

Moreno González, R.; Curcio, A.; Isgró, M.; Barbero, L.; Basallote, M. Caracterización de residuos mineros sulfurosos mediante imagen hiperespectral UAS de alta resolución: mina de Lagunazo (SO de España)

Caracterización de residuos mineros sulfurosos mediante imagen hiperespectral UAS de alta resolución: mina de Lagunazo (SO de España)

Moreno González, Raúl ¹ Curcio, Andrea ² Isgró, Melisa ¹ Barbero, Luis ¹ Basallote, María Dolores ³

¹ Universidad de Cádiz, España

² Eye4sky Technologies

³ Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, CSIC

ORCID: Moreno González 0000-0002-5679-2110 Curcio 0000-0002-3374-5151 Isgró 0000-0003-2194-8020 Barbero 0000-0002-3513-2025 Basallote 0000-0003-2011-3806

Correspondencia: raul.morenogonzalez@uca.es acc@eye4sky.com melisa.isgrochi@alum.uca.es luis.barbero@uca.es mdolores.basallote@csic.es

RESUMEN

Los residuos mineros de sulfuros constituyen focos de contaminación ambiental debido a la generación de drenaje ácido de mina (AMD) y a la elevada heterogeneidad mineralógica de sus superficies. El enfoque tradicional basado en muestreos puntuales presenta limitaciones en la captura de la variabilidad espacial, dificultando la delimitación de zonas activas de generación de acidez y movilización de elementos potencialmente tóxicos. En este estudio se evalúa el potencial de la teledetección hiperespectral desde plataforma UAS para la caracterización mineralógica de alta resolución de residuos de la mina de Lagunazo, en la Faja Pirítica Ibérica (SO de España). La identificación mineralógica se abordó mediante extracción de endmembers y desmezcla espectral por mínimos cuadrados no negativos, empleando librerías espectrales de referencia y validación cualitativa con difracción de rayos X (XRD). Este enfoque permitió definir asociaciones minerales realistas, formadas por combinaciones óptimas de 2–3 fases, que reflejan distintos estadios de la evolución paragénetica del AMD. La distribución espacial de estas facies revela tres dominios geoquímicos principales: (i) un dominio sulfuro-reactivo en el sector occidental, dominado por pirita y cuarzo; (ii) un dominio oxidativo avanzado en la zona central, dominado por goethitas y hematites, asociado a superficies más evolucionadas y relativamente estables; y (iii) un dominio transicional en el sector oriental, caracterizado por la coexistencia de óxidos de Fe y sulfatos férricos hidratados altamente solubles. Aunque estas sales secundarias actúan como reservorios temporales de acidez y metales durante los periodos secos, y su rápida disolución tras los primeros episodios de lluvia genera picos de contaminación que incrementan la carga contaminante transportada hacia los sistemas de drenaje superficial. En conjunto, los resultados evidencian el alto potencial de la teledetección hiperespectral UAS para identificar focos activos de contaminación y apoyar la priorización de medidas de gestión y restauración ambiental en entornos mineros abandonados.


Palabras clave: Teledetección hiperespectral; UAS; Residuos mineros; Unmixing espectral



Fecha de recepción: 10 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 10 febrero 2026

Caracterización de residuos mineros sulfurosos mediante imagen hiperespectral UAS de alta resolución: mina de Lagunazo (SO de España)


Moreno González, Raúl ⁽¹⁾, Curcio, Andrea ⁽²⁾, Isgró, Melisa ⁽¹⁾, Barbero, Luis ⁽¹⁾, Basallote, María Dolores ⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidad de Cádiz, España.


 0000-0002-5679-2110, raul.morenogonzalez@uca.es

 0000-0003-2194-8020, melisa.isgrochi@alum.uca.es ;  0000-0002-3513-2025, luis.barbero@uca.es.

⁽²⁾ Eye4sky Technologies.

 0000-0002-3374-5151, acc@eye4sky.com.

⁽³⁾ Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, CSIC.

 0000-0003-2011-3806, mdolores.basallote@csic.es.

Resumen: Los residuos mineros de sulfuros constituyen focos de contaminación ambiental debido a la generación de drenaje ácido de mina (AMD) y a la elevada heterogeneidad mineralógica de sus superficies. El enfoque tradicional basado en muestreos puntuales presenta limitaciones en la captura de la variabilidad espacial, dificultando la delimitación de zonas activas de generación de acidez y movilización de elementos potencialmente tóxicos. En este estudio se evalúa el potencial de la teledetección hiperespectral desde plataforma UAS para la caracterización mineralógica de alta resolución de residuos de la mina de Lagunazo, en la Faja Pirítica Ibérica (SO de España). La identificación mineralógica se abordó mediante extracción de *endmembers* y desmezcla espectral por mínimos cuadrados no negativos, empleando librerías espectrales de referencia y validación cualitativa con difracción de rayos X (XRD). Este enfoque permitió definir asociaciones minerales realistas, formadas por combinaciones óptimas de 2–3 fases, que reflejan distintos estadios de la evolución paragenética del AMD. La distribución espacial de estas facies revela tres dominios geoquímicos principales: (i) un dominio sulfuro-reactivo en el sector occidental, dominado por pirita y cuarzo; (ii) un dominio oxidativo avanzado en la zona central, dominado por goethitas y hematites, asociado a superficies más evolucionadas y relativamente estables; y (iii) un dominio transicional en el sector oriental, caracterizado por la coexistencia de óxidos de Fe y sulfatos férricos hidratados altamente solubles. Aunque estas sales secundarias actúan como reservorios temporales de acidez y metales durante los periodos secos, y su rápida disolución tras los primeros episodios de lluvia genera picos de contaminación que incrementan la carga contaminante transportada hacia los sistemas de drenaje superficial. En conjunto, los resultados evidencian el alto potencial de la teledetección hiperespectral UAS para identificar focos activos de contaminación y apoyar la priorización de medidas de gestión y restauración ambiental en entornos mineros abandonados.

Palabras clave: Teledetección hiperespectral; UAS; Residuos mineros; Unmixing espectral.

Abstract: Mining sulfide wastes constitute sources of environmental contamination due to the generation of acid mine drainage (AMD) and the high mineralogical heterogeneity of their surfaces. The traditional approach based on point sampling has limitations in capturing spatial variability, making it difficult to delineate active zones of acid generation and mobilization of potentially toxic elements. In this study, the potential of UAS-based hyperspectral remote sensing is evaluated for the high-resolution mineralogical characterization of wastes from the Lagunazo mine, located in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain). Mineral identification was carried out through endmember extraction and non-negative least squares (NNLS) spectral unmixing, using reference spectral libraries and qualitative validation by X-ray diffraction (XRD). This approach made it possible to define realistic mineral associations, formed by optimal combinations of 2–3 phases, which reflect different stages in the paragenetic evolution of AMD. The spatial distribution of these facies reveals three main geochemical domains: (i) a sulfide-reactive domain in the western sector, dominated by pyrite and quartz; (ii) an advanced oxidative domain in the central zone, dominated by goethite and hematite, associated with more evolved and relatively stable surfaces; and (iii) a transitional domain in the eastern sector, characterized by the coexistence of Fe oxides

and highly soluble hydrated ferric sulfates. Although these secondary salts act as temporary reservoirs of acidity and metals during dry periods, their rapid dissolution after the first rainfall events generates contamination peaks that increase the pollutant load transported to surface drainage systems. Overall, the results demonstrate the high potential of UAS hyperspectral remote sensing to identify active contamination hotspots and support the prioritization of environmental management and restoration measures in abandoned mining environments.

Keywords: Hyperspectral remote sensing; UAS; mine wastes; spectral unmixing.

1. INTRODUCCIÓN

La exposición de materiales ricos en sulfuros a condiciones atmosféricas favorece reacciones de oxidación que generan lixiviados ácidos (drenaje ácido de minas, AMD) enriquecidos en metales, capaces de degradar suelos y masas de agua durante largos periodos de tiempo. En zonas mineras históricas, grandes volúmenes de residuos permanecen expuestos en superficie, actuando como fuentes crónicas de liberación de contaminantes. Los residuos de sulfuros acumulados en forma de escombreras son sistemas altamente heterogéneos desde el punto de vista físico y mineralógico. Los métodos tradicionales basados en muestreos puntuales y análisis mineralógicos resultan insuficientes para capturar adecuadamente esta complejidad espacial, lo que limita la correcta identificación de los focos activos de contaminación.

Las técnicas de teledetección, y en particular las imágenes hiperespectrales, ofrecen una herramienta muy potente para la caracterización de residuos mineros. Los óxidos e hidróxidos de Fe y los sulfatos secundarios presentan rasgos espectrales diagnósticos en VNIR–SWIR, lo que permite su identificación mediante su comparación con librerías espectrales de referencia, como la del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS; Crowley *et al.*, 2003). La incorporación de sensores hiperespectrales en plataformas UAS ha supuesto un avance clave, al proporcionar resoluciones espaciales centimétricas que permiten analizar con gran detalle la heterogeneidad superficial de las escombreras.

Este trabajo se centra en la mina de Lagunazo (Fig. 1), localizada en la Faja Pirítica Ibérica (FPI). La FPI es una de las provincias metalogenéticas más importantes del mundo, caracterizada por sulfuros masivos dominados por contener pirita (FeS₂). La intensa actividad minera desarrollada en la FPI ha dejado numerosas explotaciones abandonadas, cortas mineras, galerías y grandes escombreras de residuos mineros (Grande *et al.*, 2014). La mina de Lagunazo representa un ejemplo típico de explotación abandonada de sulfuros, donde importantes volúmenes de residuos mineros permanecen expuestos en superficie sin medidas de restauración. Estos residuos presentan una elevada heterogeneidad textural y composicional, incluyendo materiales gruesos de estéril y fracciones finas derivadas de los diversos tratamientos del mineral.

El objetivo de esta comunicación es presentar un estudio basado en imágenes hiperespectrales UAS en la mina de Lagunazo, orientado a (i) identificar y cartografiar minerales secundarios asociados a la alteración de

residuos sulfurosos, (ii) interpretar los procesos geoquímicos dominantes a partir de las asociaciones minerales superficiales y (iii) evaluar el valor añadido de la teledetección hiperespectral para el análisis ambiental de zonas mineras abandonadas.

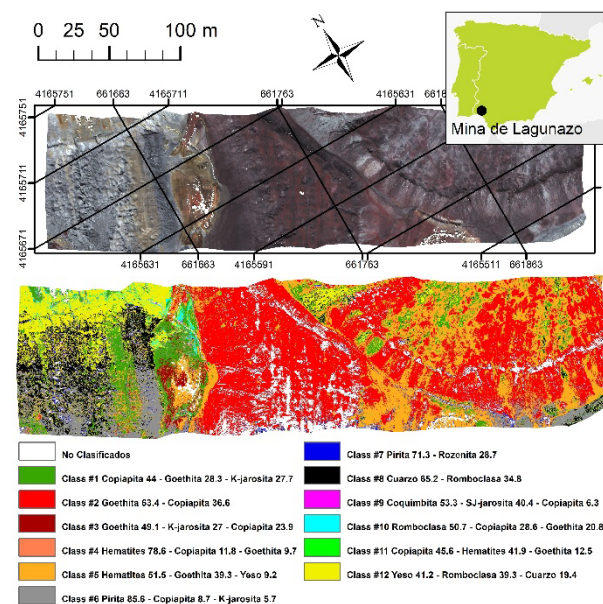


Figura 1. Mapa de los residuos mineros de la mina de Lagunazo (arriba) y clasificación mineralógica derivada de imágenes hiperespectrales (abajo).

2. METODOLOGÍA

Los vuelos se realizaron el 16 de mayo de 2023 sobre los residuos de la mina de Lagunazo mediante un UAS DJI Matrice 600 Pro equipado con un sensor hiperespectral Headwall VNIR–SWIR (400–2500 nm), con una resolución espectral aproximada de 6 nm en el rango VNIR y 8 nm en el rango SWIR, además de un sensor LiDAR. El LiDAR se empleó para generar un modelo digital de superficie (MDS) que permitió la correcta georreferenciación y ortorrectificación de los hipercubos. La misión se planificó con UgCS (120 m de altura, 5 m/s de velocidad y 40 % de solape lateral) bajo condiciones de iluminación homogénea, y la calibración radiométrica se realizó mediante una lona de referencia. Los datos VNIR y SWIR se procesaron de forma independiente en SpectralView (conversión a radiancia, corrección a reflectancia y ortorrectificación con SBET y MDS) y se fusionaron posteriormente en un mosaico VNIR–SWIR ortorrectificado y georreferenciado, con una resolución espacial final de 0,05 × 0,06 m.

El procesado posterior se realizó con ENVI v. 5.3.6. El sistema de referencia utilizado fue ETRS89 / UTM zona 29N (EPSG:25829). Para el análisis mineralógico se empleó el rango espectral comprendido entre 421 y 2449 nm, lo que dio lugar a un ortomosaico compuesto por 418 bandas espectrales explotables, abarcando de forma continua las regiones VNIR–SWIR. Previamente al análisis espectral, se aplicó una máscara para excluir áreas cubiertas por vegetación y cuerpos de agua, de manera que el estudio se centró exclusivamente en las superficies de residuos mineros. La transformación Minimum Noise Fraction (MNF) se aplicó para reducir el ruido de los datos hiperespectrales y resaltar la variabilidad espectral más relevante. Sobre 11 componentes MNF, se utilizó el Pixel Purity Index (PPI) junto con el análisis en el espacio n-dimensional (n-DV) para identificar los píxeles más puros y extraer *endmembers* espectrales representativos de las principales asociaciones mineralógicas presentes en los residuos mineros.

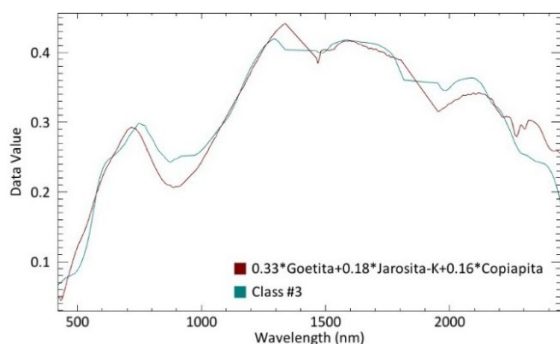


Figura 2. Comparación entre el *endmember* de la Clase 3 y su mejor mezcla mineralógica.

La caracterización mineralógica se llevó a cabo mediante desmezcla espectral lineal por mínimos cuadrados no negativos (NNLS), empleando la librería espectral mineralógica de la USGS como conjunto de *endmembers* de referencia (Fig. 2; Heinz & Chang, 2001; Clark *et al.*, 2017). Para cada *endmember*, el procedimiento consistió en: (i) identificar los minerales candidatos a partir de la similitud espectral con la librería; (ii) generar combinaciones de dos y tres minerales; (iii) ajustar cada combinación mediante NNLS, restringiendo las abundancias a valores no negativos; y (iv) comparar los ajustes obtenidos a partir del RMSE calculado entre el espectro observado y el espectro modelizado. La selección final de la mezcla óptima no se basó únicamente en el menor RMSE, sino también en la plausibilidad mineralógica de las asociaciones resultantes, evitando combinaciones espectralmente aceptables pero inconsistentes con el contexto mineralógico del área.

Los resultados de la desmezcla espectral se contrastaron con análisis mineralógicos independientes obtenidos mediante difracción de rayos X (XRD), realizados previamente (Rodrigo Molina, 2021). Esta validación permitió confirmar las principales fases minerales identificadas espectralmente y respaldar la interpretación de los ensamblajes mineralógicos derivados de la imagen hiperespectral.

3. RESULTADOS

La desmezcla espectral permitió descomponer cada clase en combinaciones óptimas de 2–3 minerales, obteniendo ensamblajes mineralógicos coherentes con el patrón espacial observado en la Figura 1. En conjunto, las clases no representan minerales “puros”, sino facies superficiales que reflejan distintos estadios de la evolución paragénética bajo condiciones de drenaje ácido de mina. La correspondencia entre los ensamblajes identificados y los principales dominios superficiales cartografiados refuerza la consistencia mineralógica de los resultados.

Las facies dominadas por sulfuros se concentran en el sector occidental, donde predominan tonalidades grises (Fig. 1) asociadas a superficies dominadas por piritita y cuarzo. Estas clases representan los focos más activos de generación de AMD, al mantener un alto potencial de producción de acidez y movilización de metales. Esta interpretación se ve reforzada por la composición de los lixiviados que surgen de la escombrera sulfuro-reactiva, que presentan pH ácido y concentraciones muy elevadas de metales y metaloides (As hasta 2,1 mg/L, Fe hasta 407,5 mg/L, Pb hasta 0,4 mg/L y Zn hasta 16,6 mg/L), evidenciando una intensa movilización asociada a la oxidación de sulfuros primarios (Rodrigo Molina, 2021). En este mismo sector se identifican parches claros asociados a sales evaporíticas (copiapita, romboclasa, coquimbita, rozenita y yeso), interpretadas como precipitados superficiales bajo condiciones de elevada evaporación y déficit hídrico.

El sector central, caracterizado por tonalidades rojizas continuas (Fig. 1), está controlado por óxidos e hidróxidos de Fe^{3+} , con predominio de goethita y hematites. La desmezcla muestra composiciones entre ambas fases, coherentes con superficies altamente oxidadas y geoquímicamente evolucionadas, donde el Fe se ha inmovilizado mayoritariamente en minerales relativamente estables. Estas facies representan estadios avanzados de la paragénesis del AMD y, en términos relativos, un menor potencial de generación directa de contaminación. Esta interpretación se ve respaldada por la menor afección del lixiviado, que drena entre las escombreras central y oriental y presenta concentraciones significativamente más bajas de metales y metaloides (As 0,01 mg/L, Fe 6,5 mg/L, Pb 0,1 mg/L y Zn 2,5 mg/L) en comparación con los lixiviados asociados al dominio sulfuro-reactivo del sector occidental (Rodrigo Molina, 2021). No obstante, bajo condiciones suficientemente ácidas, estas fases férricas pueden redisolverse parcialmente y contribuir a la química de los lixiviados.

El sector oriental presenta un patrón mixto, con alternancia de tonalidades blanquecinas y rojizas (Fig. 1). En estas clases, la desmezcla indica la coexistencia de goethita–hematites con sulfatos férricos hidratados (p. ej., copiapita, romboclasa, coquimbita y rozenita), lo que sugiere superficies sometidas a ciclos repetidos de oxidación, disolución y reprecipitación de sales. Desde el punto de vista ambiental, este dominio combina fases relativamente estables (óxidos de Fe) con fases altamente solubles (sales evaporíticas), que actúan como reservorios temporales de acidez y metales y

pueden generar picos de contaminación durante los primeros eventos de lluvia. La composición del lixiviado (Rodrigo Molina, 2021), con concentraciones moderadas de Fe y metales traza, es coherente con este comportamiento transicional entre los dominios sulfuro-reactivo y oxidativo avanzado, pero manteniendo un potencial de movilización asociado a la disolución episódica de sales.

En conjunto, la distribución espacial de los ensamblajes identificados por la desmezcla permite distinguir de forma continua (i) focos sulfuro-reactivos en el oeste (pirita-cuarzo), (ii) un dominio oxidativo estable en la zona central (goetita-hematita) y (iii) un dominio oriental de comportamiento transicional, controlado por óxidos de Fe y sales evaporíticas altamente solubles.

4. CONCLUSIONES

La imagen hiperespectral adquirida desde plataforma UAS permitió caracterizar con alta resolución espacial los principales ensamblajes mineralógicos de los residuos de la mina de Lagunazo, evidenciando una marcada heterogeneidad superficial que no puede capturarse mediante muestreo puntual. La distribución espacial de las facies permitió diferenciar tres dominios geoquímicos principales: (i) un dominio sulfuro-reactivo en el sector occidental (pirita-cuarzo), que constituye el principal foco de generación de acidez y movilización de metales; (ii) un dominio oxidativo avanzado en la zona central, dominado por goethita y hematites, asociado a superficies geoquímicamente más evolucionadas y relativamente más estables; y (iii) un dominio transicional en el sector oriental, caracterizado por la coexistencia de óxidos de Fe y sulfatos férricos hidratados altamente solubles.

La coherencia entre la cartografía hiperespectral y la respuesta hidrogeoquímica refuerza esta zonación: los lixiviados asociados a la escombrera sulfuro-reactiva presentan pH ácido y concentraciones muy elevadas de metales y metaloides, mientras que el lixiviado que drena entre las escombreras central y oriental muestra una afección significativamente menor, coherente con el carácter más estable del dominio oxidativo y el comportamiento intermedio del dominio transicional. Asimismo, las sales sulfatadas secundarias (copiapita, rozenita, romboclasa, coquimbita y yeso) actúan como reservorios temporales de acidez y elementos potencialmente tóxicos durante los periodos secos, su disolución durante los primeros episodios de lluvia después del estío genera picos de contaminación, incrementándose de forma significativa la carga transportada desde las escombreras hacia los sistemas de drenaje superficial. En conjunto, la integración de cartografía hiperespectral UAS y desmezcla espectral, apoyada por datos hidrogeoquímicos, constituye una herramienta robusta para la identificación de focos activos de contaminación y para la priorización de medidas de gestión y restauración ambiental en entornos mineros abandonados.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por el MICINN (FJC2021-047600-I; AEI/NextGenerationEU), la Junta de Andalucía/CUII y FSE+ (DGP_POST_2024_00813). MD Basallote agradece a la Agencia Estatal de Investigación (AEI) la financiación del contrato RYC2022-035326-I, cofinanciado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FSE+. El equipamiento científico ha sido financiado por los proyectos de infraestructuras EQC2018-004446-P (Gobierno de España) y PAIDI2020-INFRA/IN (Junta de Andalucía y Ministerio de Universidades).

REFERENCIAS

- Clark, R. N., Swayze, G. A., Kokaly, R. F., et al. (2017). USGS spectral library version 7. *U.S. Geological Survey Data Series* 1035. <https://doi.org/10.3133/ds1035>
- Crowley, J. K., Williams, D. E., Hammarstrom, J. M., Piatak, N., Mars, J. C., & Chou, I.-M. (2003). Spectral reflectance properties (0.4–2.5 μm) of secondary Fe-oxide, Fe-hydroxide, and Fe-sulphate-hydrate minerals associated with sulphide-bearing mine wastes. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 3(3), 219–228. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/03-001>
- Grande, J., Valente, T., De la Torre, M. L., Santisteban, M., Cerón, J. C., & Pérez-Ostale, E. (2014). Characterization of acid mine drainage sources in the Iberian Pyrite Belt: Base methodology for quantifying affected areas and for environmental management. *Environmental Earth Sciences*, 71, 2729–2738. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2652-0>
- Heinz, D. C., & Chang, C.-I. (2001). Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(3), 529–545. <https://doi.org/10.1109/36.911111>
- Rodrigo Molina, I. (2021). Determinación del potencial contaminante de la mina de Lagunazo sobre la rivera del Cobica (SO España). *Trabajo Fin de Máster, Máster en Geología y Gestión Ambiental de los Recursos Minerales, Universidad de Huelva*.