

Pereira Rodríguez, I.; García-Meléndez, E.; Ferrer-Julà, M.; van der Werff, H. Cartografía de la distribución espacial de minerales indicadores de drenaje ácido de mina mediante imágenes WorldView-3

# Cartografía de la distribución espacial de minerales indicadores de drenaje ácido de mina mediante imágenes WorldView-3

Pereira Rodríguez, Inés<sup>1</sup> García-Meléndez, Eduardo<sup>1</sup> Ferrer-Julà, Montserrat<sup>1</sup> van der Werff, Harald<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidad de León, España

<sup>2</sup> Faculty for Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, Netherlands

ORCID: Pereira Rodríguez 0000-0002-7328-4791 García-Meléndez 0000-0001-8217-8205 Ferrer-Julà 0000-0001-8021-1040 van der Werff 0000-0002-2871-3913

Correspondencia: [iperr@unileon.es](mailto:iperr@unileon.es) [egarm@unileon.es](mailto:egarm@unileon.es) [mferj@unileon.es](mailto:mferj@unileon.es) [h.m.a.vanderwerff@utwente.nl](mailto:h.m.a.vanderwerff@utwente.nl)

## RESUMEN

El drenaje ácido de mina (DAM) es uno de los principales problemas ambientales asociados a la minería metálica, ya que provoca la oxidación de los sulfuros, como la pirita, y la consiguiente liberación de metales, iones sulfato y acidificación del agua. Este proceso favorece la precipitación de minerales secundarios de hierro, como la hematite, la goethita y la jarosita, cuya respuesta espectral permite su detección mediante teledetección satelital. En este estudio se evalúa la capacidad de las imágenes multiespectrales VNIR del satélite WorldView-3 para cartografiar y discriminar estos minerales en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE de España). Para ello se aplicaron dos técnicas espectrales —cocientes de bandas y una técnica de ajuste parabólico basada en máximos de reflectancia— y los resultados se validaron mediante difracción de rayos X de 74 muestras superficiales de suelo. Los resultados indican que WorldView-3 permite cartografiar los patrones espaciales asociados al DAM y discriminar parcialmente entre hematite y el grupo goethita-jarosita, evidenciando su potencial para estudios de detalle en áreas mineras afectadas por procesos de oxidación de sulfuros.

**Palabras clave:** Hematita, Goethita, Jarosita, Máximo de reflectancia, Ajuste parabólico


Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

# Cartografía de la distribución espacial de minerales indicadores de drenaje ácido de mina mediante imágenes WorldView-3

Pereira Rodríguez, Inés <sup>(1)</sup>, García-Meléndez, Eduardo <sup>(1)</sup>, Ferrer-Julià, Montserrat <sup>(1)</sup>, van der Werff, Harald <sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup> Universidad de León, España.

 0000-0002-7328-4791, iperr@unileon.es ;  0000-0001-8217-8205, egarm@unileon.es

 0000-0001-8021-1040, mferj@unileon.es

<sup>(2)</sup> Faculty for Geo-Information Science and Earth Observation, University of Twente, Netherlands.

 0000-0002-2871-3913, h.m.a.vanderwerff@utwente.nl.

**Resumen:** El drenaje ácido de mina (DAM) es uno de los principales problemas ambientales asociados a la minería metálica, ya que provoca la oxidación de los sulfuros, como la pirita, y la consiguiente liberación de metales, iones sulfato y acidificación del agua. Este proceso favorece la precipitación de minerales secundarios de hierro, como la hematite, la goethita y la jarosita, cuya respuesta espectral permite su detección mediante teledetección satelital. En este estudio se evalúa la capacidad de las imágenes multispectrales VNIR del satélite WorldView-3 para cartografiar y discriminar estos minerales en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión (SE de España). Para ello se aplicaron dos técnicas espectrales —cocientes de bandas y una técnica de ajuste parabólico basada en máximos de reflectancia— y los resultados se validaron mediante difracción de rayos X de 74 muestras superficiales de suelo. Los resultados indican que WorldView-3 permite cartografiar los patrones espaciales asociados al DAM y discriminar parcialmente entre hematite y el grupo goethita-jarosita, evidenciando su potencial para estudios de detalle en áreas mineras afectadas por procesos de oxidación de sulfuros.

**Palabras clave:** Hematite, Goethita, Jarosita, Máximo de reflectancia, Ajuste parabólico

## ***Mapping the spatial distribution of acid mine drainage indicator minerals using WorldView-3 imagery***

**Abstract:** Acid mine drainage (AMD) is one of the main environmental problems associated with metallic mining, as it promotes the oxidation of sulphides such as pyrite and the subsequent release of metals, sulphate ions, and water acidification. This process favours the precipitation of secondary iron minerals, such as hematite, goethite, and jarosite, whose spectral response enables their detection through satellite remote sensing. This study evaluates the capability of WorldView-3 VNIR multispectral imagery to map and discriminate these minerals in the Sierra Minera de Cartagena–La Unión (SE Spain). Band ratios and a parabolic fitting approach based on reflectance maxima were applied and validated against X-ray diffraction analyses of 74 surface soil samples. The results indicate that WorldView-3 is able to map the general spatial patterns of AMD and provides partial discrimination between hematite and the goethite–jarosite group, highlighting its potential for detailed mineral mapping in mining-affected environments.

**Keywords:** Hematite, Goethite, Jarosite, Reflectance Maximum, Parabolic Fitting

## 1. INTRODUCCIÓN

El drenaje ácido de mina (DAM) es un problema ambiental asociado a la oxidación de sulfuros expuestos durante la actividad minera, que genera aguas ácidas con elevadas concentraciones de iones de sulfato y metales disueltos, degradando suelos, ecosistemas acuáticos y recursos hídricos. Los cambios fisicoquímicos de estas aguas favorecen la precipitación de minerales secundarios como la jarosita, que se forma

en ambientes muy ácidos y ricos en sulfatos; la goethita, asociada a condiciones de acidez moderada; y la hematite, que representa la fase más estable y se desarrolla en entornos con pH más elevado (Nordstrom *et al.*, 2015). En este contexto, la distribución espacial de estos minerales constituye un indicador de las condiciones ambientales.

Estos minerales presentan características espectrales diagnósticas en la región del visible e infrarrojo cercano

(VNIR), con absorciones entre 450–550 nm y 800–1100 nm, y un máximo de reflectancia entre 600–900 nm (Figura 1) (Rossman and Ehlmann, 2019). La posición precisa de estos rasgos permite su discriminación utilizando sensores satelitales. En este trabajo se emplean imágenes multispectrales de la región VNIR de WorldView-3. WorldView-3 es un sensor comercial que ofrece una resolución espacial elevada ( $\approx 1,2$  m), lo que lo convierte en una herramienta especialmente adecuada para estudios de detalle en áreas mineras complejas. Este estudio evalúa la eficacia de WorldView-3 para la identificación de hematite, goethita y jarosita en una antigua región minera.

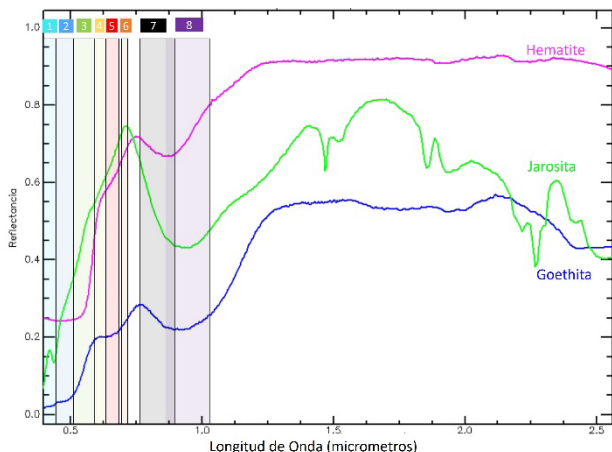


Figura 1. Curvas espectrales de minerales de hierro y localización de las bandas de WorldView-3.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

La Sierra Minera de Cartagena-La Unión (Figura 2), situada en el sureste de España, es un antiguo distrito minero de explotación de plomo, zinc y hierro durante los siglos XIX y XX. Esta explotación generó grandes volúmenes de residuos mineros que, tras el cese de la actividad en 1991, quedaron expuestos sin restauración ambiental (López-Morell *et al.*, 2019).

El área presenta un clima mediterráneo semiárido, con precipitaciones escasas e irregulares, que se concentran en episodios torrenciales, que favorecen la erosión y el transporte de materiales mineros a través de ramblas.

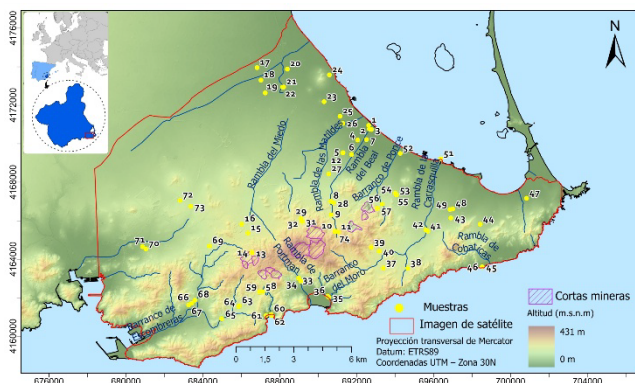


Figura 2. Localización del área de estudio y muestras.

### 2.2. Datos satelitales y pre-procesado

Se empleó una imagen de WorldView-3 adquirida el 13 de julio de 2020 (Vantor, Colorado, EE.UU.). La imagen dispone de 8 bandas en la región VNIR con una resolución espacial uniforme de aproximadamente 1,2 m.

La imagen se utilizó como producto de reflectancia en superficie. La corrección atmosférica fue realizada por el proveedor (Maxar) mediante el procesador AComp.

Antes del análisis espectral, se aplicaron máscaras de vegetación y agua mediante los índices NDVI y NDWI, enmascarando los píxeles con valores de NDVI fuera del rango 0,0–0,3 y NDWI > 0,04.

### 2.3. Técnicas espectrales

#### 2.3.1. Cocientes de bandas

La técnica de cocientes de bandas se utilizó para diferenciar composicionalmente hematite, goethita y jarosita en función de sus respuestas espectrales en el visible. Los óxidos e hidróxidos de hierro presentan una mayor reflectancia en la región del rojo (600–700 nm) que en la del verde (500–570 nm), aunque con diferencias relativas entre minerales. A partir de este comportamiento espectral se calculó el siguiente cociente (Eq. 1) (Cudahy, 2012):

$$\text{Cociente composicional} = \frac{\text{Verde}}{\text{Rojo}} \quad (1)$$

Se emplearon las bandas verde (B3) y roja (B5).

Valores elevados del cociente se asocian a superficies dominadas por minerales con elevada reflectancia en el rojo, como la hematite; valores intermedios se relacionan con la jarosita; y valores más bajos corresponden generalmente a la goethita (Cudahy, 2012). Este método permite identificar tendencias composicionales dominantes, aunque no debe interpretarse como una identificación mineralógica absoluta debido al solapamiento espectral y a la frecuente mezcla de fases minerales en ambientes naturales.

#### 2.3.2. Técnica de ajuste parabólico

La técnica de ajuste parabólico, propuesta por van der Werff y van der Meer (2015), es un método desarrollado para el análisis de minerales de hierro mediante imágenes multispectrales. Su aplicación se basa en el ajuste de una función polinómica de segundo grado (parábola) a un conjunto mínimo de tres bandas espectrales, lo que la hace adecuada para sensores multispectrales.

En este estudio, la técnica se adaptó para analizar los máximos de reflectancia en el rango espectral 600–900 nm. A partir de tres bandas VNIR seleccionadas, se ajustó una parábola para interpolar la posición espectral del máximo de reflectancia de esta parábola en cada píxel. La selección de las combinaciones óptimas de bandas se realizó a partir de tres espectros tomados en laboratorio de tres muestras de campo representativas de hematite, goethita y jarosita, obtenidos mediante un espectrorradiómetro ASD FieldSpec 4 y previamente caracterizados por difracción de rayos X (DRX). La

longitud de onda estimada de dicho máximo permite discriminar entre los tres minerales, ya que cada mineral presenta su pico de reflectancia en posiciones ligeramente distintas dentro de este intervalo espectral.

## 2.4. Validación

La validación se realizó mediante análisis DRX de 74 muestras de suelo. Los resultados derivados de las técnicas espectrales se compararon con la mineralogía determinada por DRX para evaluar la precisión de cada sensor y técnica, estableciendo la correspondencia entre el mapa resultante y el píxel asociado a la localización de cada muestra de suelo.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Cociente de bandas

El mapa obtenido a partir del cociente de bandas (Figura 4A) muestra una distribución espacial coherente de los minerales asociados al DAM. La hematite aparece como la fase más extendida, especialmente en las superficies inundables que drenan hacia el Mar Menor. Estas áreas presentan valores elevados del cociente, consistentes con una mayor reflectancia en la región del rojo.

Por su parte, la goethita y la jarosita se concentran principalmente en cabeceras de ramblas, taludes y sectores próximos a los cauces. Estas zonas suelen estar asociadas a mayor dinámica hidrológica y a condiciones de acidez más marcadas, lo que favorece la formación de fases más hidratadas o sulfatadas. No obstante, la transición entre goethita y jarosita no siempre es nítida, lo que sugiere mezcla mineralógica superficial y cierto solapamiento espectral en el visible, lo que se observa en las muestras de campo y en los resultados de validación (Tabla 1).

### 3.2. Técnica de ajuste parabólico

La combinación de bandas B5, B6 y B7 permitió estimar los máximos de reflectancia característicos de los tres minerales analizados, situados aproximadamente en ~840 nm para la hematite, ~775 nm para la goethita y ~730 nm para la jarosita (Figura 3).

El mapa resultante (Figura 4A) presenta una cartografía más extensa espacialmente que la obtenida con el cociente de bandas (Figura 4B). La hematite aparece claramente delimitada y con mayor continuidad espacial, mientras que las áreas clasificadas como goethita-jarosita tienen una distribución más fragmentada, especialmente visible en zonas próximas a cauces.

Sin embargo, debido a la proximidad espectral del máximo de reflectancia de goethita y jarosita, sus máximos coinciden dentro del mismo intervalo de bandas, lo que impide su separación consistente. En consecuencia, la técnica permite discriminar de forma fiable la hematite frente al resto de fases, pero no diferenciar con claridad entre estos minerales más hidratados.

### 3.3. Validación

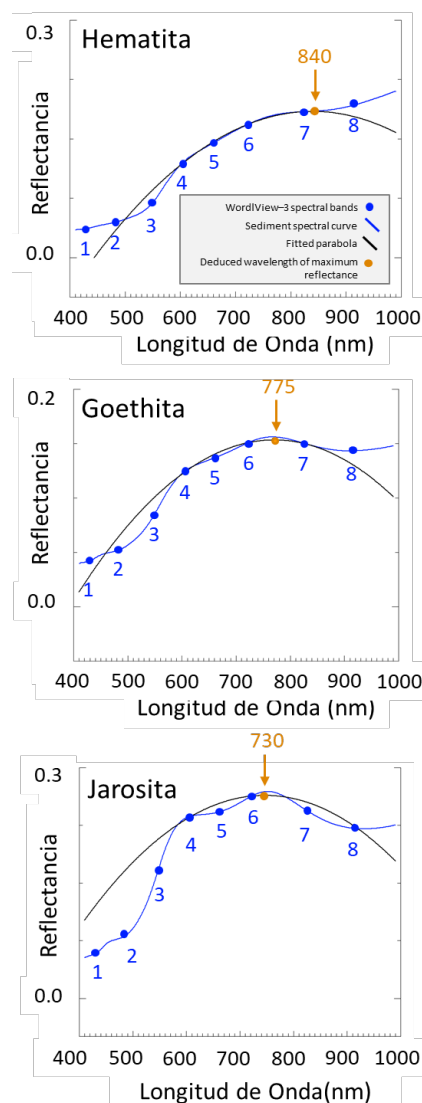
La validación mediante DRX (Tabla 1) confirmó un buen comportamiento general del sensor. El cociente de bandas alcanzó un 74,3 % de aciertos, con un 16,2 % de

errores y un 9,5 % de muestras no clasificadas. Por su parte, el ajuste parabólico obtuvo un 70,3 % de aciertos, reduciendo los errores al 8,1 %, aunque incrementando el porcentaje de no clasificados hasta el 21,6 %.

Las principales confusiones se produjeron entre jarosita y goethita, mientras que la hematite mostró una mayor consistencia en ambas metodologías.

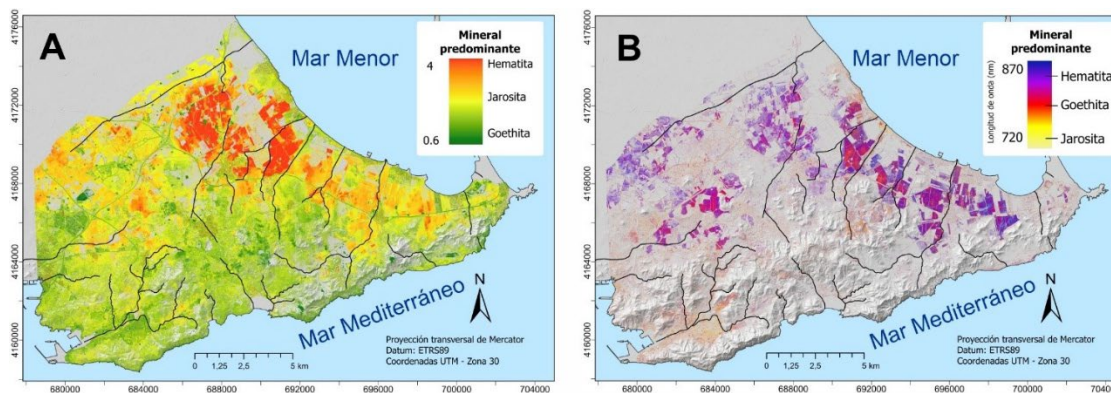
**Tabla 1.** Resultados de validación (n = 74) para WorldView-3 con el cociente de bandas y el ajuste parabólico. Se indican aciertos, fallos y no clasificados.

	Cociente de bandas	Ajuste parabólico
Aciertos	55 (74,3%)	52 (70,3%)
Fallos	12 (16,2%)	6 (8,1%)
No clasificados	7 (9,5%)	16 (21,6%)



**Figura 3.** Espectro ASD de la hematite, goethita y jarosita (línea azul), bandas de WorldView-3 (puntos azules), parábola ajustada (línea negra) y longitud de onda estimada del máximo de reflectancia (punto naranja).

El mapa derivado del ajuste parabólico (Figura 4B) muestra la distribución espacial de las fases minerales identificadas. La cartografía se concentra principalmente en el sector aguas abajo del Campo de Cartagena, donde se observa un claro predominio de la hematite como fase más extendida.



**Figura 4.** (A) Cociente de bandas de composición (B5/B3) y (B) Longitud de onda del máximo de reflectancia estimada mediante la técnica de ajuste parabólico para WorldView-3

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los resultados confirman que WorldView-3 es capaz de cartografiar con coherencia los patrones espaciales del DAM en la Sierra Minera de Cartagena-La Unión. La elevada resolución espacial ( $\approx 1,2$  m) permite identificar con gran detalle superficies mineralizadas, depósitos y trazados de ramblas, lo que resulta especialmente útil en un entorno minero complejo y heterogéneo.

Desde el punto de vista mineralógico, la hematite es la fase que se identifica con mayor fiabilidad. Esto es coherente con su mayor estabilidad geoquímica y con la posición relativamente diferenciada de su máximo de reflectancia dentro del intervalo VNIR analizado. En cambio, la separación entre goethita y jarosita presenta mayores dificultades debido a la proximidad de sus rasgos espectrales y a la limitada resolución espectral del sensor en la región del *red-edge*.

El cociente de bandas proporciona una cartografía más completa, mientras que el ajuste parabólico reduce las clasificaciones erróneas, pero aumenta los píxeles no asignados.

En conjunto, WorldView-3 demuestra ser una herramienta válida para estudios de detalle en áreas afectadas por DAM. No obstante, la discriminación precisa entre fases secundarias con rasgos espectrales muy próximos sigue estando condicionada por la resolución espectral disponible en el VNIR. Resultados similares han sido obtenidos en el sureste de España, como el distrito de Rodalquilar, donde WorldView-3 demostró su capacidad para cartografiar minerales de alteración férrica en condiciones de baja cobertura vegetal (Bendini, 2019).

#### 5. AGRADECIMIENTOS

I. Pereira agradece al ITC de la Universidad de Twente la estancia de investigación y los análisis de DRX realizados

La discriminación mineralógica permitió diferenciar la hematite del grupo goethita-jarosita, aunque no fue posible separar con claridad estas dos últimas fases debido a la proximidad espectral de sus máximos de reflectancia.

por su Laboratorio de Geoquímica. Este trabajo fue financiado por el proyecto PID2023-150229OB-100 (HYPERLANDFORM), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER, y la participación de I. Pereira por el contrato FPU21/04495.

#### 6. REFERENCIAS

- Cudahy, T. (2012). *Australian ASTER geoscience product notes, version 1*. CSIRO ePublish No. EP-30-07-12-44. CSIRO, Australia.
- Bedini, E. (2019). Application of WorldView-3 imagery and ASTER TIR data to map alteration minerals associated with the Rodalquilar gold deposits, southeast Spain. *Advances in Space Research*, 63(10), 3346–3357. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2019.01.047>
- López-Morell, M. Á., & Pérez de Perceval Verde, M. Á. (2019). From old mining to new mining: The introduction of differential flotation in Spanish mines and its environmental impact. *Revista de Historia Industrial—Industrial History Review*, 28, 119–148. <https://doi.org/10.1344/rhi.v28i77.28892>
- Nordstrom, D. K., Blowes, D. W., & Ptacek, C. J. (2015). Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. *Applied Geochemistry*, 57, 3–16. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008>
- Rossmann, G. R., & Ehlmann, B. L. (2019). Electronic spectra of minerals in the visible and near-infrared regions. En *Remote compositional analysis: Techniques for understanding spectroscopy, mineralogy, and geochemistry of planetary surfaces* (pp. 3–20). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781316888872.002>
- van der Werff, H., & van der Meer, F. (2015). Sentinel-2 for mapping iron absorption feature parameters. *Remote Sensing*, 7, 12635–12653. <https://doi.org/10.3390/rs71012635>