

Cartografía de calizas con datos hiperespectrales AISA Eagle II en una zona montañosa con vegetación densa: cómo orientar geológicamente la corrección atmosférica

Buzzi, J.¹, Costa, E.^{2,3}, Riaza, A.^{*1}, Fernández, O.³, García-Sellés, D.², Corbera, J.⁴

¹ Instituto Geológico y Minero de España (IGME), La Calera 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.

² GEOMODELS Institut de Recerca, Departament de Geodinàmica i Geofísica, Universitat de Barcelona. c/Martí i Franquès s/n, 08028-Barcelona, España.

³ Grupo de Disciplinas Geológicas, REPSOL Exploración, c/Méndez Álvaro 44, 28045-Madrid, España.

⁴ Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC), Parc de Montjuïc, 08038-Barcelona, España.

Resumen: Las calizas son rocas críticas en la exploración de petróleo. Desarrollan series estratigráficas a menudo espesas, que afloran con frecuencia en zonas extensas de la superficie terrestre. Estas formaciones litológicas predominantemente carbonatadas presentan diferencias espectrales mínimas entre sí, que permiten su diagnóstico por su respuesta espectral y su cartografía con imágenes. Las bandas de absorción espectral típicas de los carbonatos en 2200 nm y 2300 nm no forman parte del intervalo de longitudes de onda del espectrómetro AISA Eagle II (400 nm-970 nm), con una resolución espectral de 4,8 nm en 128 canales, y 1 m de resolución espacial en el vuelo de estudio. La zona de estudio se encuentra localizada en el Prepirineo español formando un relieve rocoso carbonatado con vegetación densa. El suelo de las distintas formaciones geológicas carbonatadas cartografiadas se distingue espectralmente sólo por su reflectancia global. Los afloramientos rocosos de calizas *in situ* presentan respuestas espectrales con absorciones típicas de óxidos de hierro. La expresión espectral de las formaciones calizas en las imágenes iniciales mostraban defectos sistemáticos. Para conseguir espectros geológicamente diagnosticables con espectrotecas de referencia, se ha ensayado una corrección atmosférica con espectros de campo tomados en una cantera de calizas, y en afloramientos rocosos de formaciones calcáreas seleccionados, con un espectrómetro de campo y laboratorio ASD Fieldspec 3. En las imágenes hiperespectrales así corregidas, se cartografiaban formaciones geológicas litológicamente similares correspondientes a la cuenca fluvial del río Noguera Ribagorzana, a su paso por Alfarràs (Lérida), en la que los sedimentos de la llanura aluvial con limos de materiales comparativamente más finos y materia orgánica, presentan espectros típicos con un trazo rectilíneo en el visible, que no aparecía en las imágenes anteriores a la corrección. El uso de espectros de campo seleccionados con criterios geológicos para la corrección atmosférica de imágenes hiperespectrales, mejora la capacidad de las imágenes para elaborar cartografías de formaciones litológicamente similares usando espectrotecas de referencia.

Palabras clave: hiperespectral, carbonatos, cartografía geológica, corrección atmosférica.

To cite this article: Buzzi, J., Costa, E., Riaza, A., Fernández, O., García-Sellés, D., Corbera, J. 2018. AISA Eagle II hyperspectral data for carbonate geological mapping in a vegetated high relief area: a geologically orientated atmospheric correction. *Revista de Teledetección*, 51, 125-133. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8998>

* Corresponding author: a.riaza@igme.es

AISA Eagle II hyperspectral data for carbonate geological mapping in a vegetated high relief area: a geologically orientated atmospheric correction

Abstract: Carbonated rocks are crucial targets for oil exploration, outcropping often in large areas with minimum spectral differences among geological units. The typical carbonate spectral absorptions in 2200 nm and 2300 nm, are excluded from the wavelength range of AISA Eagle II. AISA Eagle II hyperspectral data are processed in flight lines of 1024 swath pixels in the visible to near-infrared wavelength range (400 to 970 nm). The flight has a spatial resolution of 1 m and records a total of 128 channels with a spectral resolution of 4,8 nm. The area of study is a carbonate rocky mountain densely vegetated, covered by variably dense trees and bushes. Masking vegetation cover and shade effects is prior to any geological analysis using hyperspectral image processing. Carbonate units occur in mountain slopes, with small areas of ridges of rock outcrops and wide fans of loose material. The background soil of different geological units differ spectrally only by overall reflectance. Instead, limestone rocky outcrops display spectral responses with smooth typical iron oxide absorptions that distinguish them apart from loose boulders of limestone. Trying to enhance spectral differences in the visible wavelength range among carbonate geological units, an atmospheric correction using field spectra from geologically selected targets in a limestone quarry was performed. This way, it was possible to map apart lithologically similar detrital units dominated by carbonate in a river plain. The limy river bottom displays spectra with a straight line in the visible wavelength range due to abundant organic matter and small grain size. The spectra of the upper terraces record spectral absorption features related to iron oxide contents similar to the rock outcrops in ridges of mountains. The use of field spectra from geologically selected targets improves the mapping capability of hyperspectral imagery in areas with geological units with a homogeneous spectral response.

Key words: hyperspectral, carbonate, geological mapping, atmospheric correction.

1. Introducción

Las imágenes hiperespectrales se han utilizado ampliamente para la cartografía geológica en zonas semiáridas. Las zonas montañosas, que suelen tener más vegetación y en las que se dan efectos angulares de iluminación, presentan más dificultades para la interpretación geológica de imágenes basada en el comportamiento espectral de rocas y suelos. Las formaciones calizas en el Prepirineo oriental del macizo del Montsec (López-Mir *et al.*, 2016) sirven para este ensayo de cartografía geológica con imágenes hiperespectrales (Figura 1A, B). En trabajos anteriores, se han descrito los indicadores espectrales y geomorfológicos para un seguimiento con tratamiento de imágenes en marismas con datos hiperespectrales Hyperion, que permite cuantificar cambios climáticos combinados con la influencia de las mareas. Estos cambios se leen en las costas salinas que aparecen sobre la superficie de los sedimentos, cuando se retira la lámina de agua por efecto de las mareas, y se seca la vegetación (Riaza *et al.*, 2014, 2017). Para garantizar la homogeneidad espectral de imágenes Hyperion en distintas fechas sin datos espectrales de campo contemporáneos al vuelo disponibles, se utilizó una orientación en la corrección atmosférica con espectros de campo similar a la que se describe más

adelante para este trabajo. En el estudio que sigue, una zona con litologías predominantemente carbonatadas permiten poner a prueba la capacidad de las imágenes hiperespectrales AISA Eagle II para reflejar diferencias litológicas en el intervalo de longitudes de onda del visible (400-970 nm), cuando las absorciones diagnósticas de los carbonatos aparecen en el infrarrojo cercano (2000-2400 nm) (Hunt y Salisbury, 1971a) (Figura 1C). Para ello se utilizan aspectos secundarios en la respuesta espectral de los afloramientos de las formaciones geológicas que permiten su identificación con espectrotecas de referencia tras una corrección atmosférica geológicamente orientada (Buzzi, 2012; Riaza *et al.*, 2012). Los tratamientos que se describen en este trabajo son fruto de una larga etapa estudiando la contaminación de residuos mineros en la cuenca del río Odiel con imágenes Hymap y Hyperion. Allí se describieron tendencias en la evolución de crecimiento mineral diversas en función del sustrato geológico en el que se desarrollan, cartografiables por sus respuestas espectrales (Buzzi, 2011, 2012). El uso de espectrotecas de referencia con algoritmos cartográficos produce resultados variables. Este trabajo es un ensayo de cómo mejorar cartografías introduciendo espectros de campo en las correcciones atmosféricas.

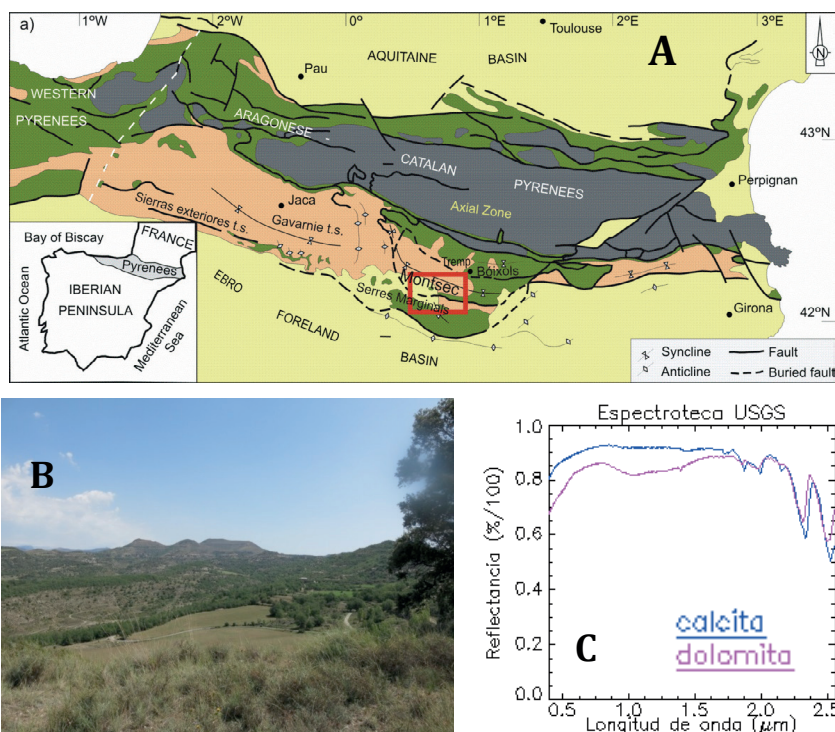


Figura 1. A. Zona de estudio en el Prepirineo español (macizo del Montsec, Lleida) (en López-Mir *et al.*, 2016). B: Vista panorámica de la zona de estudio. C: Respuestas espectrales de carbonatos con absorciones diagnósticas en 2,2 μm y 2,3 μm recogida en la espectroteca de minerales del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (Clark *et al.*, 2007).

2. Objetivos

El trabajo que se describe a continuación pretende cartografiar formaciones rocosas predominantemente carbonatadas con datos hiperespectrales AISA Eagle II basándose en su comportamiento espectral. Distinguir espectralmente carbonatos entre sí es una tarea ardua, y para ello se desarrollan varios procedimientos preparatorios. El más elemental es aislar las zonas rocosas y con suelo, de las cubiertas vegetales. Después, mejorar la expresión espectral de las imágenes para adaptarlas a las espectrotecas de referencia con correcciones atmosféricas basadas en espectros de campo.

3. Datos

Durante los días 5, 11, 16 y 17 de julio de 2014, se adquirieron las imágenes hiperespectrales AISA Eagle II (SPECIM) por parte del Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) en una amplia zona en horario lo más próximo posible a iluminación solar cenital. El AISA Eagle II

adquiere datos hiperespectrales en el rango de 400-970 nm de longitudes de onda con un total de 128 bandas. La línea de vuelo tiene 1024 píxeles de ancho con una resolución espacial de 1 m, y resolución espectral de 4,8 nm por banda.

Los datos tomados por el espectrómetro AISA Eagle II siguieron un preprocesado rutinario de efectos del ruido del sensor, efectos atmosféricos y correcciones geométricas en el Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (Martínez *et al.*, 2006).

Para mejorar la corrección atmosférica enfocada a la interpretación geológica con espectrotecas de referencia (Clark *et al.*, 2007), se tomaron espectros en el campo con un espectrómetro ASD Fieldspec3 (400-2500 nm) (ASD Inc.). Para ello, se seleccionaron afloramientos rocosos identificados en las imágenes AISA Eagle II a cartografiar, y en canteras del entorno cercano en las que se concentran variedad de calizas presentes en la región de estudio.

Para el tratamiento de imágenes AISA Eagle II se utilizó el programa comercial ENVI orientado a imágenes hiperespectrales (EXELIS, 2011). La interpretación geológica de las respuestas espectrales identificadas en las imágenes se basa en espectrotecas de uso público elaboradas por el United States Geological Survey (USGS) (Clark et al., 2007).

4. Métodos

4.1. Pretratamiento digital

Las imágenes AISA Eagle II se corrigen para eliminar ruido electrónico y efectos del sensor. La geometría visual de cada pixel se configura basándose en parámetros específicos de cada sensor, y parámetros de vuelo tales como la posición del avión y altura de vuelo. Un modelo de elevación del terreno (DEM) contribuye a perfilar la precisión del vuelo. Para las correcciones de efectos de dispersión luminosa producidos por las partículas de la atmósfera, se utiliza un modelo basado en MODTRAN (Martínez et al., 2006). Por último, se usan correcciones basadas en la topografía para corregir efectos de iluminación y reproducir finalmente valores de reflectancia.

Para mejorar la corrección atmosférica inicial, se utilizaron espectros de campo tomados con posterioridad al vuelo. Para ello se tomaron medidas en superficies suficientemente grandes y espectralmente representativas en la escena, que permiten validar los valores de reflectancia de la imagen con los espectros de campo, y ajustarlos. Los autores utilizan el método de las Líneas Empíricas (EXELIS, 2011), usando varias superficies seleccionadas con criterios geológicos que se consideran espectralmente representativas en el entorno. El método de las Líneas Empíricas garantiza una respuesta espectral uniforme en todas las imágenes, independientemente de las condiciones atmosféricas en las que se hayan registrado. Para ello es necesario que se utilicen los mismos espectros de campo en el proceso de calibrado, y las mismas áreas de calibrado sobre las imágenes.

4.2. Elaboración de mapas con tratamiento digital de imágenes

La secuencia conocida de tratamiento de imágenes hiperespectrales utilizada para extraer

información geológica (Buzzi, 2012), comienza por calcular Transformadas de Ruido Mínimo (MNF) (EXELIS, 2011). Continúa con el cálculo del Índice de Pureza de Píxeles (PPI) y el visualizador n-dimensional (*N-dimensional Visualizer*), para producir una espectroteca de miembros extremos representativos en la escena. Esta espectroteca sirve de entrada al Cartógrafo de Ángulos Espectrales (*Spectral Angle Mapper*, SAM), que genera un mapa (Figura 2A) cuya leyenda son los miembros extremos de la espectroteca de entrada (Figura 2B).

Esta secuencia de algoritmos se usa repetidamente en superficies de las imágenes aisladas por máscaras sucesivas, para hacer un mapa de uso de suelo inicial, en el que aparecen típicamente las zonas con vegetación y suelos descubiertos (Figura 3A y Figura 3B). La vegetación y las zonas de sombra se manifiestan en las primeras exploraciones digitales sobre las imágenes (Figura 3C). Una vez excluidas las áreas con vegetación más densa y las sombras, se repite la secuencia de tratamiento digital en las áreas de suelos descubiertos (Buzzi, 2012). De esta manera se elaboran mapas de distintas formaciones geológicas reconocibles por la expresión espectral dominante (Figura 2A). Las formaciones geológicas se diagnostican por las respuesta espectral de minerales presentes tanto en las rocas mismas, como en las pátinas que se forman sobre los afloramientos rocosos durante los procesos de meteorización por exposición a la atmósfera, o los materiales sueltos en forma de cantos, arenas o suelos que rodean los afloramientos rocosos.

5. Resultados

5.1. Respuestas espectrales

La zona de estudio en el Prepirineo catalán (Montrebei, Montsec, Lleida), es un medio montañoso con predominio de rocas en las que crecen matorrales y árboles con densidad variable arraigados en las rocas. Los materiales margosos más blandos permiten cultivos, y ofrecen afloramientos de suelos recién arados en los que la cartografía geológica con imágenes se adapta de una manera diversa. En todos los casos, hay que aislar las zonas con vegetación más densa con anterioridad a cualquier exploración geológica (Figura 3A). Las zonas cercanas a árboles o

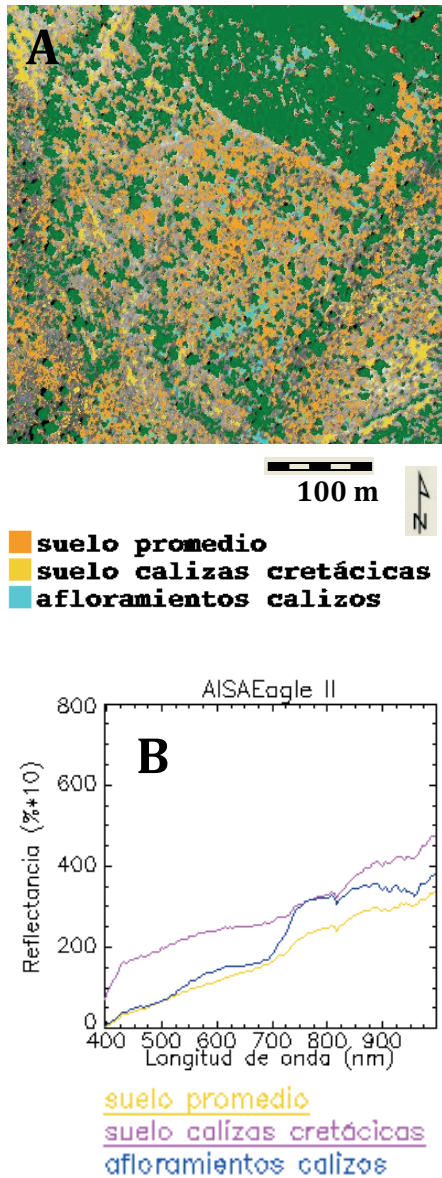


Figura 2. A. Mapa de afloramientos rocosos y suelos extraído de imágenes AISA Eagle II, con un canal en blanco y negro como fondo. Las zonas con vegetación densa están enmascaradas y representadas en verde oscuro en la imagen. B. Respuestas espectrales extraídas de imágenes AISA Eagle II de los miembros extremos cartografiados en A.

matorrales aislados despliegan respuestas espectrales mixtas de vegetación, suelo y sombra, que pueden individualizarse cartográficamente en las imágenes en muchos casos (Figura 3C).

Después de aislar las áreas en que la respuesta espectral dominante es suelo, afloramientos

rocosos, o derrubios de cantos rocosos dispuestos en abanicos en las laderas de las montañas, aparecen durante el tratamiento de imágenes las áreas correspondientes a distintas formaciones calizas (Figura 2A). La respuesta espectral del suelo en ambos casos es muy similar, y se diferencia únicamente en la reflectancia global (Figura 2B). La respuesta espectral de los afloramientos rocosos en las dos formaciones calizas recoge las absorciones típicas de las costras de óxidos de hierro que cubren la superficie externa de las rocas centradas en 0-500 nm, 0-740 nm y 740-900 nm (Hunt *et al.*, 1971b). Sin embargo, los derrubios de cantos y gravas que descienden por las laderas y cubren casi toda la superficie rocosa visible desde un sensor aeroportado, muestran una respuesta espectral uniformemente ascendente en el intervalo de longitudes de onda de 400 a 1000 nm (Figura 2B).

5.2. Corrección atmosférica geológicamente orientada

Las respuestas espectrales iniciales mostradas por el sensor AISA Eagle II en las cartografías litológicas preliminares elaboradas durante este estudio, dibujan espectros con absorciones sistemáticas producidas por el ruido del sensor, que dificultarían el diagnóstico utilizando espectrotecas de referencia. Por ello, se planteó realizar una corrección atmosférica por el método de Líneas Empíricas (EXELIS, 2011) con dos zonas para el calibrado seleccionadas en una cantera de calizas en el área de estudio (Figura 4A). Los objetivos a utilizar en el calibrado, y el método de corrección atmosférica empleado influyen en la respuesta espectral final y el diagnóstico espectral de superficies con espectrotecas de referencia (Riaza *et al.*, 2011; Buzzi, 2012), y el análisis cuantitativo de respuestas espectrales obtenidas desde imágenes con fiabilidad (Buzzi *et al.*, 2011). Una exploración de la variabilidad espectral calculando Transformadas de Ruido Mínimo (MNF) con los 128 canales del AISA Eagle II, exclusivamente en una subescena sobre la superficie de la cantera (Figura 4B), permitió seleccionar los espacios en los que tomar medidas espectrales con un espectrómetro de campo. Un falso color con las transformadas 345 (RGB) expresa la distribución espacial de superficies con respuestas espectrales diversas (Figura 4B) en la cantera. Las zonas planas de tránsito entre

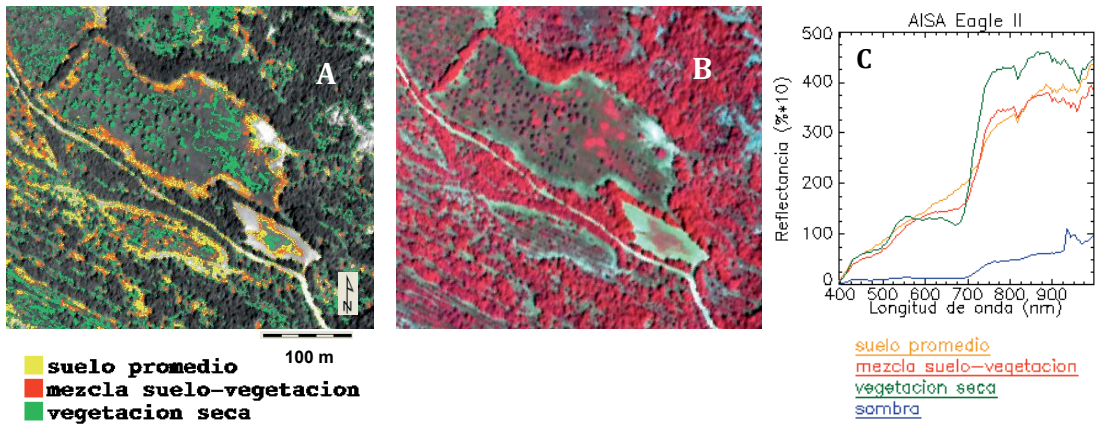


Figura 3. A. Mapa de suelo y mezclas suelo-vegetación realizado con el sensor AISA Eagle II con un canal en blanco y negro como fondo. B. Composición en falso color con los canales 79 (759,055 nm), 63 (682,095 nm), 34 (545,090 nm) (RGB) del AISA Eagle II. C. Respuestas espectrales de unidades cartografiadas en el mapa de suelo y mezclas de suelo-vegetación en A, y respuesta espectral de sombras no recogidas en el mapa, expresadas por el sensor AISA Eagle II.

montones de fragmentos de rocas apiladas en la cantera, de color claro y grano fino, fueron el objetivo de tono claro (Figura 4A, color añil; Figura 4E), y una explanada de gravas de calizas oscuras proporcionaron espectros para el

objetivo de tono oscuro (Figura 4A, color rojo; Figura 4F). Ambos espectros (Figura 4D) tienen respuestas espectrales similares, y se distinguen sólo por la reflectancia global. Ambos insinúan amplias absorciones por la presencia de óxidos

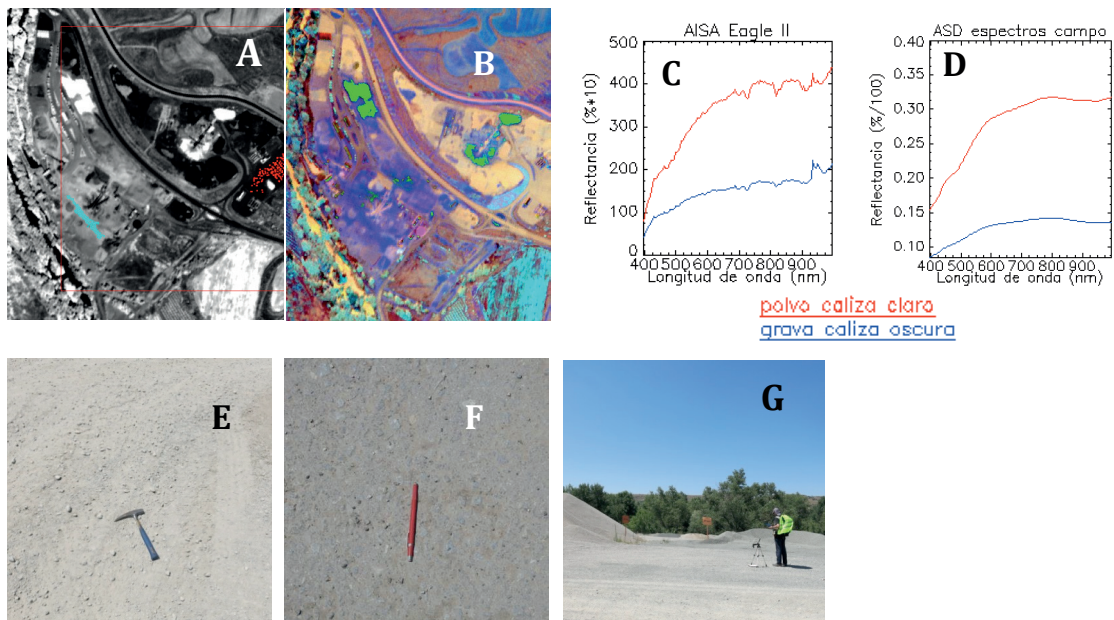


Figura 4. A. Zonas de muestreo en cantera para espectros de campo (color añil, polvo caliza claro; color rojo, grava caliza oscura) sobre un la imagen de un canal en blanco y negro. B. Composición en falso color con las Transformadas de Ruido Mínimo 345 (RGB) calculadas sobre los 128 canales del AISA Eagle II. C. Respuestas espectrales extraídas de imágenes AISA Eagle II en las zonas de muestreo para espectros de campo señaladas en A antes de la corrección atmosférica. D. Respuestas espectrales de campo tomadas con un espectrómetro en las zonas de muestreo señaladas en A. E. Polvo de caliza claro. F. Grava de caliza oscura. G. Operador tomando espectros con el espectrómetro ASD Fieldspec 3 en cantera.

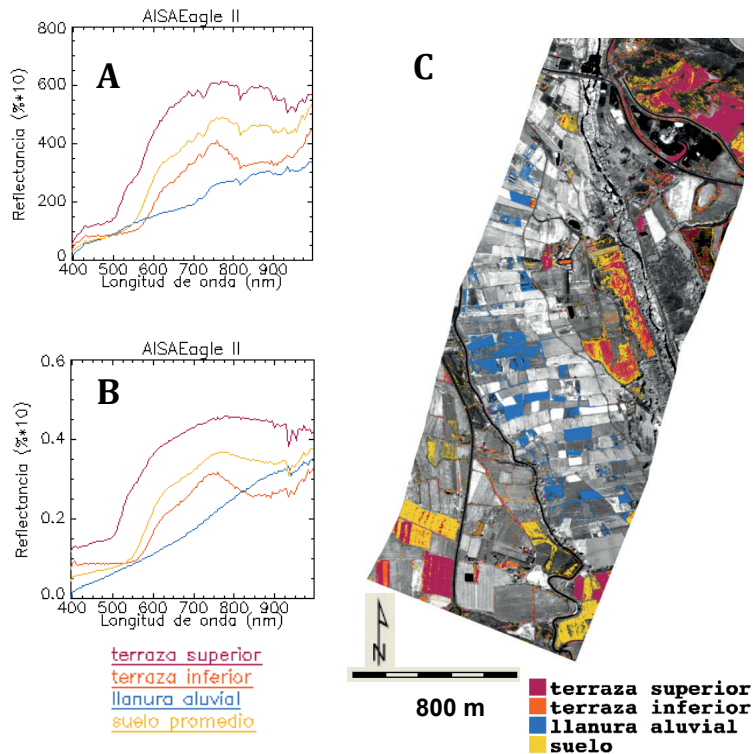


Figura 5. A. Espectros correspondientes a las formaciones geológicas cartografiadas antes de la corrección atmosférica. B. Espectros correspondientes a las formaciones geológicas cartografiadas después de la corrección atmosférica. C. Mapa de formaciones geológicas cartografiadas en una llanura aluvial de sedimentos detríticos predominantemente carbonatados extraído de imágenes AISA Eagle II.

de hierro centradas en 0-500 nm, 0-740 nm y 740-900 nm. La escena AISA Eagle II corregida atmosféricamente por el método de las Líneas Empíricas con estos dos espectros de campo, se utilizó para cartografiar una llanura aluvial intensamente cultivada con frutales (Figura 5).

5.3. Cartografía geológica con imágenes corregidas atmosféricamente usando espectros de campo con criterios geológicos

En las laderas del valle del río Ribera- Ribagorzana (Alfarrás, Lérida) (Figura 5) se desarrollan numerosas terrazas fluviales a distintas alturas, con litologías uniformes de cantos, arenas y gravas, sólo distinguibles por las formas del relieve según su altura relativa. En las imágenes corregidas con espectros de campo, los materiales con mayor abundancia de limos del fondo de la llanura aluvial se distinguen espectralmente por una respuesta

espectral que traza una línea recta ascendente en el intervalo 400-1000 nm (Figura 5B). Estas respuestas espectrales sin rasgos de absorción en el intervalo de longitudes de onda del visible son típicas de sedimentos detríticos con abundancia de materia orgánica (Hunt y Salisbury, 1976), que se concentran en el fondo de la llanura aluvial (Figura 5C). También se cartografian dos series de terrazas diferentes a distintas alturas en las laderas de la llanura, que muestran rasgos espectrales típicos de óxidos de hierro, más pronunciados en la terraza inferior.

Las respuestas espectrales de las imágenes corregidas con espectros de campo seleccionados con criterios geológicos descritas (Figura 5B), presentan respuestas espectrales ajustadas a las descritas en las espectrotecas de rocas conocidas, tanto publicadas en la literatura (Hunt y Salisbury, 1976), como incluidas en las espectrotecas de referencia de uso público (Clark *et al.*, 2007).

6. Conclusiones

Los rasgos espectrales diagnósticos de los carbonatos se presentan en intervalos de longitudes de onda del NIR (2000-2500 nm), un intervalo de longitudes de onda que no recogen las imágenes hiperespectrales AISA Eagle II (400-970 nm). Sin embargo, se han realizado cartografías en las que se detectan rasgos espectrales relacionados indirectamente con el contenido en carbonatos en formaciones calizas.

Las imágenes AISA Eagle II despliegan zonas de respuesta espectral mixta vegetación-sombrosuelo y sombras, en una zona con vegetación densa con árboles y matorrales aislados, a menudo próximos entre sí. Para hacer cartografías geológicas con tratamiento digital de imágenes, hay que aislar con máscaras digitales las zonas con suelos y afloramientos rocosos de las zonas con vegetación. Este paso previo es imprescindible en el proceso de cartografía geológica con tratamiento digital de imágenes.

La cartografía, tanto de formaciones calizas rocosas, como de sedimentos detríticos en llanuras aluviales litológicamente homogéneos, y predominantemente carbonatados, mejora al corregir atmosféricamente las imágenes con espectros de campo seleccionados geológicamente. De este modo pueden realizarse diagnósticos espectrales con espectrotecas de referencia.

Agradecimientos

El sensor AISA Eagle II fue cedido en préstamo por SPECIM al Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC) para su prueba en vuelo y pretratamiento digital. Los estudios de interpretación geológica se han realizado en un convenio entre la Universidad de Barcelona y REPSOL Exploración para formación postdoctoral. Las bases para comenzar este trabajo surgieron durante la tesis doctoral de Buzzi (BES-2008-003648).

Referencias

ASD. 2006. FieldSpecR 3 User Manual, ASD Document 600540 Rev. F. Analytical Spectral Devices, Inc. Disponible en: <http://www.asdi.com> [Último acceso: junio de 2018].

Buzzi, J. 2012. *Imaging spectroscopy to evaluate the contamination from sulphide mine waste in the Iberian Pyrite Belt using hyperspectral sensors (Huelva, Spain)*, Tesis Doctoral Universidad de León, 212 p.

Buzzi, J., Riaza, A., García-Meléndez, Carrère, V., Bachmann, M. 2011. Aplicación de modelos Gaussianos modificados a datos hiperespectrales de una zona contaminada por drenaje ácido. Caso del río Odiel (Huelva, España). *XIV Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, Mieres, 21-23 Septiembre 2011, 285-288.

Clark, R.N., Swayze, G.E., Wise, R., Livo, E., Hoefen, T., Kokaly, R., Sutley, S.J. 2007. USGS Digital Spectral Library splib06a. Digital Data Series 231, USGS: Denver, Co, USA, 2007.

EXELIS, 2011. ENVI User's Guide. Exelis Visual Information Solutions: Boulder, Co, USA.

Hunt, G.R., Salisbury, J.W. 1971a. Visible and Near-infrared Spectra of Minerals and Rocks: II. Carbonates. *Modern Geology*, 2, 23-30.

Hunt, G.R., Salisbury, J.W., Lenhof, J. 1971b. Visible and Near-infrared Spectra of Minerals and Rocks: III Oxides and Hydroxides. *Modern Geology*, 2, 191-205.

Hunt, G.R., Salisbury, J.W., 1976. Visible and Near-infrared Spectra of Minerals and Rocks: XI. Sedimentary Rocks. *Modern Geology*, 5, 211-217.

López-Mir, B., Antón Muñoz, J., García-Senz, J. 2016, 3D geometric reconstruction of Upper Cretaceous passive diapirs and salt withdrawal basins in the Cotiella Basin (southern Pyrenees), *Journal of the Geological Society*, 173, 616-627. <https://doi.org/10.1144/jgs2016-002>

Martínez, L., Tardà, A., Palà, V., Arbiol, R. 2006. Atmospheric correction algorithm applied to CASI multi-height hyperspectral imagery. *Proceedings Second International Symposium Recent Advances in Quantitative Remote Sensing*, 25-29 Septiembre 2006.

Riaza, A. Buzzi, J., García-Meléndez, E., del Moral, B., Carrère, V., Richter, R. 2017. Monitoring salt crusts on an AMD contaminated coastal wetland using hyperspectral Hyperion data (Estuary of the River Odiel, SW Spain). *International Journal of Remote Sensing*, 38(12), 3735-3762. <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1302621>

- Riaza, A., García-Meléndez, E., Carrère, V., Müller, A. 2014. Cartografía de sales marinas y fluviales en estuarios receptores de aguas ácidas con imágenes hiperespectrales Hyperion (Marismas del río Odiel, Huelva). *Revista de Teledetección*, 41, 1-7. <https://doi.org/10.4995/raet.2014.2255>
- Riaza, A., Buzzi, J., García-Meléndez, E., Carrère, V., Müller, A. 2011. Monitoring the extent of contamination from acid mine drainage in the Iberian Pyrite Belt (SW Spain) using hyperspectral imagery. *Remote Sensing*, 3, 2166-2186. <https://doi.org/10.3390/rs3102166>
- Riaza, A., Buzzi, J., García-Meléndez, E., Vázquez, I., Bellido, E., Carrère, V., Müller, A. 2012. Pyrite mine waste and water mapping using Hymap and Hyperion hyperspectral data. *Environmental Earth Sciences*, 66-7, 1957-1971. <https://doi.org/10.1007/s12665-011-1422-0>