

García-Meléndez, E.; Ferrer-Julià, M.; Cruz, J.; García-Rivas, J.; Valenzuela, P.; Rodríguez, I.; Colmenero-Hidalgo, E.; Pereira, I. Respuesta espectral de formas del relieve con imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) en el sector Sureste de la Comunidad de Madrid (España)

# Respuesta espectral de formas del relieve con imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) en el sector Sureste de la Comunidad de Madrid (España)

García-Meléndez, Eduardo <sup>1</sup> Ferrer-Julià, Montserrat <sup>1</sup> Cruz, Juncal A. <sup>1</sup> García-Rivas, Javier <sup>2</sup> Valenzuela, Pablo <sup>1</sup> Rodríguez, Indira <sup>1</sup> Colmenero-Hidalgo, Elena <sup>1</sup> Pereira, Inés <sup>1</sup>

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

<sup>2</sup> Universidad Complutense de Madrid, España

ORCID: García-Meléndez 0000-0001-8217-8205 Ferrer-Julià 0000-0001-8021-1040 Cruz 0000-0003-2768-9242 García-Rivas 0000-0002-7695-0016 Valenzuela 0000-0002-2424-5884 Rodríguez 0000-0002-2518-952X Colmenero-Hidalgo 0000-0002-5449-2739 Pereira 0000-0002-7328-4791

Correspondencia: [egarm@unileon.es](mailto:egarm@unileon.es) [mferj@unileon.es](mailto:mferj@unileon.es) [jcrum@unileon.es](mailto:jcrum@unileon.es) [javiga31@ucm.es](mailto:javiga31@ucm.es) [pvalm@unileon.es](mailto:pvalm@unileon.es) [iroda@unileon.es](mailto:iroda@unileon.es) [elena.colmenero@unileon.es](mailto:elena.colmenero@unileon.es) [iperr@unileon.es](mailto:iperr@unileon.es)

## RESUMEN

Los datos de alta resolución espectral y espacial registrados por el espectrómetro de imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) proporcionan una información muy útil para la exploración de recursos minerales y rocas industriales mediante la cartografía de la composición mineral de formas del relieve. El área de estudio se localiza en la cuenca sedimentaria del Tajo en unidades formadas por rocas arcillosas, evaporíticas, carbonatadas terciarias y sedimentos detríticos asociados a las unidades morfosedimentarias cuaternarias principalmente de origen fluvial. El estudio se basa en la respuesta espectral de minerales clave como carbonatos, sulfatos y arcillas, con el fin de cartografiar su presencia en las superficies planas y alomadas en la zona situada entre los ríos Tajo, Tajuña y Jarama. Simultáneamente a la campaña de vuelo, se llevó a cabo un estudio de espectrorradiometría de campo para caracterizar la variabilidad mineral de las distintas formas del relieve en el intervalo de longitud de onda visible-infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (VNIR-SWIR, 350-2500 nm) utilizando un espectrorradiómetro ASD FieldSpec-4. Se utilizaron muestras de campo para espectroscopía de reflectancia de laboratorio y difracción de rayos X con el fin de vincular la respuesta espectral con la caracterización mineralógica de las muestras y validar el resultado de la cartografía obtenida. También se emplearon varias técnicas cartográficas: cocientes de bandas para realzar los rasgos de absorción diagnósticos de los minerales de interés y el algoritmo SAM (Spectral Angle Mapper). Los resultados muestran un patrón de mezcla complicado entre minerales de arcilla, carbonatos y sulfatos debido al solapamiento de algunos rasgos de absorción en determinadas longitudes de onda, pero bien determinado espacialmente, siendo las zonas con presencia de yeso las mejor diferenciadas, proporcionando una localización detallada de las abundancias minerales de la superficie.

**Palabras clave:** Teledetección aerotransportada, hiperespectral, Geomorfología, mineral

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 20 febrero 2026

# Respuesta espectral de formas del relieve con imágenes AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) en el sector Sureste de la Comunidad de Madrid (España)


García-Meléndez, Eduardo <sup>(1)</sup>, Ferrer-Julià, Montserrat <sup>(1)</sup>, Cruz, Juncal A. <sup>(1)</sup>, García-Rivas, Javier <sup>(2)</sup>, Valenzuela, Pablo <sup>(1)</sup>, Rodríguez, Indira <sup>(1)</sup>, Colmenero-Hidalgo, Elena <sup>(1)</sup>, Pereira, Inés <sup>(1)</sup>

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


 0000-0001-8217-8205, egarm@unileon.es ;  0000-0001-8021-1040, mferj@unileon.es

 0000-0003-2768-9242, jcrum@unileon.es ;  0000-0002-2424-5884, pvalm@unileon.es

 0000-0002-2518-952X, iroda@unileon.es ;  0000-0002-5449-2739, elena.colmenero@unileon.es

 0000-0002-7328-4791, iperr@unileon.es

<sup>(2)</sup> Universidad Complutense de Madrid, España.

 0000-0002-7695-0016, javiga31@ucm.es

**Resumen:** Los datos de alta resolución espectral y espacial registrados por el espectrómetro de imágenes AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*) proporcionan una información muy útil para la exploración de recursos minerales y rocas industriales mediante la cartografía de la composición mineral de formas del relieve. El área de estudio se localiza en la cuenca sedimentaria del Tajo en unidades formadas por rocas arcillosas, evaporíticas, carbonatadas terciarias y sedimentos detríticos asociados a las unidades morfosedimentarias cuaternarias principalmente de origen fluvial. El estudio se basa en la respuesta espectral de minerales clave como carbonatos, sulfatos y arcillas, con el fin de cartografiar su presencia en las superficies planas y alomadas en la zona situada entre los ríos Tajo, Tajuña y Jarama. Simultáneamente a la campaña de vuelo, se llevó a cabo un estudio de espectrorradiometría de campo para caracterizar la variabilidad mineral de las distintas formas del relieve en el intervalo de longitud de onda visible-infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta (VNIR-SWIR, 350-2500 nm) utilizando un espectrorradiómetro ASD *FieldSpec-4*. Se utilizaron muestras de campo para espectroscopía de reflectancia de laboratorio y difracción de rayos X con el fin de vincular la respuesta espectral con la caracterización mineralógica de las muestras y validar el resultado de la cartografía obtenida. También se emplearon varias técnicas cartográficas: cocientes de bandas para realzar los rasgos de absorción diagnósticos de los minerales de interés y el algoritmo SAM (*Spectral Angle Mapper*). Los resultados muestran un patrón de mezcla complicado entre minerales de arcilla, carbonatos y sulfatos debido al solapamiento de algunos rasgos de absorción en determinadas longitudes de onda, pero bien determinado espacialmente, siendo las zonas con presencia de yeso las mejor diferenciadas, proporcionando una localización detallada de las abundancias minerales de la superficie.

**Palabras clave:** Teledetección aerotransportada, hiperespectral, Geomorfología, minerales

## ***Spectral response of landforms using AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) in the Southeastern sector of the Comunidad de Madrid (Spain)***

**Abstract:** *The high spectral and spatial resolution data recorded by the AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) imaging spectrometer provides very useful information for the exploration of mineral resources and industrial rocks by mapping the mineral composition of landforms. The study area is located in the Tagus sedimentary basin in units formed by clayey, evaporitic and Tertiary carbonate rocks and detrital sediments associated with Quaternary morphosedimentary units mainly of fluvial origin. The study is based on the spectral response of key minerals such as carbonates, sulphates and clays, with the aim of mapping their presence on flat and undulating surfaces in the area between the Tagus, Tajuña and Jarama rivers. Simultaneously with the flight campaign, a field spectroradiometry study was carried out to characterize the mineral variability of the different landforms in the visible-near infrared and shortwave infrared wavelength range (VNIR-SWIR, 350-2500 nm) using an ASD FieldSpec-4 spectroradiometer. Field samples were used for laboratory reflectance spectroscopy and X-ray diffraction in order to link the spectral*

response with the mineralogical characterization of the samples and validate the results of the cartography obtained. Several mapping techniques were used: band ratios to enhance the diagnostic absorption features of the minerals of interest and the SAM (Spectral Angle Mapper) algorithm. The results show a complicated mixing pattern between clay minerals, carbonates, and sulphates due to the overlap of some absorption features at certain wavelengths, nevertheless well distinguished. The areas with gypsum are the best differentiated, providing a detailed location of the mineral abundances on the surface.

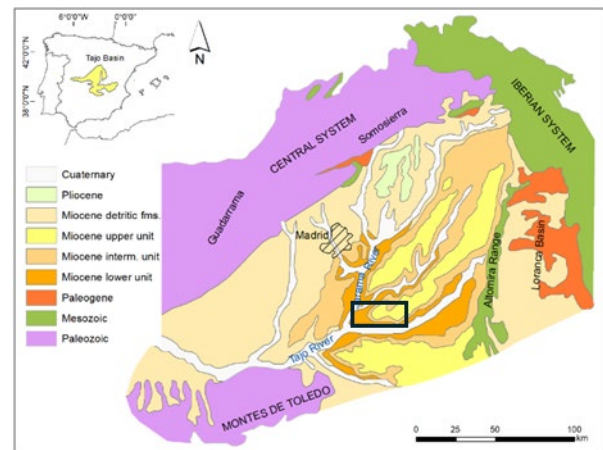
**Keywords:** Airborne Remote Sensing, hyperspectral, Geomorphology, minerals

## 1. INTRODUCCIÓN

La espectrometría de imágenes, según la definición inicial, es la adquisición de imágenes en cientos de bandas espectrales contiguas y registradas, de forma que para cada píxel pueda obtenerse un espectro de radiancia (Goetz et al., 1985). De esta forma, este autor afirma que los espectrómetros de formación de imágenes adquieren imágenes en un gran número (normalmente más de 40) de bandas espectrales estrechas (10-20 nm de ancho) contiguas (por ejemplo, adyacentes y no solapadas) para poder extraer espectros de reflectancia de cada píxel que puedan compararse directamente con espectros similares medidos sobre el terreno o en el laboratorio. Por otra parte, la exploración minera causa multitud de impactos en el medio ambiente, relacionados con la construcción de carreteras y caminos de acceso a las zonas de interés para la prospección y realización de sondeos, etc., en donde el movimiento de maquinaria pesada es común. Así, la Teledetección se ha venido utilizando con éxito en la exploración mineral, principalmente de áreas remotas, pero su uso debería de extenderse en el proceso de exploración mineral de cualquier zona para reducir el impacto medioambiental asociado, seleccionando zonas clave en la fase de exploración para posteriores prospecciones en el contexto de la creciente demanda de materias primas. Además, en los últimos años la Teledetección hiperespectral ha supuesto un avance cuantitativo de gran importancia en la precisión de la determinación composicional de las distintas superficies, especialmente con el desarrollo de sensores aerotransportados desde el AVIRIS de la NASA en 1988 y posteriormente con los sensores DAIS, CASI, HyMAP, AHS, etc. Estos avances se ven proyectados hacia el futuro con la disponibilidad de sensores hiperespectrales satelitales y operativos como DESIS (Alonso et al., 2019), PRISMA (Cogliati et al., 2021), EnMAP (Chabrilat et al., 2020), HUSUI (Matsunaga et al., 2020), EMIT (Thompson et al., 2023) que, aunque con menor resolución espacial, están suponiendo un gran progreso en la cartografía global de fenómenos naturales y de los procesos y recursos geológicos para determinar la composición mineral y las formas del relieve asociadas.

La zona de estudio se encuentra localizada en la cuenca sedimentaria del Tajo (Comunidad de Madrid), entre los ríos Tajo, Tajuña y Jarama (Figura 1). El relleno sedimentario está principalmente formado por depósitos miocenos y cuaternarios. Las facies miocenas se agrupan en tres grandes unidades estratigráficas (García-Romero, 2004): la Unidad Inferior en la que se explotan sales sódicas como la glauberita; la Unidad Intermedia en donde aparecen las facies más arcillosas

de la cuenca denominadas “arcillas verdes” que están principalmente formadas por esmectitas magnésicas (saponitas) de elevada pureza, con frecuentes intercalaciones de “arcillas rosas” de composición estevensítica. El interés económico de esta unidad está en la explotación de bentonitas en las “arcillas verdes” y de sepiolita-paligorskita en las facies arcósicas; por último, la Unidad Superior en la que se encuentran explotaciones de recursos como las canteras de roca ornamental de la “Caliza de Colmenar”.



**Figura 1.** Esquema de localización de la Cuenca del Tajo (subcuenca de Madrid). Modificada de García-Romero (2004). El rectángulo en negro indica la localización de la zona de estudio.

Los objetivos planteados en este trabajo son aplicar técnicas de tratamiento digital de imágenes y procedimientos para el realce de rasgos de absorción diagnósticos, con el fin de detectar composiciones minerales significativas y determinar y cartografiar sus propiedades espectrales mediante imágenes captadas por el sensor aerotransportado AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*), para finalmente asociar la composición mineral con parámetros del relieve como las pendientes.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Adquisición de imágenes

Se realizó una campaña de vuelo a las 10:20 UTC del 1 de octubre de 2018 a 9000 FT (2743 m) con la aeronave CASA212-200-RS para la adquisición de imágenes sobre la zona de estudio por parte del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial), utilizando el sensor AHS (*Airborne Hyperspectral Scanner*). El sensor AHS tiene 80 canales con una resolución radiométrica de 12 bits, que cubren 63 en la parte reflectante del espectro

(VNIR - SWIR), 7 en la región 3177-5251 nm (infrarrojo medio, MIR) y 10 en el rango 8310-12952 nm (infrarrojo térmico, TIR). La adquisición de los datos aerotransportados se realizó cubriendo un total de 8 líneas de barrido. Simultáneamente al vuelo, el equipo del INTA adquirió espectros de reflectancia de campo con el espectrorradiómetro *FieldSpec4 spectroradiometer* (*Analytical Spectral Devices, Inc.* Boulder, CO, USA) en varias zonas homogéneas (10 puntos) para posterior calibración de las imágenes. Este trabajo se centra en la parte del espectro electromagnético correspondiente al infrarrojo de onda corta (SWIR) con 31 bandas comprendidas entre los 1970 y 2468 nm de longitudes de onda, debido a las características espectrales de los rasgos de absorción identificables de los minerales de interés en este estudio.

## 2.2. Espectroscopía de reflectancia de campo y laboratorio y análisis mineralógico

La medida de los espectros de reflectancia en la superficie de sedimentos, suelos y rocas en unidades geomorfológicas previamente seleccionadas (correspondientes a la Mesa de Chinchón, la rampa erosiva de Villaconejos, la zona de escarpe entre ambas, los valles de los ríos Tajo y Tajuña, y escarpe entre estos valles y la rampa de Villaconejos) se realizó también con el espectrorradiómetro *FieldSpec4*. Se adquirieron en el rango de longitudes de onda de 350 a 2500 nm, con 25° de ángulo de campo de visión desde el nadir, a aproximadamente 120 cm de altura desde la superficie, entre las 11 y las 15 horas, en las que el sol presenta la máxima elevación. Las medidas de reflectancia de laboratorio se realizaron en el mismo rango de longitudes de onda, mediante una sonda de contacto con su propia fuente de iluminación. El análisis mineralógico de los materiales de las unidades geomorfológicas se determinó mediante difracción de rayos X (DRX), para la validar los resultados de las imágenes.

## 2.3. Tratamiento de imágenes y SIG

Se calculó el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) para enmascarar la vegetación vigorosa junto con la vegetación seca (umbral de separación por debajo de 0,3). Se realizaron cocientes de bandas espectrales para explorar la presencia de carbonatos, arcillas (aluminicas y magnésicas) y sulfatos. A partir de los cocientes de bandas utilizados (carbonatos-2397/2338 nm, arcillas-2084/23237 nm, sulfatos/yeso-2019/1970 nm) se extrajeron 10 *endmembers* (EMs) correspondientes a las curvas espectrales de píxeles de minerales “puros” y sus mezclas y que se mencionan en el siguiente apartado como resultado, con los cuales se realizó la clasificación de la imagen. Los EMs se seleccionaron tras un análisis minucioso analizando la respuesta espectral de los píxeles de una composición en color formada con los cocientes anteriores. Así, se exploraron las distintas respuestas espectrales reflejadas en los colores correspondientes a los minerales “puros” de los cocientes y a sus mezclas. Las curvas espectrales anteriores se compararon visualmente de forma exhaustiva con los espectros de los minerales de interés de la espectroscopia del USGS (Kokaly et al. 2017) remuestreados (ajustados) a las longitudes de onda del sensor AHS, para facilitar la comparación de las curvas.

Además, en el anterior proceso de selección de los EMs, se ha tenido en cuenta el conocimiento de la composición mineral de las formaciones sedimentarias presentes, tanto a través del trabajo de campo como de la bibliografía. Para derivar la composición mineral de las superficies que constituyen el relieve (formadas por rocas y suelos), se clasificó la imagen con el algoritmo *Spectral Angle Mapper* (SAM) que utiliza métodos de Similitud Espectral (*Spectral Similarity Methods*) para separar materiales en grupos espectrales similares, correspondientes a los EMs seleccionados, con un umbral angular de 0.1 rad. Todas las operaciones de tratamiento de imágenes se han realizado con el programa ENVI 5.3. Finalmente, se ha llevado a cabo análisis geoespacial (con el programa ArcGIS-pro) mediante superposición con el Modelo Digital de Elevación (MDE) de resolución espacial de 25 m del Instituto Geográfico Nacional (IGN) para establecer la relación de la mineralogía con las formas del relieve.

## 3. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Los resultados obtenidos a partir de los cocientes de bandas muestran buenas diferenciaciones en la distinción de las áreas cubiertas de sulfatos y carbonatos, estando la distribución de las arcillas menos clara como consecuencia de aparecer como mezclas con otros minerales (arcillas magnésicas con carbonatos y arcillas aluminicas con filosilicatos), debido a su variedad composicional.

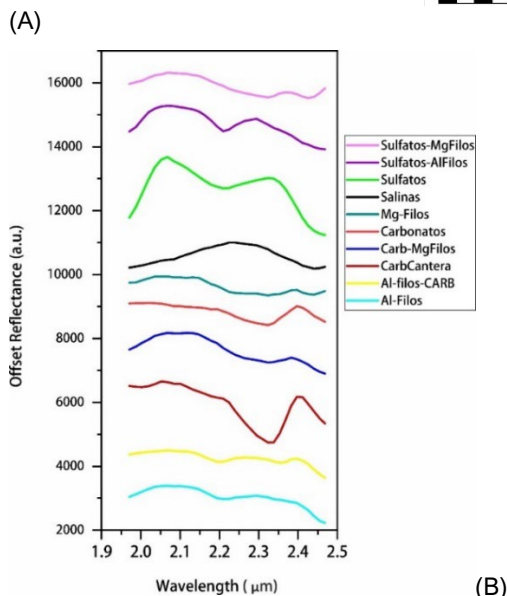
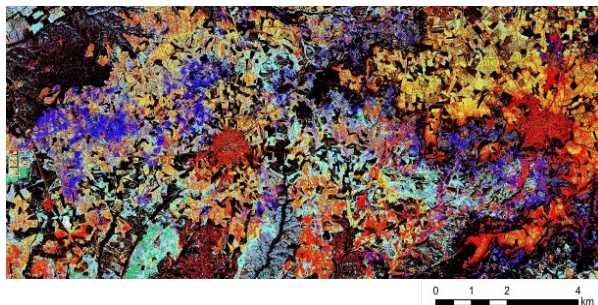
En la Figura 2A se muestra el resultado de la clasificación SAM con las clases correspondientes a los 10 *endmembers* seleccionados que representan cuatro minerales principales y distintas mezclas de los mismos, representados en la Figura 2B.

A partir del análisis de los resultados y tras la superposición de la cartografía obtenida con el MDE, se han encontrado las siguientes relaciones entre unidades geomorfológicas y composición mineral:

- 1- La superficie superior de la mesa de Chinchón (750-770 m), donde la respuesta espectral está dominada por arcillas portadoras de Al (montmorillonita, illita) y mezclas de éstas con carbonatos.
- 2- La rampa erosiva de Villaconejos (600-640 m) con arcillas portadoras de Mg, mezclas de arcillas portadoras de Al y Mg y carbonatos y presencia de yeso.
- 3- El escarpe que articula la superficie superior de la Mesa de Chinchón con la rampa erosiva de Villaconejos, con presencia de carbonatos y arcillas portadoras de Mg, correspondientes a la Unidad Intermedia.
- 4- El dominio de la rampa/glacis que articula el anterior dominio con las unidades fluviales de los ríos Tajuña y Tajo, donde afloran los yesos de la Unidad Inferior Miocena.
- 5- Los valles fluviales de los ríos Tajo y Tajuña donde predominan los Al-filosilicatos.

El análisis mineralógico mediante DRX permite validar los efectos en las curvas espectrales de los píxeles de la imagen correspondientes a las distintas mezclas de minerales, hallando un muy buen ajuste visual entre las curvas espectrales medidas en campo en cada zona de

muestreo, con los espectros de cada muestra y con los espectros de los píxeles correspondientes. Además, se realizó la matriz de confusión a partir de píxeles identificados en campo para cada EM, obteniendo una precisión total del 81,6%.



**Figura 2A.** Resultado de la clasificación SAM. **Figura 2B.** Curvas espectrales de los 10 *endmembers*. Ambas figuras comparten la misma leyenda.

#### 4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1. Las áreas con minerales sulfatados, especialmente yeso, fueron las mejor diferenciadas, proporcionando una ubicación detallada de las abundancias de este grupo de minerales en la superficie. Se ha puesto de manifiesto la dificultad de discriminar las arcillas aluminicas y magnésicas en píxeles mezcla con yesos y carbonatos respectivamente, debido a la similitud de sus rasgos de absorción en el entorno de los 2200 y de 2300 nm.

2. Las dos técnicas de cartografía utilizadas, cocientes de bandas de imágenes para realzar los rasgos de absorción mineral de diagnóstico y el algoritmo SAM-*Spectral Angle Mapper* muestran una buena diferenciación y separación de los minerales arcillosos, evaporíticos y carbonatados por su distribución espacial cartográfica.

3. Se ha podido proporcionar una distribución composicional asociada a cuatro dominios geomorfológicos, comprobándose una estrecha relación pendiente/mineralogía (como queda demostrado

implícitamente en los resultados, por el propio conocimiento geomorfológico de la terminología asociada a las unidades geomorfológicas definidas).

4. La espectrometría de imágenes proporciona un nuevo enfoque para mejorar la información composicional proporcionada por los mapas geomorfológicos y geológicos

5. La cartografía obtenida puede ayudar a reducir los impactos ambientales asociados en la minería mediante la selección de áreas clave en la fase de exploración para posteriores fases de prospección en el contexto de la creciente demanda de materias primas, lo que se demuestra en esta zona de estudio en donde existen explotaciones de sulfatos, carbonatos y arcillas.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el proyecto PID2023-150229OB-100 (HYPERLANDFORM), financiado por MICIU/AEI/10.13039/501100011033 y FEDER, Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

#### 6. REFERENCIAS

Alonso, K., Bachmann, M., Burch, K., Carmona, E., Cerra, D. et al. (2019). Data products, quality and validation of the DLR Earth Sensing Imaging Spectrometer (DESI). *Sensors*, 19, 4471.

Chabrilat, S., Guanter, L., Segl, K., Foerster, S., Fischer, S., Rossner, G., Schickling, A., LaPorta, L., Honold, H.-P., & Storch, T. et al. (2020). The EnMAP German spaceborne imaging spectroscopy mission: Update and highlights of recent preparatory activities. In *IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3278–3281.

Cogliati, S., Sarti, F., Chiarantini, L., Cosi, M., Lorusso, R. et al. (2021). The PRISMA imaging spectroscopy mission: Overview and first performance analysis. *Remote Sensing of Environment*, 262, 112499.

García-Romero, E. (2004). Génesis de arcillas magnésicas en la Cuenca de Madrid: interrogantes planteados. *Bol. Geológico Miner.*, 115, 629-640.

Goetz, A.F.H., Vane, G., Solomon, J.E. & Rock, B.N. (1985). Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing. *Science*, 228, 1147-1453.

Kokaly, R.F., Clark, R.N., Swayze, G.A., Livo, K.E., Hoefen, T.M., Pearson, N.C., Wise, R.A., Benzel, W.M., Lowers, H.A., Driscoll, R.L., & Klein, A.J. (2017). USGS Spectral Library Version 7: U.S. Geological Survey Data Series 1035, 61 p. <https://doi.org/10.3133/ds1035>

Matsunaga, T., Iwasaki, A., Tachikawa, T., Tanii, J., Kashimura, O. et al. (2020). Hyperspectral imager suite (HISUI): its launch and current status. In *IGARSS 2020-2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3272–3273.

Thompson, D., Thompson, D.R., Green, R.O. et al. (2023). On-orbit calibration and performance of the EMIT imaging spectrometer. *ESS Open Archive*, July 20.