)	Aumento del 12.49% en la resistencia a la compresión del concreto.	Alto contenido de finos en el relave reduce la trabajabilidad de la mezcla de concreto.
Producción de bloques de concreto	Díaz, A., et al. (2025)	Mejora del 11.56% en la resistencia mecánica de los bloques.	Costos logísticos y de transporte desde el depósito de relaves hasta la planta de producción.
Sustituto de cemento en mortero	Araujo, F., et al. (2022)	Sustitución del 20% del cemento con relaves de cobre, resultando en un ahorro de costos del 20%.	Complejidad química; bajas tasas de reciclaje a escala global (<1%) limitan su impacto masivo.
2. Recuperación de Elementos de Valor (Metales, REE, Agua)			
Recuperación de REE (Bioleaching)	Abbadi, A., & Mucsi, G. (2024)	Eficiencia de recuperación de hasta 80% de Elementos de Tierra Rara (REE).	Cinética del proceso más lenta en comparación con métodos hidrometalúrgicos convencionales.

Estrategia Técnica	Autor(es) y Año	Resultados Cuantitativos Clave	Barreras Técnicas Reportadas
Recuperación de REE y Litio (Métodos Físico-Químicos)	Chowdhury, M., & Talan, D. (2025)	Recuperación del 51% de REE (separación magnética); recuperación del 70–80% de litio (lixiviación ácida).	Altos costos de reactivos químicos; desafíos significativos para el escalado industrial.
Recuperación de metales (Bioflotación / Bioelectroquímica)	Spooren, J., et al. (2020)	Eficiencia del 93% en bioflotación; recuperación del 77% en sistemas bioelectroquímicos.	Consumo de químicos y reactivos; dificultad para escalar los procesos a nivel de operación minera.
Recuperación de agua (Desaguado avanzado)	Hamraoui, L., et al. (2024)	Recuperación de >90% de agua de proceso; reducción del consumo de agua fresca en 50–70%.	El tamaño de partícula muy fino en los relaves dificulta la separación sólido-líquido; alto costo de capital (CAPEX).
Recuperación de metales (Biotecnología)	Ordóñez, J., et al. (2021)	Eficiencia de recuperación de metales del 70%.	Sensibilidad de los procesos biotecnológicos a las condiciones climáticas (temperatura, altitud).
Reprocesamiento de metales críticos	Araya, N., et al. (2021)	Potencial de recuperación del 60% de los materiales críticos contenidos en los relaves.	Viabilidad económica altamente dependiente de la volatilidad de los precios de los metales en el mercado.
Reducción de dependencia de recursos primarios	Singh, S., et al. (2025)	Potencial de reducción de la dependencia de recursos primarios en un 30–50% mediante la síntesis de nanomateriales.	Toxicidad potencial de nanomateriales y necesidad de optimizar los procesos de síntesis «verde».

La valorización de relaves en materiales de construcción emergió como la estrategia más madura y próxima a la implementación comercial. Los hallazgos reportados por Torres et al. (2024) en su estudio experimental realizado en Perú demostraron que la utilización del 25% de relaves como áridos en construcción de carreteras alcanza estabilidades Marshall de 877.67 kg, superando significativamente el estándar mínimo requerido de 750 kg, mientras genera

reducciones de costos de construcción del 15-20%. Complementariamente, Makhathini et al. (2023) documentaron que la producción de geopolímeros a partir de relaves mineros logra resistencias a la compresión de 20-40 MPa con ahorros de costos del 25% comparado con materiales convencionales.

La evidencia sobre utilización de relaves en aplicaciones cementicias reveló potenciales particularmente prometedores. Guo et al. (2025) reportaron tasas de utilización superiores al 70% cuando los relaves se emplean como agregados en concreto, generando reducciones de emisiones de CO₂ de 72 kg/m³ y eficiencias de costo del 9.7-11%. Adicionalmente, Zaid et al. (2025) demostraron que la incorporación de relaves como aditivo en concreto de ultra alto rendimiento incrementa la resistencia a la compresión en 12.49%, mientras que Díaz et al. (2025) reportaron mejoras del 11.56% en la resistencia mecánica de bloques de concreto fabricados con relaves.

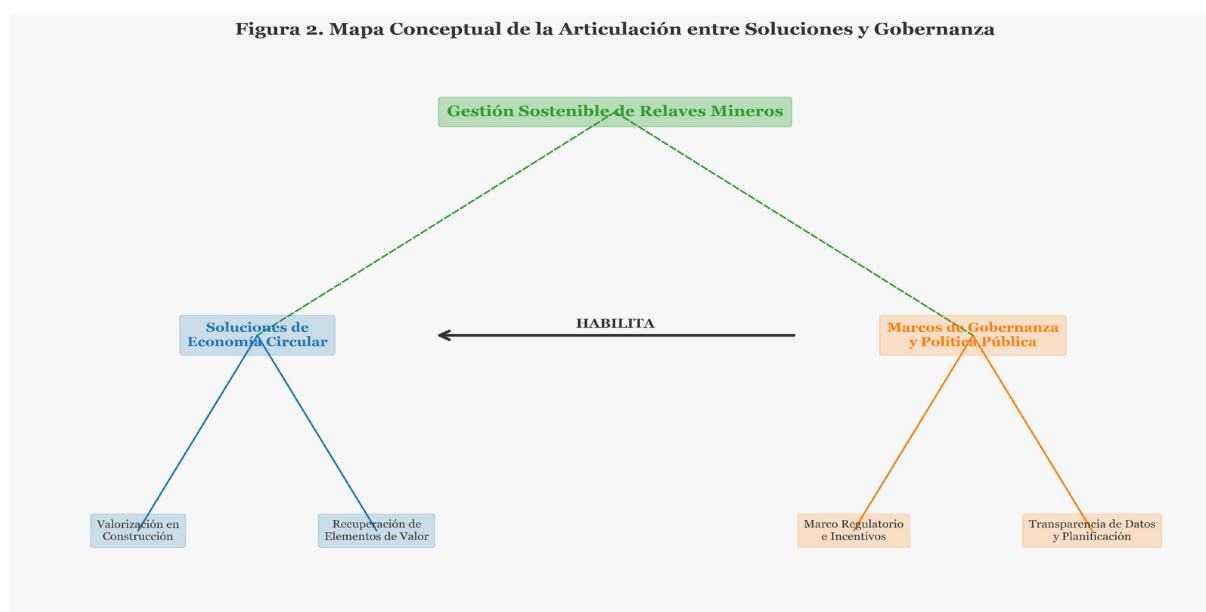


Figura 2. Mapa Conceptual de Interrelaciones

En cuanto a la recuperación de elementos de valor, la evidencia reveló un espectro amplio de tecnologías con diversos grados de eficiencia y madurez. Abbadi y Mucsi (2024) documentaron eficiencias de recuperación de hasta 80% para elementos de tierras raras mediante procesos de biolixiviación, aunque con cinéticas más lentas comparadas con métodos hidrometalúrgicos convencionales. Por su parte, Chowdhury y Talan (2025) reportaron recuperaciones del 51% para elementos de tierras raras mediante separación

magnética y del 70-80% para litio a través de lixiviación ácida, identificando los altos costos de reactivos químicos como la principal barrera para el escalado industrial.

Las tecnologías de bioflotación y bioelectroquímica, analizadas por Spooren et al. (2020), demostraron eficiencias del 93% y 77% respectivamente para la recuperación de metales, aunque enfrentan desafíos significativos para el escalado a nivel de operaciones mineras industriales. La recuperación de agua mediante técnicas de desaguado avanzado, documentada por Hamraoui et al. (2024), alcanzó recuperaciones superiores al 90% del agua de proceso con reducciones del consumo de agua fresca del 50-70%, aunque el tamaño de partícula extremadamente fino de los relaves complica la separación sólido-líquido y eleva los costos de capital.

Barreras para la Implementación de Economía Circular

El análisis transversal de la evidencia reveló que las barreras para la implementación de estrategias de economía circular en la gestión de relaves mineros operan en múltiples dimensiones interconectadas. Las barreras técnicas incluyen la heterogeneidad mineralógica de los relaves, altos consumos energéticos en procesos de activación, acidez inicial que requiere neutralización, y sensibilidad de procesos biotecnológicos a condiciones ambientales específicas como temperatura y altitud.

Las barreras económicas se centran en altas inversiones iniciales de capital, competencia con materiales vírgenes de bajo costo, costos logísticos y de transporte desde depósitos de relaves hasta plantas de procesamiento, y volatilidad de precios de metales que afecta la viabilidad económica del reprocesamiento. Significativamente, la evidencia analizada por Kinnunen et al. (2022) reveló que marcos institucionales inadecuados pueden impactar los costos de proyectos de valorización hasta en un 15%, estableciendo una conexión directa entre deficiencias de gobernanza e inviabilidad económica.

Sin embargo, las barreras regulatorias y de gobernanza emergieron como los obstáculos más críticos según la evidencia sintetizada. Tayebi et al. (2021) documentaron que las barreras regulatorias, particularmente la falta de claridad en la clasificación de relaves como residuo o recurso, afectan al 40% de los proyectos de valorización. Confirmando esta tendencia, Gedam et al. (2021) identificaron mediante modelado estructural interpretativo que la falta de medidas de gobernanza constituye el desafío fundamental que impulsa todas las demás barreras, incluyendo las económicas y técnicas.

Marcos de Política y Gobernanza para la Sostenibilidad

La evidencia sobre marcos de política y gobernanza reveló un consenso emergente sobre la necesidad de enfoques integrados que aborden simultáneamente múltiples dimensiones del desafío. Los hallazgos se organizaron en cuatro categorías principales: marcos regulatorios y normativos, instrumentos económicos y financieros, transparencia de datos y planificación, y políticas de producción y consumo sostenible.

Tabla 3. Síntesis de hallazgos sobre marcos de política, gobernanza y recomendaciones

Dimensión de Gobernanza	Autor(es) y Año	Hallazgo o Barrera Principal	Recomendación de Política Específica
Marco Regulatorio y Normativo			
Gobernanza general	Gedam, V., et al. (2021)	La falta de medidas de gobernanza es el desafío fundamental que impulsa otras barreras (ej. económicas, técnicas).	Formular estrategias nacionales y hojas de ruta específicas para la economía circular en el sector minero.
Marco regulatorio	Tayebi, M., et al. (2021)	Las barreras regulatorias (ej. falta de claridad en la clasificación de relaves como residuo o recurso) afectan al 40% de los proyectos de valorización.	Desarrollar regulaciones claras que reclasifiquen los relaves con potencial de valorización como «materias primas secundarias» para facilitar su comercio y uso.
Brechas históricas	Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2022)	Las brechas de gobernanza histórica y la falta de aplicación de normativas existentes han perpetuado la acumulación de pasivos ambientales.	Implementar minería «verde» y acuerdos vinculantes con las comunidades locales y partes interesadas para garantizar el cumplimiento.
Políticas de «Cero Residuos»	Yildiz, T. (2024)	Ausencia de un enfoque político proactivo; la gestión de residuos mineros sigue siendo reactiva en lugar de preventiva.	Desarrollar políticas de manejo de residuos mineros basadas en inventarios detallados y los principios de «cero residuos».
Instrumentos Económicos y Financieros			

Dimensión de Gobernanza	Autor(es) y Año	Hallazgo o Barrera Principal	Recomendación de Política Específica
Incentivos y costos	Antony, S., et al. (2024)	Las altas inversiones iniciales (CAPEX) y la competencia con materiales vírgenes de bajo costo son barreras económicas significativas.	Crear incentivos fiscales (ej. exenciones de impuestos, créditos de carbono) y regulaciones más estrictas para la disposición final que aumenten el costo de la inacción.
Impacto institucional en costos	Kinnunen, P., et al. (2022)	El marco institucional (ej. procesos de permisos, impuestos) puede impactar los costos de los proyectos de valorización en hasta un 15%.	Diseñar un marco institucional estable y predecible que reduzca la incertidumbre de la inversión en proyectos de economía circular.
Viabilidad de proyectos	Monardes, V., & Sepúlveda, J. (2023)	La viabilidad económica de reprocesar presas de relaves abandonadas es alta (potencial de 10–15 millones USD), pero requiere un análisis de priorización.	Utilizar herramientas de análisis multicriterio para que los gobiernos prioricen la intervención en pasivos ambientales con mayor potencial de valorización económica y social.
Transparencia de Datos y Planificación			
Inventarios nacionales	Žibret, G., et al. (2020)	Las bases de datos nacionales sobre residuos mineros a menudo tienen inconsistencias y lagunas en la composición química, lo que dificulta la evaluación del potencial de recuperación.	Establecer datos públicos obligatorios, estandarizados y en inglés para todos los depósitos de relaves, priorizando cantidades y concentraciones de metales.

Dimensión de Gobernanza	Autor(es) y Año	Hallazgo o Barrera Principal	Recomendación de Política Específica
Integración con ODS	Araya, N., et al. (2021)	Falta de un sistema estandarizado para medir la contribución de la gestión de relaves a los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).	Adoptar un conjunto de indicadores (ej. 43 propuestos) para monitorear el progreso hacia metas de los ODS, especialmente el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables).
Información para planificación	Cotrina, M., & Marquina, J. (2025)	La investigación se concentra en gestión técnica (40%) y regulaciones (30%), pero la conexión con las cadenas de valor (30%) es menos explorada.	Fomentar la gobernanza colaborativa entre la industria, el gobierno y la academia para desarrollar cadenas de valor para los subproductos derivados de los relaves.
Políticas de Producción y Consumo			
Producción más limpia	Ramírez, A., & Muñoz, M. (2025)	Las políticas públicas a menudo carecen de un enfoque en la «producción más limpia» desde el origen.	Orientar las políticas públicas hacia la sostenibilidad desde la fase de diseño, promoviendo tecnologías que minimicen la generación de residuos.
Trazabilidad y digitalización	Kinnunen, P., et al. (2022)	La falta de trazabilidad sobre la composición y el historial de los relaves dificulta su reingreso seguro a la economía.	Implementar «pasaportes digitales de materiales» para los relaves, que contengan información detallada sobre su composición y faciliten su uso como recurso secundario.

En términos de marcos regulatorios, la evidencia enfatizó la necesidad crítica de desarrollar regulaciones que reclasifiquen los relaves con potencial de valorización como «materias primas secundarias» para facilitar su comercialización y utilización. Yıldız (2024) destacó la ausencia de enfoques políticos proactivos, señalando que la gestión de residuos mineros permanece predominantemente reactiva en lugar de preventiva, recomendando el desarrollo de políticas basadas en inventarios detallados y principios de «cero residuos».

Los instrumentos económicos y financieros identificados incluyen la creación de incentivos fiscales como exenciones de impuestos y créditos de carbono, junto con regulaciones más estrictas para la disposición final que incrementen el costo de la inacción. Monardes y Sepúlveda (2023) documentaron que la viabilidad económica de reprocesar presas de relaves abandonadas es alta, con potenciales de 10-15 millones USD por depósito, recomendando el uso de herramientas de análisis multicriterio para priorización gubernamental de intervenciones.

La transparencia de datos emergió como un componente fundamental de los marcos de gobernanza efectivos. Žibret et al. (2020) identificaron inconsistencias y lagunas en las bases de datos nacionales sobre residuos mineros, particularmente en información sobre composición química, dificultando la evaluación del potencial de recuperación. La recomendación central involucra establecer datos públicos obligatorios, estandarizados y accesibles para todos los depósitos de relaves, priorizando información sobre cantidades y concentraciones de metales.

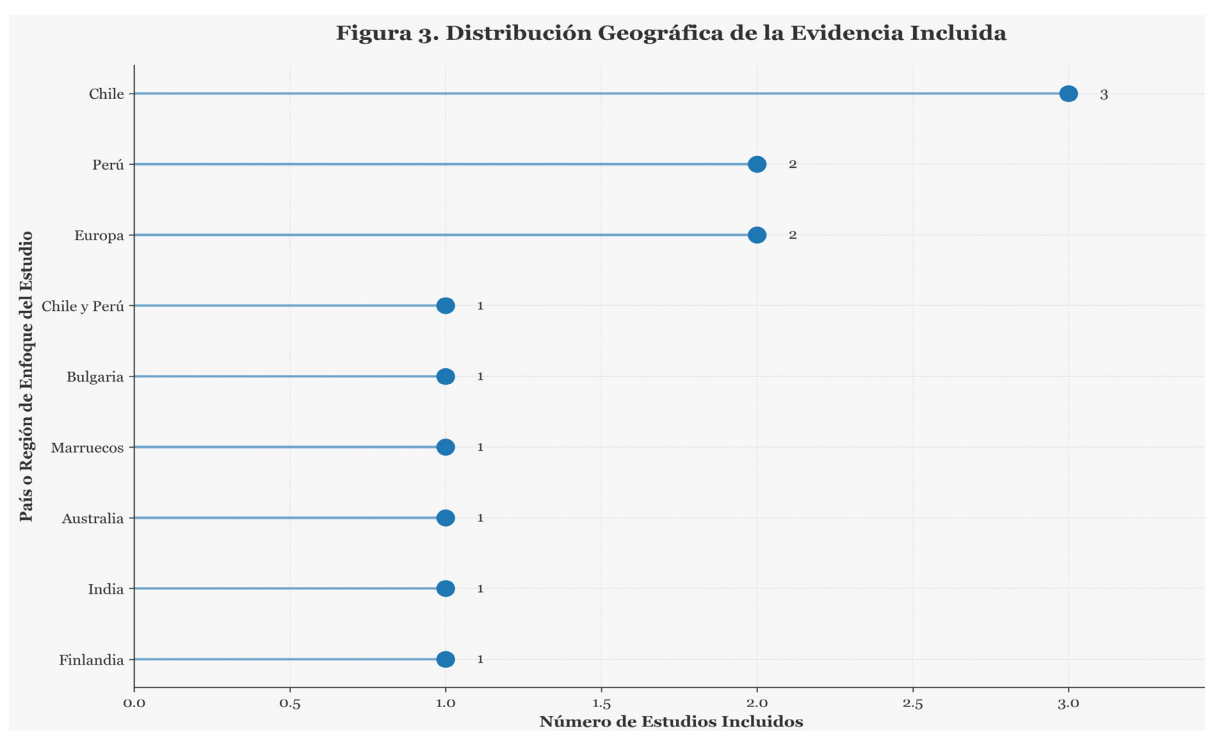


Figura 3. Distribución Geográfica de la Evidencia

Finalmente, las políticas de producción y consumo sostenible se orientan hacia la implementación de enfoques de «producción más limpia» desde las fases de diseño, como documentado por Ramírez y Muñoz (2025).

Complementariamente, Kinnunen et al. (2022) propusieron la implementación de «pasaportes digitales de materiales» para relaves, conteniendo información detallada sobre composición y facilitando su utilización como recursos secundarios en la economía circular.

DISCUSIÓN

La síntesis de evidencia derivada de esta revisión sistemática revela un patrón fundamental que caracteriza el estado actual de la gestión sostenible de relaves mineros a nivel global: mientras que las soluciones tecnológicas para la valorización de estos residuos han alcanzado niveles prometedores de viabilidad técnica y económica, el principal cuello de botella para su implementación masiva reside en la ausencia de ecosistemas integrados de políticas públicas y marcos de gobernanza que incentiven, regulen y faciliten la transición hacia modelos de economía circular en el sector extractivo.

Esta interpretación se fundamenta en la convergencia de múltiples líneas de evidencia que demuestran, por una parte, la madurez tecnológica alcanzada por diversas estrategias de valorización y, por otra, la persistencia de barreras estructurales de naturaleza predominantemente institucional. Los hallazgos reportados por Guo et al. (2025) ejemplifican la primera dimensión, documentando tasas de utilización de relaves superiores al 70% en aplicaciones de construcción, con reducciones cuantificables de emisiones de CO₂ de 72 kg/m³ y eficiencias de costo del 9.7-11%. Paralelamente, Chowdhury y Talan (2025) han demostrado la viabilidad de recuperar hasta 80% de litio mediante procesos de lixiviación ácida, estableciendo el potencial de los relaves mineros como fuente alternativa de materiales críticos para la transición energética global.

Esta evidencia de madurez tecnológica contrasta marcadamente con los hallazgos sobre persistencia de barreras institucionales documentados por Tayebi et al. (2021), quienes identificaron que las deficiencias regulatorias afectan al 40% de los proyectos de valorización, principalmente debido a la falta de claridad en la clasificación jurídica de los relaves como residuos versus recursos. Más significativamente, Gedam et al. (2021) establecieron mediante modelado estructural interpretativo que las deficiencias de gobernanza constituyen el factor causal fundamental que amplifica todas las demás barreras, incluyendo aquellas de naturaleza técnica y económica que frecuentemente se perciben como primarias.

La comparación de estos hallazgos con las conclusiones derivadas de revisiones previas en el campo refuerza la validez de esta interpretación central. Cotrina y Marquina (2025), en su análisis bibliométrico comprehensivo, documentaron que la investigación en gestión de relaves se concentra en aspectos técnicos (40%) y regulatorios (30%), pero que la conexión con el desarrollo de cadenas de valor (30%) permanece menos explorada. Esta distribución de énfasis investigativo valida empíricamente la existencia de la brecha identificada en nuestra síntesis: la desarticulación entre capacidades técnicas disponibles y marcos institucionales habilitadores.

Adicionalmente, los hallazgos de Kinnunen et al. (2022) proporcionan evidencia cuantitativa sobre el impacto económico de esta desarticulación, demostrando que marcos institucionales inadecuados pueden incrementar los costos de proyectos de valorización hasta en un 15%. Esta cuantificación del "costo de la gobernanza inadecuada" establece una base empírica sólida para argumentar que las inversiones en desarrollo institucional no constituyen gastos adicionales, sino componentes esenciales para la viabilidad económica de estrategias de economía circular.

Las implicaciones de estos hallazgos para el contexto específico de Pasco, Perú, son particularmente significativas considerando las características únicas de esta región andina. Basándose en la evidencia experimental documentada por Torres et al. (2024) en la región vecina de Junín, que demostró la viabilidad técnica y económica de utilizar relaves como áridos en construcción de carreteras con reducciones de costos del 15-20%, existe una base sólida para

argumentar que las autoridades regionales de Pasco deberían priorizar la promoción de relaves procesados en proyectos de infraestructura pública regional.

Sin embargo, la implementación exitosa de esta estrategia requiere abordar previamente las barreras institucionales identificadas en la evidencia global. Siguiendo las recomendaciones derivadas de los hallazgos de Yildiz (2024) y Žibret et al. (2020), resulta crucial que las autoridades de Pasco desarrollen primero un inventario público y estandarizado de los pasivos ambientales mineros de la región, incluyendo información detallada sobre composición química, volúmenes y potencial de valorización de cada depósito identificado.

Esta recomendación específica encuentra respaldo adicional en los hallazgos de Monardes y Sepúlveda (2023), quienes documentaron que el potencial económico de reprocesar presas de relaves abandonadas puede alcanzar 10-15 millones USD por depósito, pero que la materialización de este potencial requiere análisis de priorización basados en criterios múltiples que consideren simultáneamente viabilidad técnica, impacto ambiental, beneficio social y rentabilidad económica.

La implementación de marcos de gobernanza colaborativa emerge como otro componente crítico para el contexto de Pasco. Los hallazgos de Cacciuttolo y Atencio (2022) sobre la evolución histórica de la gobernanza de relaves en Chile proporcionan lecciones valiosas sobre la importancia de establecer acuerdos vinculantes con comunidades locales y partes interesadas para garantizar el cumplimiento efectivo de regulaciones ambientales. Esta lección resulta particularmente relevante para Pasco, donde las comunidades rurales han experimentado impactos ambientales derivados de décadas de actividad minera intensiva.

Desde una perspectiva teórica, los hallazgos de esta revisión contribuyen al avance conceptual en el campo de la economía circular aplicada al sector extractivo mediante la proposición de un modelo integrado donde las políticas públicas no constituyen factores externos que facilitan la implementación tecnológica, sino variables endógenas indispensables para el éxito de cualquier estrategia de circularidad. Este modelo teórico desafía enfoques tradicionales

que conciben la innovación tecnológica y el desarrollo de políticas como procesos secuenciales, proponiendo en su lugar un enfoque de co-evolución donde ambas dimensiones se desarrollan de manera interdependiente y mutuamente reforzada.

Las implicaciones prácticas de este modelo teórico para Pasco incluyen la necesidad de desarrollar capacidades institucionales locales que permitan la evaluación técnica, el monitoreo ambiental y la supervisión social de proyectos de valorización de relaves. La evidencia analizada por Araya et al. (2021) sobre integración de Objetivos de Desarrollo Sostenible en la gestión de relaves proporciona un marco metodológico para este desarrollo de capacidades, proponiendo un conjunto de 43 indicadores específicos para monitorear el progreso hacia metas de sostenibilidad, particularmente el ODS 12 sobre Producción y Consumo Responsables.

La evidencia sobre aplicación de biotecnología para valorización de relaves, documentada por Ordóñez et al. (2021) con eficiencias de recuperación del 70%, adquiere relevancia particular para el contexto de altitud de Pasco. Sin embargo, la sensibilidad de procesos biotecnológicos a condiciones climáticas específicas como temperatura y altitud, identificada como barrera técnica, requiere investigación adicional para adaptar estas tecnologías a las condiciones ambientales particulares de la sierra central peruana.

Las limitaciones de esta revisión deben reconocerse transparentemente para contextualizar apropiadamente sus contribuciones y delimitar su alcance interpretativo. La heterogeneidad metodológica de los estudios incluidos, que abarca desde revisiones de literatura hasta estudios experimentales y análisis de políticas, impidió la realización de metaanálisis cuantitativos que podrían haber proporcionado estimaciones consolidadas de eficiencias técnicas y económicas. Esta limitación metodológica es inherente a la naturaleza interdisciplinaria del campo de estudio, que requiere síntesis cualitativas para integrar evidencia derivada de diversas tradiciones disciplinarias.

Una limitación adicional, particularmente relevante para las recomendaciones específicas formuladas para Pasco, reside en la necesidad de extrapolar hallazgos derivados de contextos internacionales diversos al ecosistema

específico de esta región andina. Si bien se aplicaron criterios rigurosos para seleccionar evidencia relevante y se priorizaron estudios conducidos en contextos geográficos y socioeconómicos similares, la singularidad de cada sistema sociotécnico local requiere cautela en la generalización de recomendaciones. Esta limitación subraya la importancia de complementar esta síntesis de evidencia global con investigaciones primarias específicamente diseñadas para el contexto de Pasco.

CONCLUSIÓN

Esta revisión sistemática ha evidenciado que la transformación de los pasivos ambientales mineros de Pasco en activos para el desarrollo sostenible no depende de avances tecnológicos disruptivos pendientes de desarrollo, sino de la voluntad política e institucional para implementar marcos de gobernanza inteligente basados en la evidencia científica global disponible. La síntesis de 28 estudios internacionales ha demostrado que existen estrategias técnicamente viables y económicamente rentables para la valorización de relaves mineros, con eficiencias documentadas que oscilan entre 20-93% según la tecnología aplicada y potenciales económicos de 10-15 millones USD por depósito de relaves.

La evidencia convergente establece que las barreras regulatorias y de gobernanza, más que las limitaciones técnicas o económicas, constituyen los obstáculos primarios para la implementación de estrategias de economía circular en la gestión de relaves mineros. Estas barreras afectan hasta el 40% de los proyectos de valorización e incrementan los costos de implementación hasta en un 15%, configurando un ecosistema institucional que penaliza la innovación sostenible y perpetúa modelos lineales de gestión de residuos.

Para el contexto específico de Pasco, los hallazgos sugieren que las autoridades regionales deberían priorizar el desarrollo de un inventario público y

estandarizado de pasivos ambientales mineros, la promoción de relaves procesados en proyectos de infraestructura pública, y el establecimiento de marcos de gobernanza colaborativa que incluyan a las comunidades locales como actores centrales en la planificación y supervisión de estrategias de valorización. Estas recomendaciones encuentran respaldo en evidencia experimental desarrollada en regiones andinas vecinas y en marcos de política implementados exitosamente en contextos internacionales similares.

La contribución principal de esta revisión reside en la demostración empírica de que la economía circular aplicada a relaves mineros requiere enfoques sociotécnicos integrados donde las políticas públicas constituyen variables endógenas indispensables para el éxito, no factores externos facilitadores. Este marco conceptual proporciona una base sólida para el desarrollo de investigaciones primarias y políticas públicas específicamente adaptadas al contexto único de Pasco, estableciendo el mapa de ruta evidencial para iniciar la transformación de esta región hacia un modelo de desarrollo extractivo ambientalmente sostenible y socialmente inclusivo.

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>

Antony, 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://www.mdpi.com/2071-1050/16/24/11016>

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), Article 319. <https://www.mdpi.com/2076-3263/12/9/319>
- Araya, N., Ramírez, Y., Kraslawski, A., & Cisternas, L. (2021). Feasibility of re-processing 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>
- Araya, N., Mamani, O., Cisternas, L., & Kraslawski, A. (2021). Sustainable development goals in mine tailings management: Targets and indicators. *Materials Proceedings*, 5(1), 82. <https://www.mdpi.com/2673-4605/5/1/82>
- Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2022). Past, present, and future of copper mine tailings governance in Chile (1905–2022): A review in one of the leading mining countries in the world. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13060. <https://www.mdpi.com/1660-4601/19/20/13060>
- Cacciuttolo, C., & Atencio, E. (2023). In-pit disposal of mine tailings for a sustainable mine closure: A responsible alternative to develop long-term green mining solutions. *Sustainability*, 15(8), Article 6481. <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/8/6481>
- Cacciuttolo, C., Cano, D., & Custodio, M. (2023). Socio-environmental risks linked with mine tailings chemical composition: Promoting responsible and safe mine tailings management considering copper and gold mining experiences from Chile and Peru. *Toxics*, 11(5), Article 462. <https://www.mdpi.com/2305-6304/11/5/462>
- 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* (2297-8739), 2(2).
- Cotrina, M., & Marquina, J. (2025). Circular economy in the mining industry: A bibliometric and systematic literature review. *Resources Policy*, 102, Article 105513. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420725000558>
- Díaz, A., Duarte, E., & Pérez, J. (2025). *Hacia una economía circular en la operación minera*. Repository Universidad EAN. <https://doi.org/10.1234/rep.ean.2025>

- Gedam, V., Raut, R., Lopes, A., & 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>
- Guo, Y., Qu, F., & Li, W. (2025). Advancing circular economy and construction sustainability: transforming mine tailings into high-value cementitious and alkali-activated concrete. *npj Materials Sustainability*, 3(1), 8. <https://www.nature.com/articles/s44296-025-00049-9>
- Hamraoui, L., Bergani, A., Ettoumi, M., Aboulaich, A., Taha, Y., Khalil, A., Neculita, C., & Benzaazoua, M. (2024). Towards a circular economy in the mining industry: Possible solutions for water recovery through advanced mineral tailings dewatering. *Minerals*, 14(3), Article 319. <https://www.mdpi.com/2075-163X/14/3/319>
- 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>
- Koucham, M., Khalil, A., Mouhagir, L., Zouhri, L., & El Adnani, M. (2025). Comprehensive assessment of environmental behavior of mine tailings for sustainable waste management and mitigation of pollution risks. *Water*, 17(1), Article 43. <https://www.mdpi.com/2073-4441/17/1/43>
- Makhathini, T., Bwapwa, J., & Mtsweni, S. (2023). Various options for mining and metallurgical waste in the circular economy: A review. *Sustainability*, 15(3), Article 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>
- Monardes, V., & Sepúlveda, J. (2023). Multi-criteria analysis for circular economy promotion in the management of tailings dams: A case study. *Minerals*, 13(4), Article 486. <https://www.mdpi.com/2075-163X/13/4/486>
- Ordóñez, J., Wong, L., & Cortés, S. (2021). Biotecnología aplicada a la valorización de relaves mineros. En L. Cisternas, E. Gálvez, M. Rivas, & J. Valderrama (Eds.), *Economía Circular en Procesos Mineros* (pp. 63-

91). <https://www.torrossa.com/gs/resourceProxy?an=5460739&publisher=FZ9734#page=64>

Ramírez, A., & Muñoz, M. (2025). Estrategias de producción más limpia para el manejo de relaves mineros auríferos. *Producción+ Limpia*, 20(1), 18-38. <https://revistas.unilasallista.edu.co/index.php/pl/article/view/3630>

Singh, S., Maurya, P., Karmakar, A., Maurya, P., Pandey, N., Kumar, S., & Gupta, T. (2025). Mining tailings as a frontier for sustainable nanomaterials: Advancing circular economy and environmental innovation. *Environmental Geochemistry and Health*, 47(4), Article 265. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10653-025-02566-x>

Spooren, J., Binnemans, K., Björkmalm, J., Breemers, K., Dams, Y., Folens, K., & Kinnunen, P. (2020). Near-zero-waste processing of low-grade, complex primary ores and secondary raw materials in Europe: technology development trends. *Resources, Conservation and Recycling*, 160, 104919. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921344920302378>

Tayebi, M., Edraki, M., Corder, G., & Golev, A. (2021). Re-thinking mining waste through an integrative approach led by circular economy aspirations. *Minerals*, 9(5), Article 286. <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/5/286>

Torres, Y., Gonzales, R., Cotera, I., & Ruedas, D. (2024). Valorización de residuos mineros como áridos para la construcción de carreteras: Economía circular en la región andina del Perú. *Revista de Investigaciones Altoandinas – Journal of High Andean Research*, 26(2), 71-78. http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2313-29572024000200071&script=sci_arttext&tlng=pt

Yildiz, T. (2024). Considering the development levels of countries, contributions of mineral recovery from mining tailings and urban mining wastes to sustainability criteria – A review. *Resources Policy*, 99, 105399. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301420724007669>

Zaid, O., Ahmed, M., Yosri, A., & Alshammari, T. (2025). Evaluating the impact of mine tailings wastes on the development of sustainable Ultra High Performance Fiber Reinforced concrete. *Scientific Reports*, 15(1), 6285. <https://www.nature.com/articles/s41598-025-88683-0>

Žibret, G., Lemiere, B., Mendez, A., Cormio, C., Sinnett, D., Cleall, P., & Carvalho, M. (2020). National mineral waste databases as an information source for assessing material recovery potential from mine waste, tailings and metallurgical waste. *Minerals*, 10(5), 446. <https://www.mdpi.com/2075-163X/10/5/446>