

# Caracterización espectral de sales secundarias en las minas de Tharsis (España) mediante un sensor hiperespectral montado en UAS

Raúl Moreno-González (1\*), Melisa Isgro (1), María Dolores Basallote (2), Luis Barbero (1),

(1) Departamento de Ciencias de la Tierra, Servicio de drones, Instituto de Universitario de Investigación Marina (INMAR), Universidad Cádiz, Campus Río San Pedro, s/n, 11510, Puerto Real (Cádiz), España.

(2) Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía, CSIC, Campus Río San Pedro, 11510 Puerto Real (Cádiz), España.

\* corresponding author: [raul.morenogonzalez@uca.es](mailto:raul.morenogonzalez@uca.es)

**Palabras Clave:** Hiperespectral, Sensores remotos, Sistema aéreo no tripulado, Escombreras de residuos mineros, Drenaje ácido de minas. **Key Words:** Hyperspectral, Remote sensing, Unmanned aerial system, Mine-waste dumps, acid mine drainage.

## INTRODUCCIÓN

La minería de sulfuros ha tenido un gran impacto ambiental, especialmente en la contaminación del agua debido al drenaje ácido de mina (AMD). La Faja Pirítica Ibérica (FPI) es muy rica en depósitos masivos de sulfuros compuestos principalmente de pirita. Una de las explotaciones mineras más importantes en la FPI son las minas de Tharsis (Fig. 1), que ha dejado enormes escombreras de residuos mineros de diversos tipos en los alrededores. Numerosos lixiviados ácidos emergen de estos desechos y drenan hacia los ríos de la zona. En la estación seca, los contaminantes precipitan en forma de sales evaporíticas solubles y minerales secundarios que se redisuelven con las primeras lluvias importantes del otoño. El uso emergente de sistemas aéreos no tripulados (UAS) para evaluar y monitorear la contaminación minera se ha convertido en una herramienta para recopilar datos a una resolución espacial más alta que la de la mayoría de aviones y satélites. Imágenes hiperespectrales UAS fueron utilizadas para el mapeo multi-temporal de minerales asociados con AMD, así como el mapeo de concentraciones de metales disueltos, propiedades fisicoquímicas y la detección de minerales secundarios de hierro en aguas afectadas por AMD. El objetivo del presente estudio es identificar las sales evaporíticas y minerales secundarios que se forman en la estación seca sobre los residuos mineros de Tharsis con sensor hiperespectral basado en UAS.

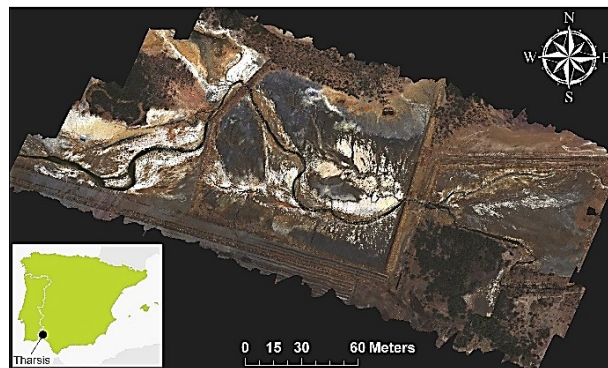


Fig 1. Mapa de localización y ortomosaico hiperespectral en RGB de la zona de estudio.

## METODOLOGÍA

Se utilizó el UAS DJI Matrice 600 Pro con un sensor hiperespectral (HS) Headwall Coaligned VNIR-SWIR para obtener imágenes aéreas sobre los residuos mineros. También está equipado con un LiDAR para obtener un modelo digital de superficie y así facilitar la ortorrectificación de los hipercubos. Para el preprocesamiento de los datos HS y obtención del ortomosaico se utilizó el software spectralViewer v.3.2.0. El análisis de los datos HS se realizó con el software ENVI v.5.3.6. Las longitudes de onda entre 2001 nm y 2450 nm fueron seleccionadas debido a que los minerales presentan absorciones características en este rango, quedando un ortomosaico de 76 bandas. Para la identificación mineral espectral de los datos obtenidos se utilizó la biblioteca de la USGS (<https://www.usgs.gov/tools/usgs-digital-spectral-library>).

## RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los minerales identificados en el área de estudio son: rozenita, copiapita, ferricopiapita, jarosita K, hematita, goethita, illita y clinocloro (Fig. 2 izq). Se identificaron 19 firmas espectrales, varias de las cuales corresponden a variaciones del mismo mineral. Posteriormente, estas firmas espectrales identificadas se utilizaron para clasificar los píxeles del área de estudio y así obtener la ubicación de los minerales (Fig. 2 drch). La presencia de illita y clinocloro es coherente con la geología del área. La copiapita es el mineral más abundante, ubicado principalmente alrededor de los lixiviados (Fig. 1-2 drch), en forma de eflorescencias de color blanco y amarillo verdoso de 2 a 5 cm de espesor sobre los desechos mineros y lodos secos. La copiapita generalmente precipita como una costra debido a la rápida deshidratación de las aguas porosas de los residuos mineros (Valente et al. 2013). Este mineral es frecuentemente el primero en formarse en estas sales eflorescentes, siendo el más estable de los sulfatos hidratados férricos. Además, su presencia indica un grado relativamente alto de oxidación y humedad en el momento de su formación y conservación (Velasco et al., 2005). La rozenita se encuentra principalmente en las áreas noroeste y este, con una presencia limitada en la zona central del mapa, también sobre los desechos y lodos mineros. La rozenita aparece en afloramientos o cerca de filtraciones ácidas, lo que indica la proximidad a fuentes que contienen pirita (Valente et al., 2013). Velasco et al. (2005) sugiere que la rozenita se produce por la pérdida rápida y progresiva de agua de la melanterita y luego se recrystaliza en szomolnokita. Por otro lado, la ferricopiapita se observa difusa por las sales, pudiendo formarse a partir de la copiapita mediante oxidación (Velasco et al., 2005).

Las sales evaporíticas, como la copiapita y la rozenita, están compuestas por mezclas complejas de sales con metales y productos ocre, como la jarosita. La jarosita aparece en dos entornos. En el primero, forma costras con otros sulfatos (como la copiapita o la rozenita) debido a la evaporación del agua, especialmente en la parte central, dando un color naranja a las sales. Estas aguas ricas en Fe y  $\text{SO}_4^{2-}$  estarían sobresaturadas en varios sulfatos, incluida la jarosita. Aunque también podría ser debido a una probable secuencia paragenética de AMD, en la que la copiapita se transforma en jarosita (Valente et al., 2013). Por otro lado, en áreas alejadas de los lixiviados se observan tonos naranjas/rojizos en forma de costras duras ricas en hierro en los bordes de las zonas norte, oeste, sureste y en las dos presas. La goethita se encuentra junto a la jarosita en estas áreas, más alejadas de los lixiviados. La hematita está presente en áreas más periféricas que la jarosita y la goethita. Mediante procesos de post-precipitación, la goethita sufre una recrystalización parcial en hematita. La presencia de jarosita, goethita y hematita señala las etapas finales de la secuencia paragenética de AMD. La existencia de copiapita, rozenita, ferricopiapita, jarosita K, goethita y hematita indica una zonificación de mezclas de minerales secundarios y una relativa inestabilidad de estas asociaciones (Velasco et al., 2005). Un siguiente estudio temporal del área de estudio nos permitirá identificar las diferentes etapas de la secuencia paragenética de AMD.

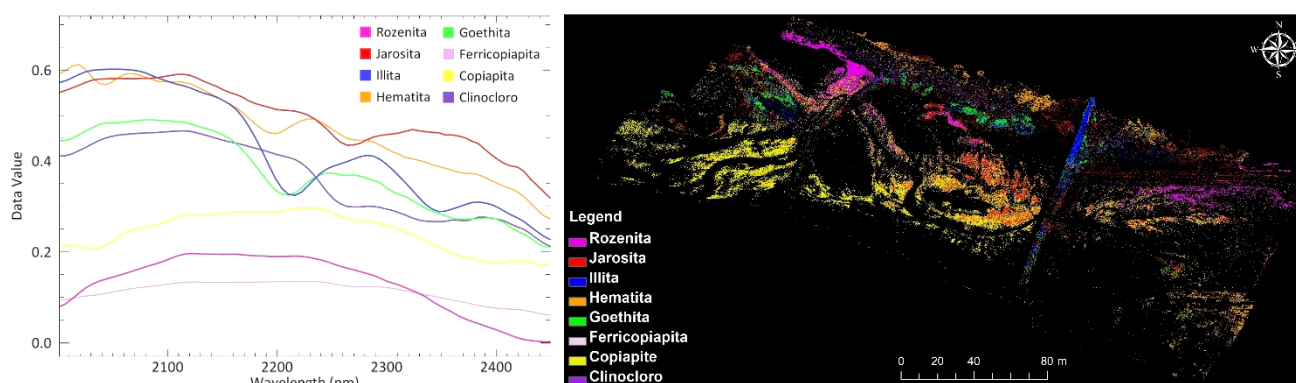


Fig 2. Representación espectral (izq.) y mapa de localización de los minerales identificados (drch.).

## REFERENCIAS

- Valente, T., Grande, J. A., de la Torre, M. L., Santisteban, M., & Cerón, J. C. (2013). Mineralogy and environmental relevance of AMD-precipitates from the Tharsis mines, Iberian Pyrite Belt (SW, Spain). *Applied Geochemistry*, 39, 11–25. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.09.014>.
- Velasco, F., Alvaro, A., Suarez, S., Herrero, J.-M., & Yusta, I. (2005). Mapping Fe-bearing hydrated sulphate minerals with short wave infrared (SWIR) spectral analysis at San Miguel mine environment, Iberian Pyrite Belt (SW Spain). *Journal of Geochemical Exploration*, 87(2), 45–72. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2005.07.002>.