

Plataforma de código abierto para el monitoreo y prevención de la minería ilegal mediante análisis geoespacial

Open source platform for monitoring and preventing illegal mining through geospatial analysis

Recibido: 2/08/2025 - Aceptado: 5/12/2025

Alexander Aguilar Ramirez

<https://orcid.org/0009-0007-6502-1370>

aguilarramirezalexander2@gmail.com

Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú

Dalmiro Aurelio Cornejo Olarte

<https://orcid.org/0000-0002-5813-9844>

dcornejo@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú

Alfredo Mamani Canqui

<https://orcid.org/0000-0002-8379-8366>

amamani@unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú

Johan Denis Aguilar Ramírez

<https://orcid.org/0009-0001-5371-6526>

Jaguilarr@est.unap.edu.pe

Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de una plataforma web de código abierto para el monitoreo y prevención de la minería ilegal mediante tecnologías geoespaciales. La investigación adoptó un enfoque cuantitativo con diseño no experimental descriptivo, centrado en integrar datos satelitales y georreferenciados para una vigilancia territorial accesible. La metodología se basó en imágenes satelitales multitemporales de Sentinel-2 y Landsat, procesadas en Google Earth Engine (GEE). Se aplicaron índices espectrales como NDVI, NBR y BSI, junto con análisis de diferencias multitemporales y umbrales, para detectar cambios en el paisaje e identificar zonas intervenidas por minería informal. Además, se incorporaron datos espaciales en formato GeoJSON, analizados con herramientas de procesamiento geoespacial y visualización dinámica. Los resultados demuestran que la plataforma genera mapas temáticos, identifica áreas afectadas y facilita la visualización de patrones relevantes para la toma de decisiones. En consecuencia, fortalece la vigilancia ambiental y territorial. Se concluye que esta herramienta es flexible, escalable y con alto potencial para mejorar la gobernanza ambiental y prevenir la minería ilegal.

Palabras clave: análisis geoespacial, código abierto, minería ilegal.

Abstract

This paper presents the development of an open-source web platform for monitoring and preventing illegal mining using geospatial technologies. The research adopted a quantitative approach with a descriptive, non-experimental design, focused on integrating satellite and georeferenced data for accessible territorial monitoring. The methodology was based on multi-temporal satellite imagery from Sentinel-2 and Landsat, processed in Google Earth Engine (GEE). Spectral indices such as NDVI, NBR, and BSI were applied, along with multi-temporal difference analysis and thresholds, to detect landscape changes and identify areas impacted by informal mining. Spatial data in GeoJSON format were also incorporated and analyzed using geospatial processing and dynamic

visualization tools. The results demonstrate that the platform generates thematic maps, identifies affected areas, and facilitates the visualization of patterns relevant to decision-making. Consequently, it strengthens environmental and territorial monitoring. The study concludes that this tool is flexible, scalable, and has high potential for improving environmental governance and preventing illegal mining.

Keywords: geospatial analysis, open source, illegal mining.

Introducción

La minería ilegal representa una de las amenazas más persistentes y complejas para la sostenibilidad ambiental, la estabilidad institucional y el desarrollo económico en diversas regiones del mundo. Por ello, esta actividad —caracterizada por su informalidad, la evasión sistemática de regulaciones y la explotación indiscriminada de recursos naturales— acelera la degradación de ecosistemas que va más allá de lo ambiental, impactando también dimensiones sociales, legales y territoriales (Sonter et al., 2020; Sonter et al., 2017).

Generalmente, se manifiesta con mayor intensidad en zonas de alta biodiversidad, donde la presencia estatal es limitada y el control institucional resulta débil. Esto no solo complica la detección oportuna de la actividad minera, sino que también restringe la capacidad de intervención efectiva (Hallatu et al., 2021; Kayani et al., 2023). En consecuencia, las herramientas de fiscalización tradicionales, basadas en inspecciones físicas y reportes esporádicos, se muestran inadecuadas para enfrentar un fenómeno que evoluciona con rapidez y, a menudo, opera de manera clandestina (Dethier et al., 2019).

Ante este panorama desafiante, las tecnologías de percepción remota emergen como alternativas viables y estratégicas para fortalecer la vigilancia ambiental. Además, el empleo de imágenes satelitales, drones y análisis geoespaciales permite identificar patrones de actividad minera, mapear áreas de riesgo y generar información clave que apoya la toma de decisiones informadas (Cabernard & Pfister, 2022; Wang et al., 2020). Estas herramientas no solo optimizan la supervisión territorial, sino que también proporcionan los insumos técnicos esenciales para el diseño de políticas públicas fundamentadas en evidencia sólida (Chakuya et al., 2023; Dethier et al., 2023).

De allí que, la presente investigación persigue como objetivo principal el desarrollo de una plataforma web de código abierto destinada a la prevención y el seguimiento de actividades mineras ilegales, mediante tecnologías geoespaciales avanzadas y modelos predictivos. Esta propuesta ofrece una solución flexible, replicable y robusta, con capacidad para adaptarse a distintos contextos territoriales y respaldar a las instituciones en la planificación estratégica de sus acciones de control (Asner et al., 2013; Asner & Tupayachi, 2016). En última instancia, este enfoque —apoyado en la innovación tecnológica y una aplicación operativa efectiva— se erige como fundamental para abordar los retos en entornos altamente vulnerables a la minería ilegal.

Metodología

La investigación se llevó a cabo con un enfoque cuantitativo, centrado en integrar herramientas geoespaciales para desarrollar una plataforma web de código abierto que monitoree y prevenga actividades de minería ilegal. Por ello, adoptó un carácter aplicado, al priorizar la creación de un sistema funcional que procese y visualice información territorial en tiempo real, con impacto práctico inmediato. Además, se empleó un diseño no experimental y descriptivo, ya que analizó datos existentes sin intervenir variables del entorno, concentrándose en identificar, visualizar y analizar espacialmente los patrones asociados a la minería informal.

Uso de imágenes satelitales para la detección de minería ilegal

Las imágenes satelitales fungieron como instrumento principal para identificar modificaciones en el territorio. Estas se obtuvieron a través de Google Earth Engine (GEE), una plataforma que facilitó el acceso a series temporales de satélites ópticos como Sentinel-2 y Landsat, particularmente idóneos para el análisis multitemporal del uso del suelo y la detección de cambios a gran escala.

En concreto, los datos satelitales permitieron detectar alteraciones mediante dos procedimientos clave:

- **Detección de cambios:** Se compararon imágenes de distintos periodos para identificar transformaciones en el paisaje, tales como deforestación, remoción de suelos, apertura de accesos o ampliación de zonas intervenidas. Este proceso se llevó a cabo con los instrumentos de análisis de Google Earth Engine (GEE), mediante *scripts* específicos que calcularon índices espectrales (NDVI, NBR, BSI), generaron diferencias multitemporales de reflectancia y aplicaron umbrales automáticos para resaltar perturbaciones directamente asociadas a actividades de minería informal.

- **Monitoreo continuo:** Se implementó un uso sistemático de imágenes satelitales para realizar una vigilancia periódica del territorio. Por su parte, este procedimiento se ejecutó mediante *scripts* automatizados en Google Earth Engine (GEE), los cuales actualizaron de manera continua las series temporales de Sentinel-2 y Landsat. En consecuencia, se generaron mapas comparativos entre fechas, lo que facilitó la detección de zonas de riesgo, patrones de expansión minera y la identificación temprana de focos emergentes en tiempo casi real.

Análisis de datos geoespaciales

El sistema integró diversas herramientas de análisis espacial para procesar la información recopilada y convertirla en insumos útiles para la toma de decisiones. Entre sus funcionalidades principales destacaron:

- **Reconocimiento de patrones:** Algoritmos de clasificación y análisis espacial, implementados en la plataforma y basados en características geométricas y temáticas de datos GeoJSON, detectaron configuraciones típicas de minería ilegal con alta precisión.
- **Análisis multicapa:** La combinación de datos geológicos, hidrológicos y territoriales evaluó de forma integral las zonas afectadas, considerando su contexto ambiental más amplio y las interacciones entre variables.
- **Visualización temática:** Mapas por percentiles, gradientes de color e iconografía diferenciada representaron con claridad los tipos de actividad minera, haciendo la información intuitiva incluso para usuarios no especializados en geoespaciales.

Modelado predictivo para planificación de escenarios futuros

La herramienta incorporó capacidades de modelado predictivo para anticipar el comportamiento futuro de la minería ilegal y evaluar la efectividad de estrategias de intervención. Para lograrlo, se utilizaron:

- **Análisis de tendencias:** Un estudio detallado de registros históricos y patrones de expansión identificó zonas vulnerables y dinámicas territoriales recurrentes, proyectando riesgos a mediano plazo con base en trayectorias observadas.
- **Simulación de escenarios:** Modelos que representaron diferentes estrategias de control estimaron su impacto potencial en la reducción de la actividad minera no autorizada, apoyando así decisiones proactivas y la planificación estratégica.

Resultados y discusión

Detección y monitoreo de minería ilegal

El sistema desarrollado demostró su efectividad en la detección y monitoreo de actividades mineras no autorizadas. Por ello, a partir del análisis multitemporal de imágenes satelitales y datos geoespaciales integrados en la plataforma, fue posible identificar con precisión las áreas afectadas por minería ilegal, generando información georreferenciada actualizada sobre los cambios ocurridos en el territorio. Estas capacidades no solo permitieron una vigilancia continua del paisaje, sino que también mejoraron significativamente la identificación de focos activos, especialmente en regiones remotas y de difícil acceso donde la minería informal tiende a expandirse con rapidez y sin control.

Integración y análisis de datos geoespaciales

Además, la integración de múltiples capas de datos geoespaciales facilitó una evaluación integral del impacto ambiental, social y territorial ligado a las operaciones mineras no reguladas. En consecuencia, las herramientas de análisis visual clasificaron las zonas según el tipo de sustancia extraída, el método de explotación empleado, el nivel de afectación ambiental y el grado de contaminación generado. Esta información se presentó mediante filtros personalizados y mapas temáticos interactivos, que permitieron detectar patrones espaciales claros y tendencias regionales, apoyando así decisiones informadas en tiempo real.

Figura 1
Área total afectada por país

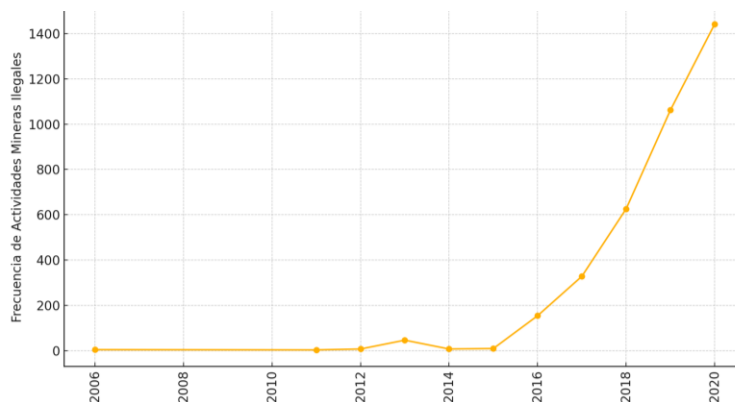


La Figura 1 evidencia una concentración geográfica notable del impacto de la minería ilegal en América Latina, destacando patrones espaciales que reflejan vulnerabilidades estructurales regionales. Países como Perú, Brasil y Colombia encabezan la lista en superficie afectada, un fenómeno que se alinea perfectamente con sus vastas características territoriales —selvas amazónicas extensas, cordilleras ricas en vetas auríferas— y la abundancia de recursos minerales estratégicos como oro, coltán y bauxita. Esta distribución no solo valida patrones documentados en investigaciones previas, sino que también subraya con mayor urgencia la necesidad de desplegar herramientas de vigilancia más robustas y sofisticadas, junto con estrategias de intervención diferenciadas que consideren el contexto geopolítico único, las dinámicas locales de gobernanza y las particularidades socioambientales de cada nación.

Modelado predictivo y planificación de escenarios

Además, las capacidades de modelado predictivo incorporadas en la plataforma proporcionaron herramientas valiosas para anticipar la expansión de la minería ilegal. A partir del análisis detallado de datos históricos y patrones espaciales observados, se generaron escenarios de riesgo que señalaron áreas con alta probabilidad de intervención futura, proyectando trayectorias de amenaza a mediano plazo. En consecuencia, estos resultados ofrecieron una base sólida para fortalecer estrategias de vigilancia y control, permitiendo a las autoridades focalizar recursos en zonas críticas con mayor eficiencia. Las simulaciones desarrolladas, por su parte, sirvieron como insumo técnico esencial para el diseño de políticas públicas informadas y planes de conservación territorial proactivos.

Figura 2
Evolución temporal de la minería ilegal



La Figura 2 evidencia una tendencia ascendente sostenida en la actividad minera ilegal durante el periodo analizado, revelando un patrón de crecimiento exponencial que desafía las medidas institucionales implementadas. Por ello, este comportamiento no solo sugiere una expansión sistemática e incontrolada de estas operaciones, sino que también se correlaciona directamente con eventos socioeconómicos críticos —como crisis de empleo rural, fluctuaciones en los precios internacionales del oro y debilidades en la gobernanza territorial—. En consecuencia, estos hallazgos resaltan con urgencia la necesidad de implementar monitoreo en tiempo real y herramientas de análisis predictivo que anticipen trayectorias futuras y permitan respuestas proactivas.

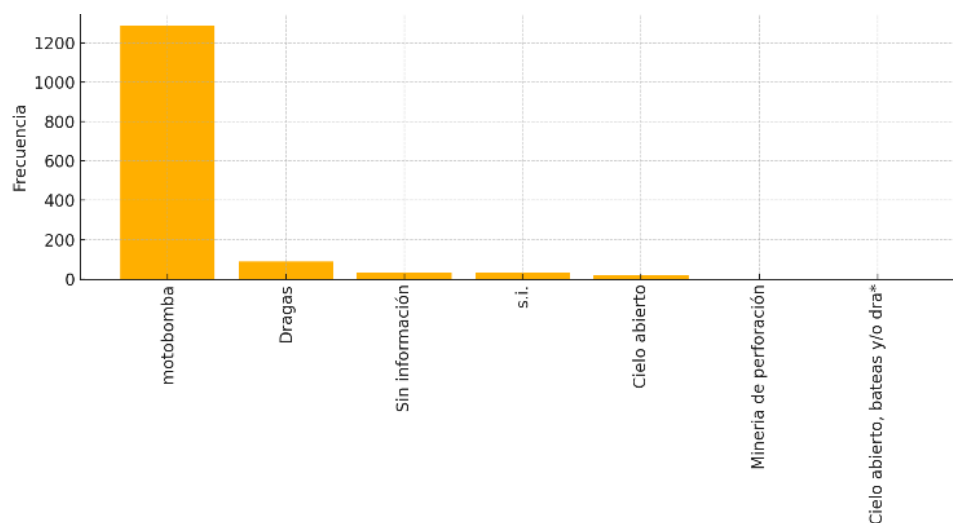
Análisis de frecuencia de variables mineras

Como parte del procesamiento de los datos cargados en la plataforma, se generaron gráficos de frecuencia detallados para examinar la distribución de métodos de exploración, tipos de sustancias extraídas y contaminantes asociados a estas actividades. Los resultados muestran una predominancia abrumadora del método de explotación aluvial —típico de ríos y sedimentos fluviales—, seguido a distancia por otras modalidades como la minería de socavones o tajos abiertos con menor incidencia relativa.

En cuanto a las sustancias minerales, el oro emerge como el recurso predominante en los registros procesados, reflejando su alto valor económico y demanda global. Respecto a los contaminantes, el mercurio se posiciona como el agente principal, utilizado ampliamente en procesos de amalgamación que generan daños irreversibles en ecosistemas acuáticos y cadenas alimentarias. Esta caracterización detallada no solo facilita la focalización precisa de estrategias de control y mitigación, sino que también permite priorizar intervenciones en zonas de mayor actividad y regiones particularmente vulnerables por el tipo de impacto ambiental detectado.

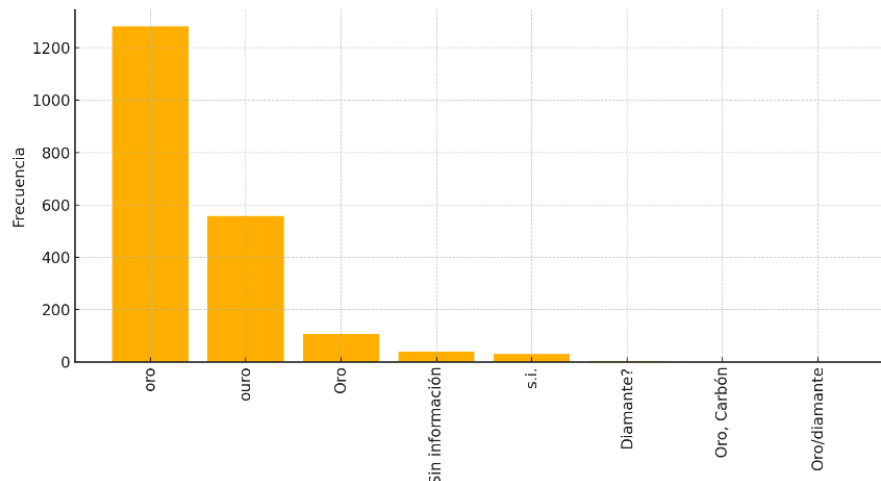
Figura 3

Frecuencia de métodos de exploración



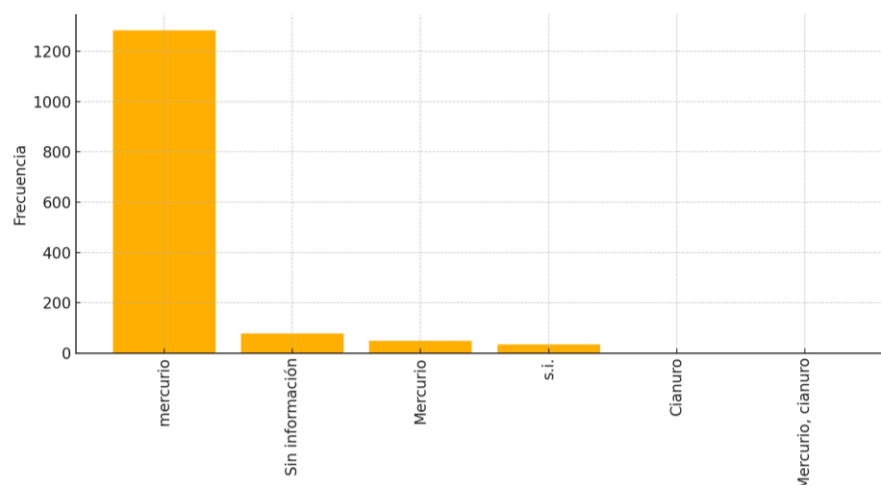
La Figura 3 confirma que la técnica de explotación aluvial domina claramente los registros procesados, posicionándose como el método más frecuente de minería ilegal detectada. Este tipo de extracción, que se concentra principalmente en cauces fluviales, ríos y sedimentos aluviales, representa un riesgo excepcionalmente elevado para los ecosistemas acuáticos, la calidad del recurso hídrico y las comunidades ribereñas dependientes. Por ello, su alta incidencia no solo evidencia la vulnerabilidad estructural de estos entornos, sino que también subraya con urgencia la prioridad absoluta que debe asignarse al monitoreo intensivo de zonas ribereñas, la implementación de barreras de control fluvial y estrategias específicas de restauración hídrica en áreas críticas.

Figura 4
Frecuencia de sustancias extraídas



La Figura 4 identifica al oro como el principal recurso extraído en operaciones mineras ilegales, con una frecuencia abrumadoramente superior respecto a otros minerales como coltán o bauxita. Este patrón se alinea perfectamente con la altísima demanda global de este metal precioso —impulsada por la industria joyera, tecnológica y financiera— y su facilidad de comercialización en mercados informales que eluden todo tipo de trazabilidad. Por ello, esta predominancia no solo confirma incentivos económicos irresistibles para los operadores ilegales, sino que también refuerza su estrecha asociación con redes transnacionales de criminalidad organizada, financiamiento de grupos armados y flujos ilícitos que perpetúan ciclos de violencia y corrupción en regiones vulnerables.

Figura 5
Frecuencia de contaminantes asociados



Finalmente, la Figura 5 confirma que el mercurio domina como el contaminante más comúnmente vinculado a la minería ilegal, seguido a distancia por cianuro y otros residuos químicos tóxicos. Este hallazgo resulta particularmente alarmante, ya que el mercurio exhibe una persistencia ambiental extrema —capaz de permanecer décadas en sedimentos fluviales— y una toxicidad bioacumulativa que se propaga implacablemente a través de cadenas alimentarias acuáticas. Por ello, sus efectos devastadores trascienden los ecosistemas, impactando gravemente la salud de comunidades humanas ribereñas mediante intoxicaciones crónicas y daños neurológicos irreversibles, mientras amenaza simultáneamente la supervivencia de fauna silvestre emblemática como peces, aves piscívoras y felinos de apex en regiones críticas de biodiversidad.

Conclusiones

La integración de tecnologías geoespaciales en una plataforma web interactiva demostró ser una estrategia efectiva para el monitoreo y la prevención de la minería ilegal, particularmente en territorios remotos de difícil acceso. Por ello, el uso de imágenes satelitales multitemporales, datos georreferenciados y análisis multicapa permitió obtener representaciones precisas y contextualizadas de las zonas intervenidas, superando las limitaciones inherentes de los métodos tradicionales de inspección en campo y facilitando la detección temprana de patrones espaciales asociados a actividades mineras no autorizadas.

Además, la capacidad del sistema para cargar archivos geoespaciales en formato GeoJSON, aplicar filtros dinámicos y generar visualizaciones temáticas adaptadas al contenido de cada archivo posibilitó el análisis detallado de variables críticas como el tipo de sustancia extraída, el nivel de afectación ambiental, los métodos de explotación empleados y los contaminantes presentes. Esta flexibilidad transformó a la plataforma en una herramienta versátil, adaptable a necesidades institucionales, territoriales y comunitarias diversas, lo que potencia su valor real para la gestión territorial en zonas vulnerables.

Por su parte, el análisis de frecuencia y las visualizaciones estadísticas integradas facilitaron una caracterización cuantitativa robusta de la actividad minera ilegal, revelando tendencias temporales claras y patrones espaciales recurrentes. En consecuencia, estos resultados proporcionan información estratégica para la formulación de políticas públicas, permitiendo a las autoridades priorizar zonas de intervención crítica, optimizar la asignación de recursos limitados y fortalecer estrategias de control y fiscalización con mayor eficacia.

La plataforma desarrollada también genera beneficios metodológicos significativos. Al centralizar el procesamiento geoespacial en una herramienta accesible y de código abierto, se democratiza el acceso a datos satelitales de alta calidad, reduciendo drásticamente la dependencia de software especializado y costoso. Esto empodera a instituciones locales, organizaciones ambientales e incluso comunidades afectadas, permitiéndoles generar información confiable y tomar decisiones basadas en evidencia geoespacial sólida.

Asimismo, la arquitectura modular del sistema —implementada con tecnologías web abiertas— garantiza su alta replicabilidad y escalabilidad. Por ello, facilita su integración con otros sistemas institucionales existentes, la incorporación fluida de nuevas capas territoriales y su expansión hacia regiones con características ambientales y sociales distintas. Además, este diseño promueve la sostenibilidad técnica del sistema, al simplificar su mantenimiento y permitir actualizaciones continuas sin requerir inversiones prohibitivas.

De manera complementaria, el estudio identificó limitaciones relevantes que enriquecen el análisis crítico. La precisión del monitoreo depende de la resolución espacial y temporal de las imágenes satelitales disponibles, lo que puede restringir la detección de actividades mineras de pequeña escala o efímeras. Asimismo, zonas con alta cobertura nubosa presentan desafíos en los análisis multitemporales. Sin embargo, estas limitaciones se pueden mitigar efectivamente mediante la triangulación de fuentes de datos complementarias y la integración de series temporales más densas y frecuentes.

En conjunto, los resultados confirman que la herramienta desarrollada representa un aporte tecnológico y metodológico sustancial para fortalecer la gobernanza ambiental y optimizar el control de actividades extractivas ilegales. Su implementación práctica puede impulsar la vigilancia territorial efectiva, prevenir conflictos socioambientales emergentes y proteger ecosistemas sensibles, posicionándose como una alternativa viable y escalable para esfuerzos de monitoreo ambiental en contextos remotos o de difícil acceso.

Referencias

- Asner, G. P., Llactayo, W., Tupayachi, R., & Luna, E. R. (2013). Elevated rates of gold mining in the Amazon revealed through high-resolution monitoring. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(46), 18454-18459. <https://doi.org/10.1073/pnas.1318271110>
- Asner, G. P., & Tupayachi, R. (2017). Accelerated losses of protected forests from gold mining in the Peruvian Amazon. *Environmental Research Letters*, 12(9), Artículo 094004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7dab>
- Cabernard, L., & Pfister, S. (2022). Hotspots of mining-related biodiversity loss in global supply chains and the potential for reduction through renewable electricity. *Environmental Science & Technology*, 56(22), 16357-16368. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c04003>
- Chakuya, J., Munkuli, N., Mutema, C., & Gandiwa, E. (2023). An assessment of the impact of illegal artisanal gold mining on the environment in parts of Chewore Safari Area, northern Zimbabwe. *Environmental Research Communications*, 5(7), Artículo 075005. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ace23b>
- Dethier, E., Sartain, S., & Lutz, D. (2019). Heightened levels and seasonal inversion of riverine suspended sediment in a tropical biodiversity hot spot due to artisanal gold mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(48), 23936-23941. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907842116>

- Dethier, E., Silman, M., Fernandez, L., Caballero, J., Alqahtani, S., Pauca, P., ... & Lutz, D. (2023). Operation Mercury: Impacts of national-level armed forces intervention and anticorruption strategy on artisanal gold mining and water quality in the Peruvian Amazon. *Conservation Letters*, 16(5), Artículo e12978. <https://doi.org/10.1111/conl.12978>
- Hallatu, T., Wisadirana, D., Muadi, S., & Chawa, A. (2021). Illegal sand mining and Sar local wisdom: A case study in Merauke. *International Journal of Social Sciences and Humanities*, 5(1), 45-56. <https://doi.org/10.29332/ijssh.v5n1.827>
- Kayani, U., Nasim, I., Aysan, A., Bashir, F., & Iqbal, U. (2024). Emerging trends of carbon emissions and foreign direct investment: Accounting for ecological footprints, renewable energy, globalization, and technological innovations in BRICS. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(29), 41586-41599. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-31495-4>
- Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M., & Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. *Nature Communications*, 11(1), Artículo 4174. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
- Sonter, L. J., Herrera, D., Barrett, D. J., Galford, G. L., Moran, C. J., & Soares-Filho, B. S. (2017). Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, 8(1), Artículo 1013. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00557-w>
- Wang, S., Lu, X., Chen, Z., Zhang, G., Ma, T., Jia, P., ... & Li, B. (2020). Evaluating the feasibility of illegal open-pit mining identification using InSAR coherence. *Remote Sensing*, 12(3), Artículo 367. <https://doi.org/10.3390/rs12030367>