

RADAR, IMÁGENES HIPERESPECTRALES Y APRENDIZAJE PROFUNDO. HERRAMIENTAS DE MONITOREO MINERO PARA EL CONO SUR AMERICANO: UNA REVISIÓN DE LA LITERATURA

RADAR, HYPERSPECTRAL IMAGING AND DEEP LEARNING. MINING-MONITORING TOOLS FOR THE SOUTHERN CONE OF AMERICA: A LITERATURE REVIEW

Beatriz Hernández¹, Vanesa Bazan², Luis Rojas³, José García³

(1) Centro de Observación de la Tierra, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor,
Santiago 8580745, Chile

(2) CONICET-IIM, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina

(3) Doctorado en Industria Inteligente, Facultad de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso,
Valparaíso 2362804, Chile
(e-mail: beatriz.hernandez@umayor.cl)

Recibido: 15/03/2024 - Evaluado: 20/05/2024 - Aceptado: 15/06/2024

RESUMEN

La presente investigación examina, mediante un proceso de varias fases consecutivas (identificación, selección y síntesis crítica), el rol de la teledetección y el análisis avanzado de datos en minería. Se analiza cómo sensores hiperspectrales, UAV o radar se aplican a la detección de disturbios mineros, drenaje ácido y deforestación, integrados con enfoques socioambientales que impulsan la restauración ecológica. A partir de la evidencia compilada, se reconoce la relevancia de metodologías colaborativas y herramientas computacionales (big data, aprendizaje profundo) para optimizar la toma de decisiones. Como hallazgo fundamental, se constata que la minería inteligente puede conciliar productividad y conservación de servicios ecosistémicos, siempre que exista coordinación entre ciencia, industria y gobernanza local para el seguimiento continuo y la mitigación oportuna de impactos.

ABSTRACT

This research examines, through a process of several consecutive phases (identification, selection and critical synthesis), the role of remote sensing and advanced data analysis in mining. It analyzes how hyperspectral sensors, UAV or radar are applied to the detection of mining disturbances, acid drainage and deforestation, integrated with socio-environmental approaches that drive ecological restoration. From the evidence compiled, the relevance of collaborative methodologies and computational tools (big data, deep learning) to optimize decision making is recognized. A key finding is that smart mining can reconcile productivity and conservation of ecosystem services, provided that there is coordination between science, industry and local governance for continuous monitoring and timely mitigation of impacts.

Palabras clave: teledetección, minería inteligente, servicios ecosistémicos, datos masivos

Keywords: remote sensing, smart mining, ecosystem services, big data

INTRODUCCIÓN

La industria minera cumple un rol estratégico en la economía global al proveer materias primas esenciales para diversos sectores productivos. Sin embargo, la creciente demanda de recursos minerales y metales ha intensificado la presión sobre los ecosistemas, originando problemáticas como la deforestación, la contaminación de suelos y aguas, la emisión de gases de efecto invernadero y la alteración de comunidades locales (Singla, 2021; Sorooshian, 2025). Estas consecuencias demandan un abordaje multidisciplinar que combine tecnologías de monitoreo a gran escala, metodologías de análisis robustas y directrices de gobernanza ambiental.

En este contexto, las técnicas de observación remota han adquirido gran protagonismo debido a su capacidad para captar información continua y multiespectral de extensas regiones mineras, superando así limitaciones de los levantamientos de campo tradicionales (He *et al.*, 2023; Wu *et al.*, 2023). Adicionalmente, la exploración de datos espaciales con algoritmos de inteligencia artificial (aprendizaje profundo y modelos de Big Data) ha acelerado la identificación de patrones críticos, tales como la detección de disturbios vegetales, subsidencias en minas subterráneas o la localización precisa de drenaje ácido (He *et al.*, 2024; Tolentino *et al.*, 2025). Pese a estos avances, siguen existiendo brechas de conocimiento respecto de cómo integrar efectivamente estas tecnologías en los procesos de recuperación ecológica y planificación de cierre minero, así como en la definición de un marco regulatorio que promueva la minería sostenible (Stevens & Dixon, 2017).

Se busca profundizar en el rol de la teledetección y las tecnologías digitales en la minería moderna, ofreciendo una visión integradora que no sólo abarque la dimensión técnica de la monitorización, sino también los aspectos regulatorios, sociales y ambientales que inciden de manera decisiva en la sostenibilidad de este sector.

METODOLOGÍA

La revisión sistemática se desarrolló y reportó siguiendo los lineamientos del PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*). A continuación, se presenta una visión global del procedimiento, seguida de la descripción detallada de cada etapa. La búsqueda bibliográfica se realizó en las bases de datos *Scopus* y *Web of Science* (WoS); posteriormente se aplicaron filtros predefinidos que refinaron el conjunto inicial de registros. Los criterios de inclusión y exclusión garantizaron la pertinencia temática y el rigor metodológico. El flujo de trabajo se resume en la Figura 1. Tras la recuperación, las referencias se fusionaron y depuraron para eliminar duplicados y documentos de baja calidad; luego se efectuó una lectura en texto completo con control de calidad. La validación experta aseguró la coherencia del corpus. Una vez validado el conjunto, se aplicaron técnicas de Procesamiento del lenguaje natural (*Natural Language Processing* (NLP) para agrupar los documentos y detectar tendencias emergentes (Garcia *et al.*, 2022; Sánchez-Garrido *et al.*, 2023).

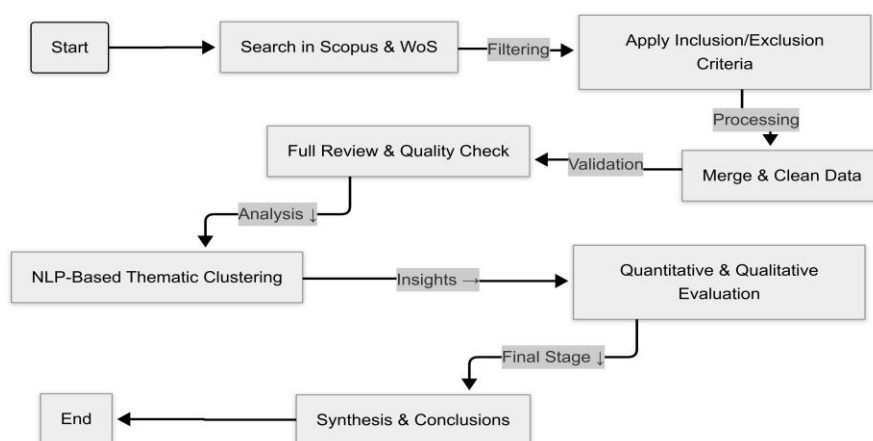


Fig. 1: Flujograma general del proceso de revisión sistemática (Martinez *et al.*, 2025)

Se completó luego una evaluación cuantitativo-cualitativa combinada que analizó la distribución temática, identificó vacíos de investigación y evaluó las principales contribuciones metodológicas. La última etapa sintetizó los hallazgos y formuló las conclusiones. Este enfoque estructurado, transparente y reproducible garantizó una evaluación robusta y exhaustiva de la literatura sobre teledetección aplicada a la minería.

Búsqueda y Recuperación de Documentos

Las búsquedas se ejecutaron en Scopus y WoS bajo criterios predefinidos. La estrategia integró términos consolidados (p. ej. *remote sensing*, *mining*, *Landsat*) y conceptos emergentes (p. ej. *Google Earth Engine*, *hyperspectral imaging*, *ecological restoration*), resultando en la siguiente ecuación:

```
( "remote sensing" OR "satellite" OR "UAV" OR "hyperspectral"
OR "InSAR" OR "multispectral" OR "LiDAR" ) AND
( "mining" OR "mine site" OR "gold mining" OR "coal mining"
OR "artisanal mining" OR "rehabilitation" OR "reclamation" ) AND ( "monitoring" OR "mapping" OR "assessment"
OR "change detection" OR "ecological restoration" OR "environmental impact" ).
```

Se implementaron las siguientes estrategias de mejora:

- *Expansión semántica y análisis de sinónimos*: se empleó un tesoro temático para incorporar variantes lingüísticas y acrónimos (p. ej. *GEE*, *NDVI*).
- *Filtros temporales y de calidad*: se priorizaron artículos entre 2015-2025 publicados en revistas Q1/Q2.
- *Refinamiento booleano iterativo*: se ajustaron operadores lógicos para mantener coherencia temática y capturar términos emergentes detectados en la nube de palabras (se muestran en la Figura 7).

Fusión y Depuración de Registros

Los resultados de Scopus y WoS se fusionaron en una base unificada. Los duplicados se eliminaron con base en DOI, título y autoría. Los criterios aplicados fueron:

- **Inclusión**: artículos revisados por pares, en inglés o español, centrados en teledetección de impactos mineros, publicados 2015-2025 y con acceso completo.
- **Exclusión**: documentos sin DOI verificable, resúmenes de congreso sin versión extendida, y estudios ajenos a minería o teledetección ambiental.

Dos revisores evaluaron de forma independiente los títulos y resúmenes; las discrepancias se resolvieron por consenso con un tercer revisor. No se usaron herramientas automáticas de cribado.

Análisis Temático Mediante NLP y Validación Experta

El análisis textual se apoyó en *tokenización*, lematización, eliminación de palabras vacías y normalización léxica. Se aplicaron *LDA* y agrupamiento *BERT-based* para obtener clusters preliminares, refinados luego por cuatro especialistas en geociencias y teledetección minera. El proceso completo se ilustra en la Figura 2.

Revisión Completa y Selección Validada

Cada documento se valoró según:

- *Calidad metodológica*: sensores empleados, resolución, validación in situ.
- *Aplicabilidad*: pertinencia para monitoreo ambiental, rehabilitación y gestión minera.
- *Rigor analítico*: estadísticos, modelado espacial y reproducibilidad.

Sólo los trabajos que cumplieron con la clasificación NLP y la revisión experta pasaron a los análisis subsiguientes. (García *et al.*, 2022; Sánchez-Garrido *et al.*, 2023)

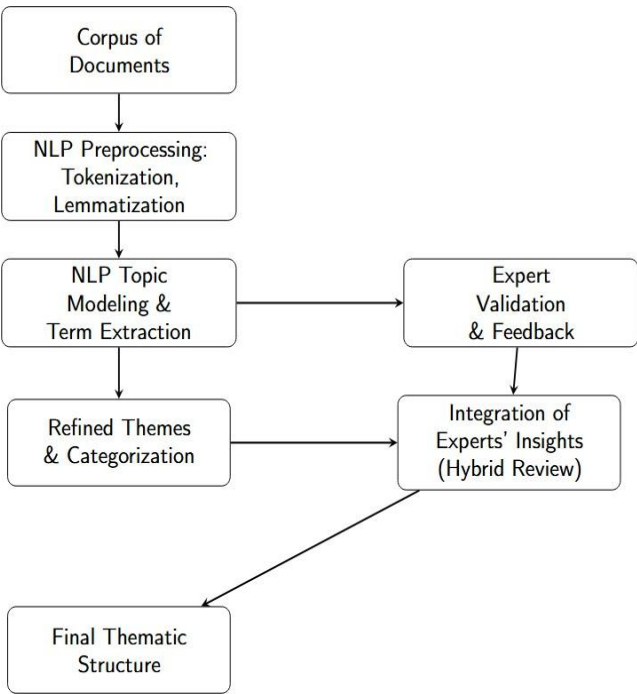


Fig. 2: Flujo detallado del análisis temático con NLP y revisión experta.

Análisis Cuantitativo: Métricas y Visualizaciones

En las Figuras 3–6 se muestran los principales indicadores considerados para este estudio.

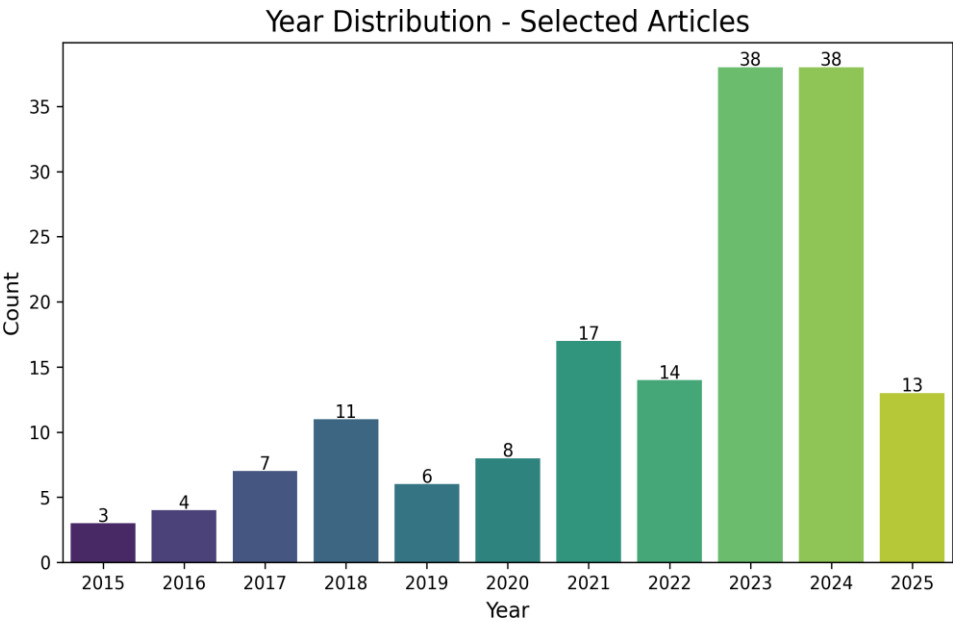


Fig. 3: Distribución anual de publicaciones seleccionadas (2015-2025).

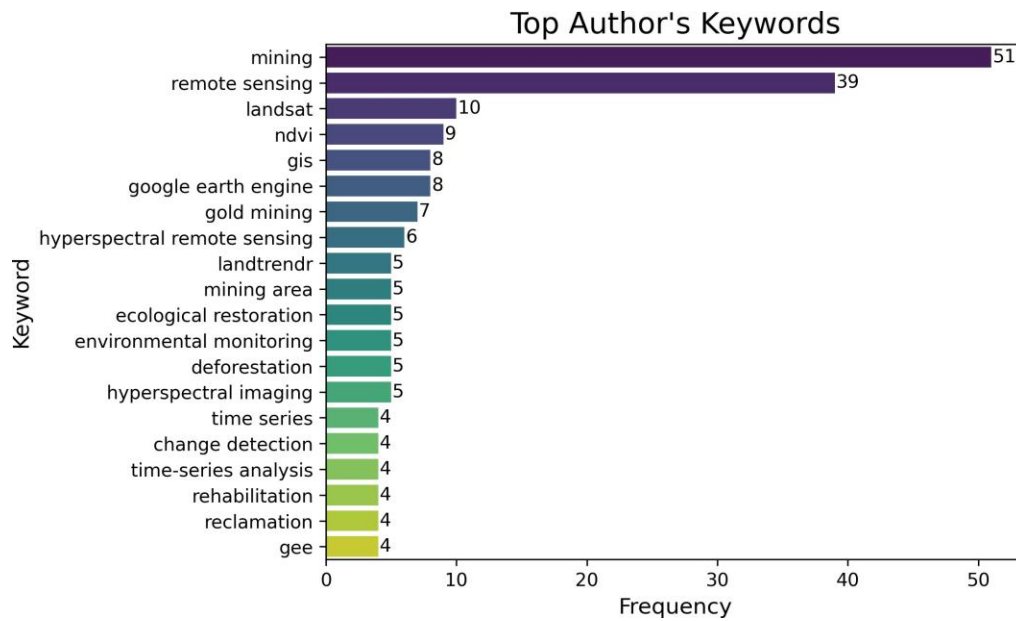
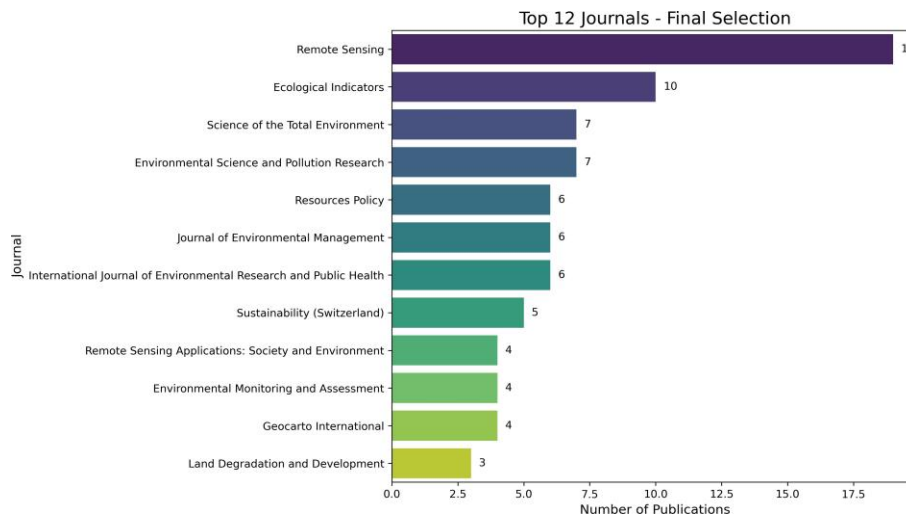


Fig. 4: Palabras clave de autor más frecuentes en el corpus.

Author Contributions Over Time



Fig. 5: Colaboraciones de autor a lo largo del tiempo; el tamaño del punto indica la producción en cada año.



Los resultados muestran un *crecimiento exponencial* de publicaciones desde 2021, con predominio de revistas Q1 como *Remote Sensing* y *Ecological Indicators*. Las palabras clave revelan la convergencia entre *remote sensing*, *NDVI*, *Landsat* y procesos como *rehabilitation* y *ecological restoration*. La red de coautoría evidencia núcleos productivos en China, India y Australia, liderados por investigadores como Zhang Y. y Xiao.

Análisis Cualitativo y Meta-Síntesis

1. Monitoreo de disturbios y subsistencia: uso de *LandTrendr* e *InSAR* para detectar subsidencias y hundimientos.
2. Evaluación ecológica: índices como *MSEEI* y métricas de servicios ecosistémicos para valorar la restauración.
3. Detección de actividades ilegales: algoritmos SAR y aprendizaje profundo para alertas casi en tiempo real.
4. Tendencias tecnológicas: integración de *GEE*, drones hiperespectrales y computación en la nube.

Síntesis Final

La triangulación de evidencias bibliométricas con el análisis cualitativo permitió:

- Definir *cuatro clústeres temáticos* robustos que estructuran la discusión.
- En la sección Hallazgos se detectan *oportunidades emergentes*, por ejemplo, el uso de *Deep Learning (Aprendizaje profundo)* en monitoreo de drenajes ácidos.
- Formular un *roadmap* de investigación adaptado a los desafíos de la minería en Chile, enfatizando monitoreo en zonas áridas, gestión de relaves y restauración post-cierre.

La metodología aplicada garantiza replicabilidad y facilita la actualización periódica de la RSL ante la rápida evolución tecnológica del sector minero.

SÍNTESIS DE LOS HALLAZGOS

En esta sección se sintetizan los principales hallazgos derivados de la revisión sistemática efectuada sobre la aplicación de técnicas de teledetección y análisis espectral en entornos mineros. A partir de la literatura recopilada, se identificaron diversos enfoques metodológicos y tecnológicos que permiten monitorear, diagnosticar y proyectar el impacto de la minería en el entorno biofísico, así como cuantificar efectos socioambientales y promover prácticas sostenibles. Para estructurar estos hallazgos, se han definido varios tópicos de análisis, cada uno con sus respectivas referencias.

Síntesis de los Hallazgos Cluster 1

Tópico 1: Aplicaciones UAV/Hiperspectrales para Monitoreo Minero

Las tecnologías de Vehículos Aéreos No Tripulados (UAV) equipados con cámaras multi o hiperspectrales han permitido cartografiar y discriminar materiales y cubiertas vegetales con un alto grado de detalle en sitios mineros. Esto facilita la identificación de patrones de contaminación, alteraciones mineralógicas y áreas de drenaje ácido (AMD). Por ejemplo, el uso de drones para caracterizar la contaminación superficial en minas de uranio ha ofrecido mapas confiables de la distribución de minerales reactivos en el ambiente (Tolentino *et al.*, 2025). Asimismo, la discriminación de drenaje ácido en la minería de carbón ("stone coal") se ha fortalecido con la clasificación de imágenes UAV de muy alta resolución mediante métodos como SVM, RF y U-Net (Kou *et al.*, 2023). Otros estudios implementan MATLAB y machine learning para estimar concentraciones de fases minerales, combinando imágenes hiperspectrales en VNIR–SWIR con análisis químicos (Okada *et al.*, 2024). De forma paralela, el levantamiento UAV es trascendental en monitoreo de restauración de áreas perturbadas y rehabilitación ecológica en minas a cielo abierto, ya sea para capturar la estructura 3D del terreno o para estimar parámetros de vegetación (Chen *et al.*, 2024; Meng *et al.*, 2024; García, 2025; Orellana, 2024).

Tópico 2: Índices Espectrales y Evaluación Ecológica en Zonas Mineras

La segunda línea recurrente aborda la generación o uso de índices espectrales para calificar el estado ecológico o la degradación ambiental. Un claro ejemplo es el desarrollo de índices específicos como el Mine-Specific Eco-Environment Index (MSEEI) y otros modelos de decisión multi-índice (Zhang *et al.*, 2023; Michałowska *et al.*, 2024). Estas aproximaciones responden a la necesidad de distinguir impactos mineros de otros factores antrópicos, integrando información de temperatura, humedad del suelo, atenuación atmosférica e incluso la escala de la explotación (Zang *et al.*, 2025; Chen *et al.*, 2023). Adicionalmente, el uso de Landsat y Sentinel-2 para derivar indicadores ecológicos ha mostrado versatilidad en el análisis de vegetación, así como en la evaluación de la salud de áreas reclamadas (Padmanaban *et al.*, 2017; Pan *et al.*, 2022; Li *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2024; Song *et al.*, 2023). Lo anterior refuerza la viabilidad de la teledetección como soporte para la planificación de la restauración y para el seguimiento continuo de la sostenibilidad en la minería (Song *et al.*, 2024; Xulu *et al.*, 2021).

Tópico 3: Monitoreo de la Cobertura Vegetal y Reforestación

El uso de imágenes multiespectrales e hiperspectrales para cuantificar cambios en la cobertura vegetal es un tema transversal en varios estudios. Las aplicaciones incluyen tanto zonas de minería de carbón en China (Sun *et al.*, 2024;

Wu *et al.*, 2018), la evaluación de deforestación asociada a minería aurífera en la Amazonía (Asner & Tupayachi, 2017; Daichendt *et al.*, 2025; Lobo *et al.*, 2015), como el análisis de la dinámica y fragmentación de bosques (Ranjan & Gorai, 2024; Joy *et al.*, 2024). Resulta crítico comprender estas pérdidas de biomasa para estimar emisiones de CO₂ o impactos en la biodiversidad, así como para orientar políticas de reforestación. Asimismo, múltiples estudios han desarrollado protocolos de clasificación y nuevos índices (p.ej., NDVI modificado, FCD) para distinguir la vegetación afectada por explotaciones mineras (Mukherjee *et al.*, 2019; Rosikin *et al.*, 2023). Adicionalmente, la integración de técnicas de LiDAR y aprendizaje profundo para cartografiar rehabilitaciones post-mineras en bosques secos ha sido probada en proyectos de minería de bauxita (Murray *et al.*, 2022), evidenciando cómo la vegetación se recupera estructural y funcionalmente tras las intervenciones de restauración (Yang *et al.*, 2022; Kayet *et al.*, 2020; Kayet *et al.*, 2024). Para lo anterior es válido poder desarrollar modelos matemáticos basados en sistemas caóticos los cuales pueden mejorar no solo este aspecto sino en todos los contenidos de esta RSL (Rojas *et al.*, 2025a)

Tópico 4: Detección de Perturbaciones, Hundimientos y Fisuras

Otro tópico destacado versa sobre los métodos para detectar perturbaciones del terreno, movimientos de ladera y fisuras mineras. El empleo de algoritmos LandTrendr y series temporales de Landsat ha permitido identificar la dinámica de disturbios y recuperación en la vegetación (Yang *et al.*, 2018; Wu *et al.*, 2021; Guo *et al.*, 2022). Del mismo modo, estudios basados en análisis de subsistencia del terreno mediante InSAR y UAV han servido para ubicar hundimientos y fracturas inducidas por la minería subterránea (Peng *et al.*, 2024; Xia *et al.*, 2023). La incorporación de metodologías que combinan fotogrametría de drones con técnicas de visión por computadora se ha mostrado eficaz para identificar grietas superficiales y modelar su evolución (Fu *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2024). Todo ello se orienta a la prevención de riesgos geotécnicos y la integración de dicha información en planes de cierre o mitigación (Jiang *et al.*, 2024; Zhao *et al.*, 2021).

Tópico 5: Monitoreo de Calidad de Agua y Acid Mine Drainage (Drenaje ácido en la minería)

La contaminación de cursos de agua y embalses es una de las grandes preocupaciones ambientales derivadas de la minería. Diversos estudios se han centrado en caracterizar y delimitar zonas afectadas por drenaje ácido (AMD) (Kou *et al.*, 2023; Chalkley *et al.*, 2023; Song *et al.*, 2023) o en cuantificar la turbidez y concentraciones de sedimentos en ríos impactados por incidentes mineros (García Millán *et al.*, 2018; Rudorff *et al.*, 2018; Ruppen *et al.*, 2023). Así, la perspectiva multiespectral y en ocasiones hiperspectral (p.ej., Sentinel-2, Landsat-8, UAV RGB) facilita la detección de fuentes de contaminación y la evaluación de costos ecológicos (Ammirati *et al.*, 2022; Becerra *et al.*, 2024). Tales aproximaciones también permiten calcular la huella espacial de derrames de relaves (Hao *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2024), como el caso de la catástrofe en la Cuenca del Río Doce o en la República Democrática del Congo (Rudorff *et al.*, 2018; Ruppen *et al.*, 2023), evidenciando el potencial de la teledetección para la gestión de emergencias ambientales.

Tópico 6: Minerales Críticos, Suelos y Metales Pesados

En la minería de tierras raras o de metales estratégicos (litio, cobalto, etc.), la teledetección espectral permite distinguir firmas mineralógicas complejas y modelar la distribución de elementos potencialmente tóxicos (Salomidi *et al.*, 2024; Kirsch *et al.*, 2023; Brown *et al.*, 2022). Tales aplicaciones resultan cruciales no solo para la exploración geológica, sino también para prevenir la contaminación de suelos con PTE (Potentially Toxic Elements). Además, la modelación espectral se ha extendido a la cuantificación de C orgánico (SOC) y metales pesados en suelos rehabilitados (Dong *et al.*, 2016; Peng *et al.*, 2024; Tepanosyan *et al.*, 2023). Investigaciones demuestran que técnicas como la espectroscopía hiperspectral, la fusión con datos de campo y los algoritmos de machine learning posibilitan la estimación confiable de propiedades del suelo y la cartografía de riesgos metalúrgicos (He *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2023; Li *et al.*, 2022).

Tópico 7: Nuevos Métodos de Geominería, IA y Perspectivas Sustentables

Finalmente, diversos autores destacan la irrupción de algoritmos de inteligencia artificial y de metodologías escalables en el análisis minero. El prospectivity mappin (Prospección de Área) soportado en GIS, geoespaciales e indicadores geoquímicos se ha aplicado con éxito en cupríferos y oro aluvial (Abedini *et al.*, 2023; Echogdali *et al.*, 2022;

Adams & Hayakawa, 2025). La combinación de muestreos geoquímicos, técnicas espectrales y machine learning (CNN, Random Forest, Gradiente Boosting) potencia la precisión en la exploración y en la evaluación del potencial de yacimientos minerales (Demattê *et al.*, 2018; He *et al.*, 2023; Garcia *et al.*, 2025; Rojas *et al.*, 2025b). Este enfoque también promueve la adopción de prácticas de minería sostenible, pues optimiza la toma de decisiones y la reducción de impactos socioambientales (Ang *et al.*, 2023; Orimoloye & Ololade, 2020; Ang *et al.*, 2021). En esa línea, se han delineado protocolos de minería responsable integrados con teledetección y con evaluaciones del balance de carbono y servicios ecosistémicos (Wang *et al.*, 2020; Li *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2022). Todo ello confluye en la esperanza de robustecer la transparencia y la gestión ambiental en la industria minera global.

En síntesis, la diversidad de estudios y enfoques metodológicos evidencia que las técnicas de teledetección, tanto multispectrales como hiperespectrales, son hoy herramientas esenciales para abordar la compleja dinámica medioambiental asociada a la minería. Su aplicación va desde la detección temprana de contaminantes y fisuras superficiales, pasando por la clasificación de coberturas vegetales y la evaluación del éxito de la restauración, hasta la prospectiva de nuevos yacimientos mediante análisis espectral avanzado. En conjunto, estos hallazgos sugieren una tendencia creciente al uso de sensores de mayor resolución espacial y espectral, así como la incorporación de algoritmos de inteligencia artificial para generar un mayor valor analítico y una minería más sostenible. En este *cluster* subraya la relevancia de la teledetección y las metodologías hiperespectrales/multiespectrales como eje fundamental para optimizar los diagnósticos ambientales, apoyar la restauración ecológica y fortalecer la planificación de proyectos mineros. Pese a la diversidad de entornos y minerales analizados, prevalece la confluencia de resultados que apuntan a la eficiencia y eficacia de la observación remota para conciliar productividad económica y protección ambiental, en línea con los objetivos globales de desarrollo sostenible.

Síntesis de los Hallazgos Cluster 2

La comprensión de los aspectos legales, socioambientales y políticos en el sector minero contemporáneo se ha convertido en un factor crítico para la transición hacia modelos de minería sostenible. En la literatura especializada existe un creciente interés en analizar cómo las regulaciones, las tecnografías de "Green Mining" (Minería Verde), las implicaciones socioeconómicas y la exploración de nuevas fronteras mineras (incluyendo la minería espacial y submarina) influyen en la gobernanza y en los impactos globales del rubro. A continuación, se presentan los principales hallazgos, organizados en tópicos temáticos que integran los estudios más representativos de este *cluster* bibliográfico.

Tópico 1: Marco Político y Políticas de Sostenibilidad en la Minería

Los estudios analizados evidencian que las brechas entre el conocimiento científico y la formulación de políticas públicas pueden obstaculizar los esfuerzos de restauración y sostenibilidad en zonas mineras. Por ejemplo, se ha identificado que existe un "*nexo ciencia-política ausente (void)*" que conduce con frecuencia al fracaso de la rehabilitación ambiental a escala global, generando un escenario en el que, aunque se reconozcan las afectaciones ecológicas, las soluciones no prosperan por la falta de coordinación gubernamental y ausencia de mecanismos regulatorios efectivos (Stevens & Dixon, 2017). En paralelo, investigaciones que examinan la legislación minera en países en vías de desarrollo, como la India, destacan la evolución de marcos jurídicos con disposiciones para la rehabilitación de tierras y la adopción de prácticas eco-amigables (Singla, 2021). Estas reformas, sin embargo, necesitan un cumplimiento estricto para transformar la práctica minera cotidiana y corregir las fallas de mercado y externalidades ambientales.

Tópico 2: Green Mining y Restauración Ecológica

En los últimos años, el concepto de *green mining* ha cobrado relevancia como estrategia integral que combina innovaciones tecnológicas, planes de rehabilitación y evaluación de los servicios ecosistémicos (Wu *et al.*, 2023). Dicho enfoque promueve, entre otras cosas, la minimización del uso de agua y energía en las operaciones mineras, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el resguardo de la diversidad biológica. Estudios recientes han subrayado el papel crítico de la restauración ecológica, evaluando la "*verdadera magnitud*" de la rehabilitación mediante indicadores de producción ecológica y análisis de valoración económica de los servicios ecosistémicos

(Gao *et al.*, 2024). De este modo, se busca trascender la simple recuperación física del terreno y avanzar hacia la recuperación funcional de los ecosistemas, integrando mecanismos de *input-output* para identificar costos y beneficios tangibles de las intervenciones ambientales.

Tópico 3: Implicaciones Socioambientales e Impactos Globales

Varios trabajos resaltan el carácter multidimensional de los impactos mineros, teniendo implicaciones que van más allá de lo meramente ecológico y afectan dimensiones sociales, económicas y culturales. Investigaciones en Indonesia muestran cómo la proliferación de concesiones mineras de carbón mal gestionadas propicia deforestación, superposiciones con asentamientos humanos y un esquema de infracciones que repercute en graves riesgos para las comunidades locales (Werner *et al.*, 2024). En la minería artesanal de oro, se registran impactos significativos en el desarrollo económico local, pero también se evidencian desafíos en el cumplimiento de normativas socioambientales y la mitigación de contaminantes (Yu *et al.*, 2024). Así mismo, el análisis global sugiere que la actividad minera es también determinante para la degradación de la biodiversidad en cuerpos de agua dulce, subrayando la necesidad de priorizar la conservación de la integridad de las cuencas (Brabant *et al.*, 2025). Sumado a ello, la propuesta de soluciones socioambientales integradas —con bases cuantitativas y participación de stakeholders— demuestra ser un factor clave para mejorar la percepción y gestión de la minería en escalas regionales (Sorooshian, 2025).

Tópico 4: Nuevas Fronteras de la Extracción: Minería Espacial y Comparaciones con la Minería Submarina

Las perspectivas de ampliar la frontera minera más allá de la superficie terrestre, tanto en los fondos oceánicos como en asteroides u otros cuerpos celestes, han comenzado a discutirse con mayor énfasis en la literatura reciente. En el plano de la minería espacial, se observa que la opinión pública, aunque tiende a considerar más aceptable la extracción de recursos fuera de la Tierra, también implica dudas sobre los potenciales daños en ecosistemas extraterrestres o la expansión de los problemas locales a escala astronómica (Hornsey *et al.*, 2022). A su vez, la comparación entre la minería submarina en aguas profundas y la minería convencional en tierra arroja un marco analítico para entender cómo reducir el riesgo ecosistémico, definiendo umbrales de impacto y lineamientos para la sostenibilidad (Metaxas *et al.*, 2024; León *et al.*, 2025). El reto, por ende, radica en generar regulaciones internacionales y protocolos de gobernanza que anticipen el desarrollo de estas tecnologías y protejan tanto los recursos planetarios como el equilibrio interplanetario y/o marino.

En conclusión, la literatura recogida en este segundo grupo de estudios enfatiza la necesidad de abordar la minería a través de un prisma de políticas públicas robustas, alianzas interinstitucionales y un entendimiento integral de sus impactos socioambientales. Los avances conceptuales en minería verde (*green mining*), la importancia de la restauración ecológica con mediciones económicas tangibles y la aparición de nuevas áreas de explotación (submarina o espacial) demandan normativas actualizadas y una gobernanza más proactiva. Bajo esta perspectiva, la interacción entre ciencia, política y sector privado se perfila como un eje esencial para que la minería del presente y futuro sea verdaderamente sostenible y se alinee con la protección de los ecosistemas locales y globales.

En la Tabla 1 se muestra una síntesis de aplicaciones emergentes en teledetección y tecnologías digitales aplicadas al entorno minero, describiendo los aspectos principales de cada propuesta o técnica. Se incluye la fase del proceso minero donde se usa (exploración, extracción, rehabilitación, etc.) y los beneficios potenciales que aporta. Se destacan principalmente:

- *Drones Hiper/Multiespectrales*: Permiten lograr una caracterización sumamente detallada de la superficie, tanto de la mineralización como de la cobertura vegetal.
- *Aprendizaje Profundo (Deep Learning)*: Automatiza tareas de reconocimiento y clasificación de minerales, sumado a la posibilidad de detectar anomalías (fisuras, subsidencias, etc.) en tiempo récord.
- *Indicadores de Servicios Ecosistémicos*: Facilitan la toma de decisiones para restauración ecológica y la evaluación económica de los esfuerzos de recuperación.
- *InSAR e Imágenes SAR*: Realizan un monitoreo continuo de la deformación del terreno para evitar desastres en minas subterráneas o a cielo abierto.
- *Big Data y Computación en la Nube*: Favorecen un análisis integrado y rápido de ingentes volúmenes de datos multifuente.
- *Minería Espacial/Submarina*: Abre la discusión sobre la expansión de la frontera extractiva más allá de

los límites convencionales, con implicaciones regulatorias y tecnológicas.

- *Sensores Portátiles:* Confieren inmediatez en la caracterización geoquímica, posibilitando ajustes operativos instantáneos en extracción o control de ley.

Estos elementos resultan especialmente relevantes para la minería chilena, dada la importancia estratégica del cobre y otros metales para la economía nacional y la creciente presión internacional por una minería más responsable y sostenible.

Tabla 1: Aplicaciones emergentes de teledetección y tecnologías avanzadas en minería, resaltando la fase del proceso minero y sus beneficios potenciales

Aplicación	Descripción	Fase del Proceso	Beneficios Potenciales	Referencias
Drones hiperespectrales/multiespectrales	UAV con sensores VNIR–SWIR para cartografiar mineralizaciones, vegetación y drenaje ácido	Exploración & Monitoreo	Resolución centimétrica y cobertura rápida; detección temprana de contaminación o inestabilidad en relaves	Tolentino <i>et al.</i> (2025); Kou <i>et al.</i> (2023)
Aprendizaje profundo (Deep Learning)	Redes neuronales para clasificar minerales, predecir subsidencias y estimar concentraciones metálicas	Evaluación geotécnica y Operativa	Automatiza tareas de reconocimiento geológico; mejora la precisión de predicción frente a métodos tradicionales	Okada <i>et al.</i> (2024); Liu <i>et al.</i> (2024)
Indicadores de servicios ecosistémicos	Cálculo de <i>índices</i> (p. ej. MSEEI) que cuantifican la pérdida o recuperación de servicios ecosistémicos	Rehabilitación & Cierre	Valoración económica de la restauración; priorización eficiente de pasivos ambientales	Zhang <i>et al.</i> (2023); Gao <i>et al.</i> (2024)
InSAR e imágenes SAR	Interferometría de microondas satelital para detectar subsidencia, fracturas y cambios topográficos	Extracción subterránea & Control geotécnico	Monitoreo continuo a gran escala; prevención de riesgos y mejora de la seguridad operativa	Peng <i>et al.</i> (2024); Xia <i>et al.</i> (2023)
Big Data y computación en la nube	Procesamiento masivo de datos multispectrales, Li-DAR y geoquímicos en plataformas GEE/HPC	Exploración, Planificación & Monitoreo	Toma de decisiones acelerada; reducción de costos de gestión de datos; colaboración interdisciplinaria	He <i>et al.</i> (2023); Ang <i>et al.</i> (2021)
Minería espacial / submarina	Prospección de asteroides y fondos oceánicos profundos con sensores hiperespectrales y robótica	Exploración futura	Disminuye presión sobre ecosistemas terrestres; obtención de metales críticos (Ni, Co, Ti)	Hornsey <i>et al.</i> (2022); Metaxas <i>et al.</i> (2024)
Sensores portátiles de reconocimiento rápido	Equipos XRF, LIBS y espectrometría de campo para caracterización geoquímica <i>in situ</i>	Extracción & Control de ley	Ajustes operativos en tiempo real; gestión precisa de leyes de mineral	He <i>et al.</i> (2024); Tepanosyan <i>et al.</i> (2023)

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El análisis integral de la literatura revisada permitió reunir evidencias empíricas y diversos estudios de caso sobre aplicaciones de teledetección, restauración ecológica y aspectos de gobernanza que convergen en el *sector minero*. Para asegurar la calidad y pertinencia de los documentos analizados, se realizaron etapas de identificación

bibliográfica, filtrado y evaluación crítica en sucesivas fases. Con ello, se conformó un conjunto definitivo de artículos y reportes técnicos sometidos a lectura y codificación. A continuación, se exponen los hallazgos más significativos, así como su interpretación a la luz de la discusión científica reciente.

Etapas de Identificación y Sintetización. En la fase inicial se identificaron numerosas contribuciones sobre técnicas espectrales (multiespectrales, hiperespectrales, UAV, SAR), de las cuales se excluyeron aquellas carentes de revisión crítica o con escasa aplicabilidad minera. Este proceso delimitó un corpus que abarcó tanto casos de estudio en explotaciones a cielo abierto (e.g., mapear drenaje ácido) como ejemplos de minería subterránea enfocados en la detección de inestabilidades o hundimientos (Peng *et al.*, 2024; Xia *et al.*, 2023; He *et al.*, 2023; Tolentino *et al.*, 2025). Con posterioridad, se cruzaron referencias a escalas globales y regionales para contrastar la diversidad de entornos mineros (Hornsey *et al.*, 2022; Metaxas *et al.*, 2024).

Consolidación de la Evidencia. Tras verificar la validez de cada reporte, se concentraron aquellos estudios con métodos robustos para la evaluación de los *impactos medioambientales* (p.ej. drenaje ácido de mina, deforestación) y la gestión sostenible (minería verde, rehabilitación ecológica). Fue así cómo se identificó la importancia creciente de indicadores o índices (MSEI, RSEI, etc.) que permiten cuantificar la pérdida o la restauración de servicios ecosistémicos (Zhang *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2024). Igualmente, se evidenció la adopción de machine learning para diagnosticar patrones de perturbación y optimizar procesos mineros (Okada *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024).

Resultado de la Inclusión Final. Como producto del proceso de refinamiento, los artículos y reportes incluidos ofrecen perspectivas diversas: 1) evaluaciones multiespectrales y UAV en relación con la sostenibilidad y la restauración, 2) aportes sobre gobernanza y regulación para minimizar violaciones o infracciones en permisos mineros, y 3) estudios que examinan la expansión de la frontera minera a entornos no convencionales, planteando una discusión sobre la protección de ecosistemas críticos (Werner *et al.*, 2024; Sorooshian, 2025; Hornsey *et al.*, 2022).

Discusión de los Hallazgos

Complementariedad de Técnicas de Teledetección. La revisión sistemática realizada confirma la convergencia de sensores hiperespectrales, análisis UAV y algoritmos de inteligencia artificial para robustecer las tareas de exploración y monitoreo en minería. Por una parte, la teledetección satelital en bandas VNIR–SWIR, reforzada con datos de radar (InSAR), resulta crítica para la detección de subsidencias y zonas de inestabilidad geotécnica (Peng *et al.*, 2024; Xia *et al.*, 2023). Por otra, los drones con cámaras hiperespectrales exhiben alta resolución espacial, permitiendo captar heterogeneidades en la cobertura vegetal o mineral (Tolentino *et al.*, 2025; Kou *et al.*, 2023). La evidencia sugiere que la integración de estas tecnologías facilita la toma de decisiones a escalas múltiples, desde la rehabilitación de botaderos hasta la gestión diaria de botaderos y escombreras.

Rehabilitación Ecológica y Gestión de Servicios Ecosistémicos. Entre los factores más destacados en la literatura, se halla el rápido crecimiento de indicadores que miden la evolución de la cobertura vegetal y la salud ecológica en áreas mineras (Zhang *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2024). Dichos indicadores representan un avance en la valoración económica de la restauración, pues facilitan la cuantificación de costos y beneficios. Se robustece así la justificación de intervenciones de rehabilitación, contribuyendo a disuadir la práctica de abandonar pasivos ambientales. Además, se reconoce el rol de metodologías multi-índice para la gestión de agua, suelos y vegetación, integrando la información satelital en tiempo casi real con modelos predictivos (Okada *et al.*, 2024; He *et al.*, 2023).

Gobernanza y Expansión de la Frontera Minera. Diversos estudios apuntan a la importancia de fortalecer los marcos regulatorios para evitar infracciones y superposiciones de concesiones en zonas de alta fragilidad ambiental. Esto se observa, por ejemplo, en investigaciones que documentan el riesgo creciente de concesiones mal gestionadas (Werner *et al.*, 2024; Singla, 2021). Por otro lado, la discusión sobre la minería submarina y la minería espacial agrega una dimensión prospectiva a la problemática minera: si bien la extracción en nuevos entornos podría aliviar la presión en tierras habitadas o ecológicamente sensibles, también impone retos éticos y regulatorios (Hornsey

et al., 2022; Metaxas *et al.*, 2024). Así, se observa un panorama en el que la expansión minera requiere políticas globales e instrumentos innovadores de gobernanza y regulación ambiental.

Hacia una Minería Sostenible e Inteligente. El conjunto de resultados indica que la adopción de teledetección avanzada y metodologías de análisis de datos [incluyendo aprendizaje profundo, big data y cálculo distribuido (Distribuido a través de plataformas de la nube y clusters de HPC)] han de converger en una minería más sostenible. Varios autores realzan que tales soluciones tecnológicas no se materializan si no se acompañan de políticas de cumplimiento ambiental y de mecanismos de co-innovación entre industria, academias y entes reguladores (Sorooshian, 2025; Wu *et al.*, 2023). Se perfila entonces una *transición* necesaria, en la cual la minería no solo mantiene su rentabilidad, sino que se fortalece a través de la reducción de impactos, la transparencia de datos y la responsabilidad socioambiental, beneficiando a largo plazo a las comunidades implicadas.

En síntesis, la convergencia de estas líneas de investigación sobresa la necesidad de transversalizar la teledetección y la analítica de datos en toda la cadena de valor minera, desde la exploración inicial hasta el cierre y post-cierre de faenas. La revisión de estudios sugiere que la colaboración multidisciplinar, sumada a la presencia de regulaciones modernizadas y aplicables, puede impulsar buenas prácticas y soluciones ambientalmente responsables, adaptadas a la magnitud y complejidad de los retos que enfrenta la minería en el siglo XXI.

CONCLUSIONES

El análisis realizado permitió integrar información diversa sobre las aplicaciones de técnicas avanzadas de teledetección y metodologías de análisis de datos orientadas al sector minero. Considerando etapas sucesivas de selección y evaluación, se obtuvo un conjunto de estudios que muestran la amplia versatilidad de estos abordajes y su gran potencial para potenciar una minería más sostenible y responsable. A continuación, se presentan las conclusiones principales derivadas de esta revisión.

- *Fortalecimiento de la Gestión Medioambiental.* A lo largo de la revisión se constató que los sensores hiperespectrales, la interferometría radar y los UAV multiespectrales constituyen herramientas clave para la evaluación temprana de riesgos ambientales en las distintas fases mineras (Tolentino *et al.*, 2025; Xia *et al.*, 2023; Kou *et al.*, 2023). El monitoreo continuo de la deformación del terreno y la detección de drenajes ácidos permiten anticipar eventuales desastres y programar labores de mitigación en forma efectiva (Peng *et al.*, 2024; He *et al.*, 2023). Por ende, la incorporación de estas plataformas tecnológicas favorece la mitigación de impactos ecológicos a escalas múltiples, desde la exploración hasta el post-cierre.
- *Relevancia de los Índices Ecológicos.* El surgimiento de indicadores y algoritmos específicos para cuantificar la recuperación ecosistémica refuerza la pertinencia de un enfoque sistémico en la minería (Zhang *et al.*, 2023; Gao *et al.*, 2024). Se verificó el uso de múltiples variables (cobertura vegetal, humedades del suelo, productividad primaria, entre otras) para construir perfiles de restauración. Este conocimiento, cuando se integra con modelos basados en inteligencia artificial, optimiza la priorización de zonas degradadas y acelera la toma de decisiones en la rehabilitación de escombreras y relaves (Okada *et al.*, 2024; Liu *et al.*, 2024).
- *Marcos Regulatorios y Expansión Futura.* La evidencia recopilada mostró que los avances tecnológicos no se despliegan satisfactoriamente sin la presencia de regulaciones coherentes ni mecanismos efectivos de supervisión (Werner *et al.*, 2024; Singla, 2021). La expansión de la frontera minera a ambientes no tradicionales (mar adentro o inclusive más allá) implica la necesidad de directrices claras y marcos regulatorios internacionales que garanticen la viabilidad social y ambiental de tales actividades (Hornsey *et al.*, 2022; Metaxas *et al.*, 2024). Esta visión a futuro se concatena con la exigencia de mantener una mirada integral: las soluciones de reforestación y control del drenaje ácido en la minería terrestre siguen siendo un factor de urgencia.
- *Sinergia entre Ciencia de Datos y Teledetección.* Otro punto esencial radica en la combinación de técnicas de adquisición remota con métodos de tratamiento de datos masivos (big data) y modelos de aprendizaje

profundo, los cuales ofrecen mejoras en la predicción y diagnostican la probabilidad de incidentes geotécnicos o contaminaciones localizadas (He *et al.*, 2023; Sorooshian, 2025). Cabe destacar que la minería inteligente puede florecer si las partes interesadas —industria, autoridad y academia— colaboran para implementar protocolos de datos abiertos y compartir metodologías.

Los resultados de esta revisión apuntan a que la aplicación convergente de metodologías de teledetección (UAV, SAR, hiperspectral) y la analítica de datos (aprendizaje profundo, big data) tiene efectos multiplicadores sobre la eficiencia y la sostenibilidad de la minería. Se observó cómo dichas soluciones permiten abordar desde la cuantificación de servicios ecosistémicos hasta la prevención de incidentes en faenas mineras, lo cual conlleva beneficios tanto para la viabilidad económica como para la protección ambiental. De esta manera, la minería responsable se consolida como un objetivo alcanzable en el corto y mediano plazo, siempre que se aúnen la ciencia y la regulación, reforzando el cumplimiento normativo y la colaboración multisectorial.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su más sincero agradecimiento a GMT Ltda. por el financiamiento otorgado, el cual hizo posible el desarrollo científico de esta investigación.

REFERENCIAS

- Abedini, M., Ziaii, M., Timkin, T. & Pour, A.B. (2023). Machine learning (ml)-based copper mineralization prospectivity mapping (mpm) using mining geochemistry method and remote sensing satellite data. *Remote Sensing*, 15(15), 3708.
- Adams, L.B. & Hayakawa, Y.S. (2025). Mapping alluvial mine dynamics in the atewa landscape in ghana using geographic object-based image analysis (geobia) and gis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 197(4), 473.
- Ammirati, L., Chirico, R., Di Martire, D. & Mondillo, N. (2022). Application of multispectral remote sensing for mapping flood-affected zones in the brumadinho mining district (minas gerais, brasil). *Remote Sensing*, 14(6), 1501.
- Ang, M.L.E., Arts, D., Crawford, D., Labatos, B.V.J., Ngo, K.D., Owen, J.R., *et al.* (2021). Socio-environmental land cover time-series analysis of mining landscapes using google earth engine and web-based mapping. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 21, 100458.
- Ang, M.L.E., Owen, J.R., Gibbins, C.N., Lèbre, E., Kemp, D., Saputra, M.R.U., *et al.* (2023). Systematic review of gis and remote sensing applications for assessing the socioeconomic impacts of mining. *Journal of Environment and Development*, 32(3), 243–273.
- Asner, G.P. & Tupayachi, R. (2017). Accelerated losses of protected forests from gold mining in the peruvian amazon. *Environmental Research Letters*, 12(9), 094004.
- Becerra, M., Villa, L., Nicolau, A.P., Herndon, K.E., Novoa, S., Martín-Arias, V., *et al.* (2024). Creating near real-time alerts of illegal gold mining in the peruvian amazon using synthetic aperture radar. *Environmental Research Communications*, 6(12), 125022.
- Brabant, C., Noorbhai, N., Bendixen, M. & Iversen, L. (2025). Mapping the global impact of mining activities on freshwater biodiversity to inform conservation priorities. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 35(3), e70094.
- Brown, C., Boyd, D.S. & Kara, S. (2022). Landscape analysis of cobalt mining activities from 2009 to 2021 using very high-resolution satellite data (democratic republic of the congo). *Sustainability (Switzerland)*, 14(15), 9545.
- Chalkley, R., Crane, R.A., Eyre, M., Hicks, K., Jackson, K.-M. & Hudson-Edwards, K. A. (2023). A multi-scale feasibility

study into acid mine drainage (amd) monitoring using same-day observations. *Remote Sensing*, 15(1), 76.

Chen, Y., Suo, Z., Lu, H., Cheng, H. & Li, Q. (2023). Active-passive remote sensing evaluation of ecological environment quality in juye mining area, china. *Remote Sensing*, 15(24), 5750.

Chen, Z., Hou, H., Zhang, S., Campbell, T., Yang, Y., Tu, M., *et al.* (2024). Using unmanned aerial vehicle multispectral data for monitoring the outcomes of ecological restoration in mining areas. *Land Degradation and Development*, 35(4), 1599–1613.

Daichendt, N., Janovec, J.P., Tobler, M.W., Wittmann, F., Latrubesse, E.M., Hastie, A., *et al.* (2025). Surge of peatland destruction by an advancing front of artisanal gold mining in amazonia. *Environmental Research Letters*, 20(4), 044001.

Demattê, J.A.M., Fongaro, C.T., Rizzo, R. & Safanelli, J.L. (2018). Geospatial soil sensing system (geos3): A powerful data mining procedure to retrieve soil spectral reflectance from satellite images. *Remote Sensing of Environment*, 212, 161–175.

Dong, J., Dai, W., Xu, J. & Li, S. (2016). Spectral estimation model construction of heavy metals in mining reclamation areas. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 13(7), 640.

Echogdali, F.Z., Boutaleb, S., Abia, E.H., Ouchchen, M., Dadi, B., Id-Belqas, M., *et al.* (2022). Mineral prospectivity mapping: a potential technique for sustainable mineral exploration and mining activities—a case study using the copper deposits of the tagmout basin, morocco. *Geocarto International*, 37(25), 9110–9131.

Fu, Y., Wu, Y., Yin, X. & Zhang, Y. (2023). Mapping mining-induced ground fissures and their evolution using uav photogrammetry. *Frontiers in Earth Science*, 11, 1260913.

Gao, F., Zhou, J., Jiang, H., Yang, W. & Wang, G. (2024). Assessing the true value of ecological restoration in mining areas: An input-output approach based on ecosystem service valuation. *Ecological Indicators*, 166, 112591.

Garcia, J., Villavicencio, G., Altimiras, F., Crawford, B., Soto, R., *et al.* (2022). Machine learning techniques applied to construction: A hybrid bibliometric analysis of advances and future directions. *Automation in Construction*, 142, 104532.

Garcia, J., Ríos-Colque, L., Peña, A. & Rojas, L. (2025). Condition monitoring and predictive maintenance in industrial equipment: An nlp-assisted review of signal processing, hybrid models, and implementation challenges. *Applied Sciences*, 15(10), 5465.

García Millán, V.E., Faude, U., Bicsan, A., Klink, A., Teuwsen, S., Pakzad, K., *et al.* (2018). Monitoring flooding damages in vegetation caused by mining activities using optical remote sensing. *PFG - Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 86(1), 1–13.

Guo, J., Li, Q., Xie, H., Li, J., Qiao, L., Zhang, C., *et al.* (2022). Monitoring of vegetation disturbance and restoration at the dumping sites of the baorixile open-pit mine based on the landtrendr algorithm. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(15), 9066.

Hao, L., Zhang, Z. & Yang, X. (2019). Mine tailing extraction indexes and model using remote-sensing images in southeast hubei province. *Environmental Earth Sciences*, 78(15), 493.

He, J., Riley, D.N. & Barton, I. (2024). Is endmember extraction a critical step in the analysis of hyperspectral images in mining environments? *Remote Sensing*, 16(12), 2137.

He, T., Guo, J., Xiao, W., Xu, S. & Chen, H. (2023). A novel method for identification of disturbance from surface coal mining using all available landsat data in the gee platform. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 205, 17–33.

- Hornsey, M.J., Fielding, K.S., Harris, E.A., Bain, P.G., Grice, T. & Chapman, C.M. (2022). Protecting the planet or destroying the universe? understanding reactions to space mining. *Sustainability (Switzerland)*, 14 (7), 4119.
- Jiang, K., Yang, K., Dong, X., Chen, X., Peng, L. & Gu, X. (2024). Extraction of vegetation disturbance range using aboveground biomass estimated from sentinel-2 imagery in coal mining areas with high groundwater table. *Environmental Science and Pollution Research*, 31 (36), 49227–49243.
- Joy, M.S., Jha, P., Yadav, P.K., Bansal, T., Rawat, P. & Begam, S. (2024). Forest fragmentation and forest cover dynamics: Mining induced changes in the west singhbhum district of jharkhand. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 36, 101350.
- Kayet, N., Pathak, K., Chakrabarty, A., Kumar, S., Singh, C.P. & Chowdary, V.M. (2020). Assessment of mining activities on tree species and diversity in hilltop mining areas using hyperion and landsat data. *Environmental Science and Pollution Research*, 27 (34), 42750–42766.
- Kayet, N., Pathak, K., Singh, C.P., Chaturvedi, R.K., Brahmandam, A.S. & Mandal, C. (2024). Assessment and estimation of coal dust impact on vegetation using vis difference model and prisma hyperspectral data in mining sites. *Journal of Environmental Management*, 367, 121935.
- Kirsch, M., Mavroudi, M., Thiele, S., Lorenz, S., Tusa, L., Booyesen, R., *et al.* (2023). Underground hyperspectral outcrop scanning for automated mine-face mapping: The lithium deposit of zinnwald/cínovec. *Photogrammetric Record*, 38 (183), 408–429.
- Kou, X., Han, D., Cao, Y., Shang, H., Li, H., Zhang, X., *et al.* (2023). Acid mine drainage discrimination using very high resolution imagery obtained by unmanned aerial vehicle in a stone coal mining area. *Water (Switzerland)*, 15 (8), 1613.
- León, F., Rojas, L., Bazán, V., Martínez, Y., Peña, A. & Garcia, J. (2025). A systematic review of copper heap leaching: Key operational variables, green reagents, and sustainable engineering strategies. *Processes*, 13 (5), 1513.
- Li, H., Zhou, B. & Xu, F. (2022). Variation analysis of spectral characteristics of reclamation vegetation in a rare earth mining area under environmental stress. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 60, 4408412.
- Li, J., Liang, J., Wu, Y., Yin, S., Yang, Z. & Hu, Z. (2021). Quantitative evaluation of ecological cumulative effects in mining area using a pixel-based time series model of ecosystem service value. *Ecological Indicators*, 120, 106873.
- Li, N., Guo, Y., Wang, L., Wang, Q., Yan, D., Zhao, S., *et al.* (2024). Evaluation and quantitative characterization for the ecological environment impact of open pit mining on vegetation destruction from landsat time series: A case study of wulishan limestone mine. *Ecological Indicators*, 158, 111371.
- Li, Q., Hu, Z., Zhang, F., Song, D., Liang, Y. & Yu, Y. (2023). Multispectral remote sensing monitoring of soil particle-size distribution in arid and semi-arid mining areas in the middle and upper reaches of the yellow river basin: A case study of wuhai city, inner mongolia autonomous region. *Remote Sensing*, 15 (8), 2137.
- Liu, H., Huang, C., Chen, N., Xie, T., Lu, M. & Huang, Z. (2024). Negative samples mining matters: Reconsidering hyperspectral image classification with contrastive learning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 5537816.
- Liu, Y., Lin, J. & Yue, H. (2023). Soil respiration estimation in desertified mining areas based on uav remote sensing and machine learning. *Earth Science Informatics*, 16 (4), 3433–3448.
- Lobo, F.L., Costa, M.P.F. & Novo, E.M.L.M. (2015). Time-series analysis of landsat-mss/tm/oli images over amazonian waters impacted by gold mining activities. *Remote Sensing of Environment*, 157, 170–184.

- Martínez, Y., Rojas, L., Peña, A., Valenzuela, M. & García, J. (2025). Physics-informed neural networks for the structural analysis and monitoring of railway bridges: A systematic review. *Mathematics*, 13(10), 1571.
- Meng, X., Zhang, D., Dong, S. & Yao, C. (2024). Open-pit granite mining area extraction using uav aerial images and the novel gipnet. *Remote Sensing*, 16(5), 789.
- Metaxas, A., Anglin, C.D., Cross, A., Drazen, J., Haeckel, M., Mudd, G., *et al.* (2024). Comparing environmental impacts of deep-seabed and land-based mining: A defensible framework. *Global Change Biology*, 30(5), e17334.
- Michałowska, K., Pirowski, T., Głowienka, E., Szypuła, B. & Malinverni, E.S. (2024). Sustainable monitoring of mining activities: Decision-making model using spectral indexes. *Remote Sensing*, 16(2), 388.
- Mukherjee, J., Mukherjee, J., Chakravarty, D. & Aikat, S. (2019). A novel index to detect opencast coal mine areas from landsat 8 oli/tirs. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(3), 891–897.
- Murray, X., Apan, A., Deo, R. & Maraseni, T. (2022). Rapid assessment of mine rehabilitation areas with airborne lidar and deep learning: bauxite strip mining in queensland, australia. *Geocarto International*, 37(26), 11223–11252.
- Okada, N., Bino Sinaice, B., Kim, J., Nozaki, H., Takizawa, K., Owada, *et al.* (2024). Advanced mineralogical classification and concentration estimation in mining with matlab-powered hyper-spectral imaging and machine learning. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 38(10), 851–871.
- Orellana, F., Durán, O., Vergara, J. I. & Arata, A. (2024). Maintainability analysis of remotely operated lng marine loading arms based on une 151001 standard. *Machines*, 12(6), 407.
- Padmanaban, R., Bhowmik, A.K. & Cabral, P. (2017). A remote sensing approach to environmental monitoring in a reclaimed mine area. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 6(12), 401.
- Pan, J., Li, H. & Li, Y. (2022). Spatiotemporal change analysis of environmental quality in mining areas based on long-term landsat images. *Geocarto International*, 37(26), 11052–11067.
- Peng, J., Wang, S. & Wang, Z. (2024). Extraction of coal mine surface collapse information and design of comprehensive management model based on multi-source remote sensing—taking zhaogu mining area as example. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(14), 6055.
- Ranjan, A.K. & Gorai, A.K. (2024). Assessment of global carbon dynamics due to mining-induced forest cover loss during 2000–2019 using satellite datasets. *Journal of Environmental Management*, 371, 123271.
- Rojas, A. L., Peña, A. & García, J. (2025a). Complex dynamics and intelligent control: Advances, challenges, and applications in mining and industrial processes. *Mathematics*, 13(6), 961.
- Rojas, B. L., Peña, A. & García, J. (2025b). AI-driven predictive maintenance in mining: A systematic literature review on fault detection, digital twins, and intelligent asset management. *Applied Sciences*, 15(3), 3337.
- Rosikin, R., Prasetyo, L.B. & Hermawan, R. (2023). Assessment of the success of canopy cover revegetation of former coal mine lands with forest canopy density (fcd) model in kutai kartanegara, east kalimantan. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 13(4), 574–585.
- Rudorff, N., Rudorff, C. M., Kampel, M. & Ortiz, G. (2018). Remote sensing monitoring of the impact of a major mining wastewater disaster on the turbidity of the doce river plume off the eastern brazilian coast. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 145, 349–361.
- Ruppen, D., Runnalls, J., Tshimanga, R.M., Wehrli, B. & Odermatt, D. (2023). Optical remote sensing of large-scale

water pollution in angola and dr congo caused by the catoca mine tailings spill. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118, 103237.

Sánchez-Garrido, A.J., Navarro, I.J., García, J. & Yepes, V. (2023). A systematic literature review on modern methods of construction in building: An integrated approach using machine learning. *Journal of Building Engineering*, 73, 106725.

Salomidi, A., Benndorf, J. & Barakos, G. (2024). Establishing a mineral spectral library for hyperspectral imaging of ore in underground mines—a case study of reiche zeche, germany. *Sustainability (Switzerland)*, 16 (23), 10527.

Singla, G. (2021). Legal and political changes in india towards sustainable mining. *International Journal of Ecosystems and Ecology Science*, 11 (1), 27–34.

Song, D., Hu, Z., Yu, Y., Zhang, F. & Sun, H. (2024). Assessing ecological impacts and recovery in coal mining areas: A remote sensing and field data analysis in northwest china. *Remote Sensing*, 16 (12), 2236.

Song, W., Gu, H.-H., Song, W., Li, F.-P., Cheng, S.-P., Zhang, Y.-X., et al. (2023). Environmental assessments in dense mining areas using remote sensing information over qian'an and qianxi regions china. *Ecological Indicators*, 146, 109814.

Sorooshian, S. (2025). Exploration of socio-environmental solutions in the mining industry in comparison to other industries: A data-driven unveiling perceptions. *Resources Policy*, 104, 105594.

Stevens, J. & Dixon, K. (2017). Is a science-policy nexus void leading to restoration failure in global mining? *Environmental Science and Policy*, 72, 52–54.

Sun, H., Hu, Z., Wang, S. & Song, D. (2024). Long-term effects of underground mining on surface soil moisture and vegetation environment: evidence from the xishan mining area. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196 (12), 1280.

Tepanosyan, G., Muradyan, V., Tepanosyan, G., Avetisyan, R., Asmaryan, S., Sahakyan, L., et al. (2023). Exploring relationship of soil pte geochemical and “vis-nir spectroscopy” patterns near cu-mo mine (armenia). *Environmental Pollution*, 323, 121180.

Tolentino, V., Ortega Lucero, A., Koerting, F., Savinova, E., Hildebrand, J.C. & Micklethwaite, S. (2025). Drone-based vnir-swir hyperspectral imaging for environmental monitoring of a uranium legacy mine site. *Drones*, 9 (4), 313.

Wang, K., Wei, B., Zhao, T., Wu, G., Zhang, J., Zhu, L., et al. (2024). An automated approach for mapping mining-induced fissures using cnns and uas photogrammetry. *Remote Sensing*, 16 (12), 2090.

Wang, Z., Lechner, A.M., Yang, Y., Baumgartl, T. & Wu, J. (2020). Mapping the cumulative impacts of long-term mining disturbance and progressive rehabilitation on ecosystem services. *Science of the Total Environment*, 717, 137214.

Werner, T.T., Toumbourou, T., Maus, V., Lukas, M.C., Sonter, L.J., Muhdar, M., et al. (2024). Patterns of infringement, risk, and impact driven by coal mining permits in indonesia. *Ambio*, 53 (2), 242–256.

Wu, Q., Liu, K., Song, C., Wang, J., Ke, L., Ma, R., et al. (2018). Remote sensing detection of vegetation and landform damages by coal mining on the tibetan plateau. *Sustainability (Switzerland)*, 10 (11), 3851.

Wu, Q., Xu, H., Yang, Y., Hou, H., Mi, J., Wang, X., et al. (2023). Identifying structure change of vegetation under long-term disturbance in the shendong mining area. *Environmental Earth Sciences*, 82 (19), 450.

Wu, Z., Li, H. & Wang, Y. (2021). Mapping annual land disturbance and reclamation in rare-earth mining disturbance region using temporal trajectory segmentation. *Environmental Science and Pollution Research*, 28 (48), 69112–69128.

- Xia, Y., Xia, F., Hui, Z., Li, H., Wan, R. & Ai, J. (2023). Combined ps-insar technology and high-resolution optical remote sensing for identifying illegal underground mining in the suburb of yangquan city, shanxi province, china. *Remote Sensing*, 15(14), 3565.
- Xu, H., Wang, X., Zhou, J., Xu, L. & Yang, L. (2024). Mapping annual dynamics of surface mining disturbances in the northeastern tibetan plateau using landsat imagery and landtrendr algorithm. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(10), 934.
- Xulu, S., Phungula, P.T., Mbatha, N. & Moyo, I. (2021). Multi-year mapping of disturbance and reclamation patterns over tronox's hillendale mine, south africa with dbest and google earth engine. *Land*, 10(7), 760.
- Yang, Y., Erskine, P.D., Lechner, A.M., Mulligan, D., Zhang, S. & Wang, Z. (2018). Detecting the dynamics of vegetation disturbance and recovery in surface mining area via landsat imagery and landtrendr algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 178, 353–362.
- Yang, Y., Tang, J., Zhang, Y., Zhang, S., Zhou, Y., Hou, H., *et al.* (2022). Reforestation improves vegetation coverage and biomass, but not spatial structure, on semi-arid mine dumps. *Ecological Engineering*, 175, 106508.
- Yu, H., Zahidi, I., Fai, C.M., Liang, D. & Madsen, D. (2024). Elevating community well-being in mining areas: the proposal of the mining area sustainability index (masi). *Environmental Sciences Europe*, 36(1), 71.
- Zang, Y., Wang, K., Xu, S., Xiao, W., Tong, T., Sun, H. & (2025). Identification of surface mining and assessment of ecological restoration effects using gee and sentinel-2 image data - a case study on yangtze river watershed, china. *Ecological Engineering*, 212, 107525.
- Zhang, C., Zheng, H., Li, J., Qin, T., Guo, J. & Du, M. (2022). A method for identifying the spatial range of mining disturbance based on contribution quantification and significance test. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(9), 5176.
- Zhang, P., Chen, X., Ren, Y., Lu, S., Song, D., *et al.* (2023). A novel mine-specific eco-environment index (mseei) for mine ecological environment monitoring using landsat imagery. *Remote Sensing*, 15(4), 933.
- Zhao, Y., Sun, B., Liu, S., Zhang, C., He, X., Xu, D., *et al.* (2021). Identification of mining induced ground fissures using uav and infrared thermal imager: Temperature variation and fissure evolution. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 180, 45–64.

