

Cartografía de sales marinas y fluviales en estuarios receptores de aguas ácidas con imágenes hiperespectrales Hyperion (Marismas del río Odiel, Huelva)

Riaza, A.¹, García-Meléndez, E.², Carrère, V.³, Mueller, A.⁴

¹ *Departamento Recursos Minerales, Instituto Geológico y Minero de España, La Calera, 1, 28760 Tres Cantos (Madrid), España.*

² *Universidad de León, Facultad de Ciencias Ambientales, León, España.*

³ *Université de Nantes, Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, Nantes, Francia.*

⁴ *German Remote Sensing Data Center, German Space Agency (DLR), Wessling, Alemania.*

Resumen: Se realiza un seguimiento temporal de eflorescencias salinas en las Marismas del río Odiel, que ocupan el estuario en su desembocadura, con imágenes hiperespectrales Hyperion de archivo. A partir de varias cartografías elaboradas con tratamiento de imágenes, se han realizado estimaciones de variabilidad climática basadas en series minerales conocidas, utilizando respuestas espectrales típicas en vegetación y aguas someras. En este trabajo, se esbozan indicadores espectrales y geomorfológicos susceptibles de un seguimiento repetible con tratamiento de imágenes en las marismas, que permita cuantificar cambios climáticos combinados con la influencia de las mareas, enfocados a estudiar la evolución de las costras salinas que aparecen sobre la superficie de los sedimentos, al retirarse la vegetación y la lámina de agua. En este marco, se presentan cartografías elaboradas a partir de imágenes Hyperion en varias fechas. Se describe el tratamiento preinterpretativo de las imágenes Hyperion, y la secuencia de algoritmos que permiten elaborar las cartografías de sustancias salinas en zonas intermareales. El análisis de una secuencia más amplia de imágenes con condiciones climatológicas distintas, y más amplitud de oscilación mareal, enriquecerá la estimación de parámetros espectrales para el seguimiento rutinario de costras salinas con datos hiperespectrales.

Palabras clave: espectroscopía de imágenes, geología, estuarios, seguimiento ambiental, Hyperion, drenaje ácido de mina.

Mapping marine and fluvial salt crusts in estuaries collecting acid water using hyperspectral Hyperion imagery (Marshes of the river Odiel, Huelva)

Abstract: Temporal monitoring of salt efflorescence on the marshes at the mouth of the river Odiel (Huelva) is made using hyperspectral archive Hyperion data. Climate variability estimations are made based on well-known spectral features related to vegetation and shallow water, using archive spectral libraries. The observations point to spectral and geomorphological indicators which can be monitored through image processing supported by field and laboratory spectral data, on a repeatable basis. Mapping a larger sequence of images under different climate regime and wider tidal range, would improve the estimation of spectral features to ensure a routine monitoring of salt crusts with hyperspectral data.

Key words: imaging spectroscopy, geology, estuaries, environmental monitoring, Hyperion, acid mine drainage.

* Autor para la correspondencia: a.riaza@igme.es

1. Introducción

Los estuarios son ambientes en los que la observación directa es difícil, y las marismas del Odiel tienen igualmente accesos restringidos en amplias zonas (Figura 1). La inundación rápida de amplias zonas con el ascenso de las mareas dificulta el trabajo científico sobre el terreno. Por ello, la teledetección ofrece la posibilidad de realizar mapas precisos con datos hiperespectrales de alta resolución espectral, y aseguran los instrumentos para un seguimiento temporal constante. Hay una literatura abundante de estudios con datos hiperespectrales en marismas costeras (Huckle *et al.*, 2004; Belluco *et al.*, 2006), pero ninguno de ellos se dirige específicamente a la cartografía de sales marinas y fluviales.

2. Datos

2.1. Imágenes Hyperion

Se han tratado digitalmente seis imágenes Hyperion sobre las marismas del Odiel (220 bandas en los

intervalos de longitudes de onda 350-2500 nm, con resolución espacial de 30 m), adquiridas en los veranos de 2005, 2006, 2007 y la primavera de 2009.

2.2. Espectros de campo

Para las correcciones atmosféricas de las imágenes Hyperion se han utilizado espectros tomados en campo con un espectrómetro ASD Fieldspec Pro. Este instrumento mide la reflectancia sobre la superficie del suelo en el intervalo 350-2500 nm de longitudes de onda, con una resolución espectral de 1,4 nm en el intervalo de longitudes de onda del visible, y de 2 nm en el infrarrojo cercano.

2.3. Otros datos

La interpretación de cambios ambientales en marismas costeras requiere datos climatológicos, que proceden del archivo de la Agencia Espacial de Meteorología (AEMET), y datos de marea de la Red de Mareógrafos de Puertos del Estado (REDMAR).

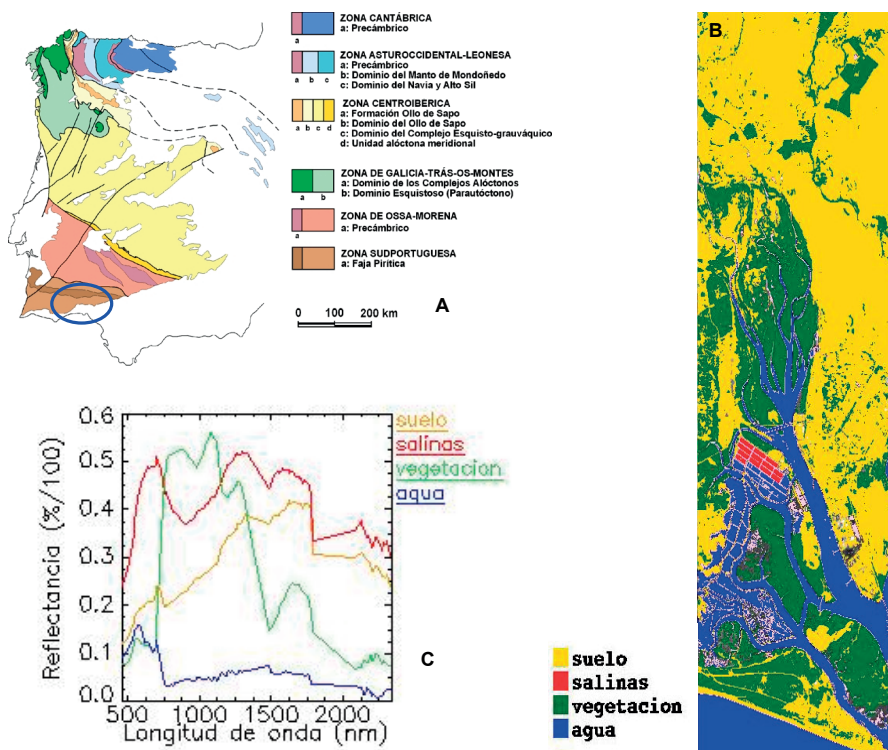


Figura 1. A. Mapa de situación de las Marismas del Odiel (círculo azul) en la Península Ibérica. B. Mapa de uso de suelo extraído de imágenes Hyperion. C: Espectros de las superficies del mapa de uso de suelo extraído de imágenes Hyperion.

3. Método

3.1. Pretratamiento digital

Las imágenes Hyperion se corrigen para eliminar ruido electrónico y efectos del sensor, reduciendo, por métodos preestablecidos, el número de bandas de 240 a 167 (Jupp *et al.* 2001, 2002; Richter y Schlöpfer, 2002) (Figura 2A y Figura 2B). No todos los canales están calibrados, y se producen

solapamientos entre los detectores, de modo que sólo hay 196 canales únicos. Muchos de ellos funcionan defectuosamente de manera sistemática, de modo que sólo quedan 167 canales útiles.

Las 167 bandas se corrigen atmosféricamente por el método de las Líneas Empíricas (RSI, 2000), usando varios espectros de campo en las mismas superficies representativas (Figura 2C y Figura 2D) en todas las escenas cartografiadas. El método de las Líneas Empíricas garantiza una respuesta

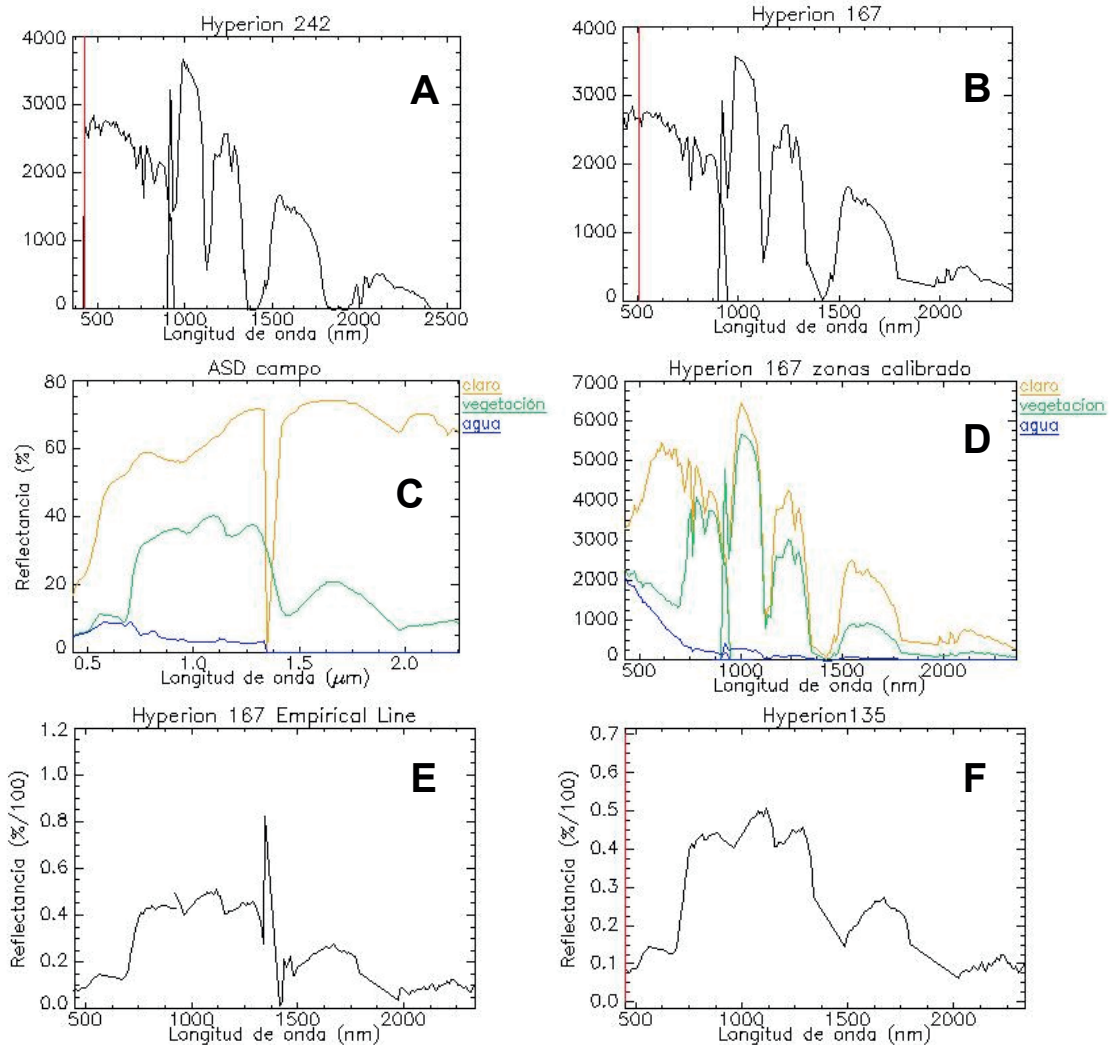


Figura 2. A. Espectro de imágenes Hyperion con 242 canales sin corregir en una superficie con vegetación densa. La misma superficie se usa en los gráficos que siguen. B. Espectro de imágenes Hyperion con 167 canales. C. Espectroscopia de miembros extremos tomados con un espectrómetro de campo en espacios representativos para la corrección de efectos atmosféricos. D. Espectros de imágenes Hyperion en áreas representativas para la corrección de efectos atmosféricos. E. Espectro de imágenes Hyperion con 167 canales en una zona con vegetación vigorosa después de la corrección de efectos atmosféricos por el método de Líneas Empíricas con la espectroscopia en C. F. Espectro de imágenes Hyperion con 135 canales en una zona después de eliminar canales ruidosos en las imágenes Hyperion con 167 canales en E, en una zona con vegetación vigorosa después de la corrección de efectos atmosféricos por el método de Líneas Empíricas.

espectral uniforme en todas las imágenes, independientemente de las condiciones atmosféricas en las que se hayan registrado, siempre que se utilicen los mismos espectros en el proceso de calibrado, y las mismas áreas de calibrado sobre las imágenes.

Después de la corrección atmosférica, aún hay bandas muy ruidosas que eliminar, dejando un número entre 120 y 150 bandas para la extracción de información geológica (Figura 2E y Figura 2F) (Riaza et al., 2012b).

3.2. Elaboración de mapas con tratamiento digital de imágenes

La secuencia de tratamiento de imágenes hiperespectrales utilizada para extraer información geológica (Riaza y Mueller, 2010; Riaza et al., 2012a; Buzzi, 2012), comienza por calcular Transformadas de Ruido Mínimo (RSI, 2000). Continúa con el cálculo del Índice de Pureza de Píxeles, y el visualizador n-dimensional, para producir una espectroteca de miembros extremos representativos en la escena. Esta espectroteca sirve de entrada al Cartógrafo de Ángulos Espectrales, que genera un mapa cuya leyenda son los miembros extremos de la espectroteca de entrada.

Esta secuencia de algoritmos se usa repetidamente para hacer un mapa de uso de suelo inicial, en el que aparecen típicamente las zonas con vegetación, los suelos desnudos, las áreas inundadas y las salinas del Parque Natural de las Marismas del Odiel, que opera con métodos tradicionales de embalsamiento de agua marina en recintos con esclusas y desecación por mera evaporación del agua en condiciones atmosféricas ambientales (Figura 3). De nuevo se aplica la secuencia de algoritmos en subescenas delimitadas por máscaras para zonas con vegetación, suelos desnudos, y agua. A partir de las máscaras iniciales para cada una de las tres cubiertas principales (suelo, vegetación y agua), se suceden varias máscaras intermedias durante el proceso de tratamiento, que contribuyen a delimitar progresivamente el área de interés a cartografiar como una de las unidades significativas en la evolución de las marismas. Los mapas resultantes resumen cambios relacionados con clima u oscilaciones mareales, que se manifiestan de manera especial en la Marisma del Burro (Figura 4, Figura 5 y Figura 6) más alejada de la costa en el conjunto de las marismas.

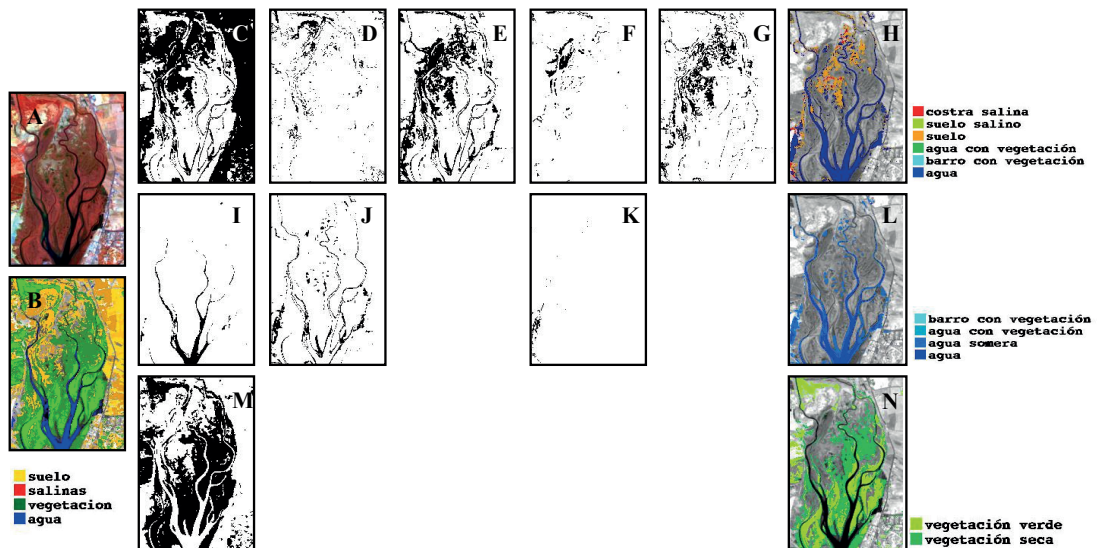


Figura 3. Secuencia de subescenas producidas con tratamiento de imágenes (de izquierda a derecha). A. composición en falso color con los canales Hymap 42 (1,0436 μm), 24 (0,7016 μm) y 5 (0,5082 μm). B. Mapa de uso de suelo con estimaciones de superficies cubiertas por vegetación, agua y suelo desnudo. C. Máscara para el suelo desnudo. D. Máscara para turba seca. E. Máscara para áreas ampliamente inundadas. F. Máscara para turba húmeda. G. Máscara para marismas interiores inundables por aguas someras. H. Mapa de costras salinas y productos derivados. I. Máscara para el agua. J. Máscara para agua somera. K. Máscara para agua próxima a zonas salinas. L. Mapa de agua. M. Máscara para vegetación. N. Mapa de vegetación.

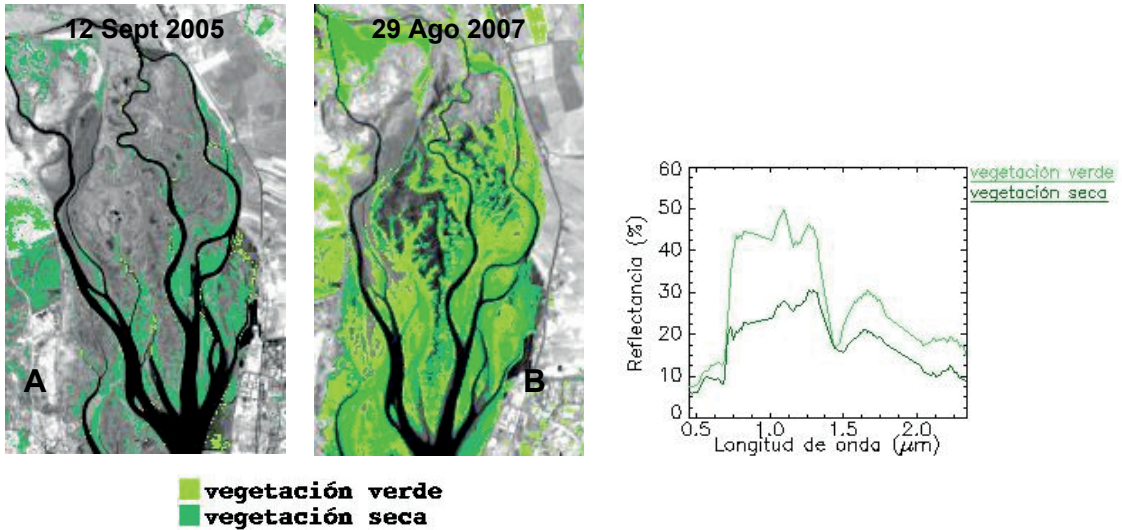


Figura 4. Mapas de vegetación extraídos de imágenes Hyperion en la Marisma del Burro. **A.** El 12 de Septiembre de 2005, verano extremadamente caluroso y muy seco. **B.** El 29 de Agosto de 2007, verano cálido y neutralmente húmedo (AEMET). **C.** Espectros extraídos de imágenes Hyperion usados como miembros extremos para elaborar los mapas anteriores.

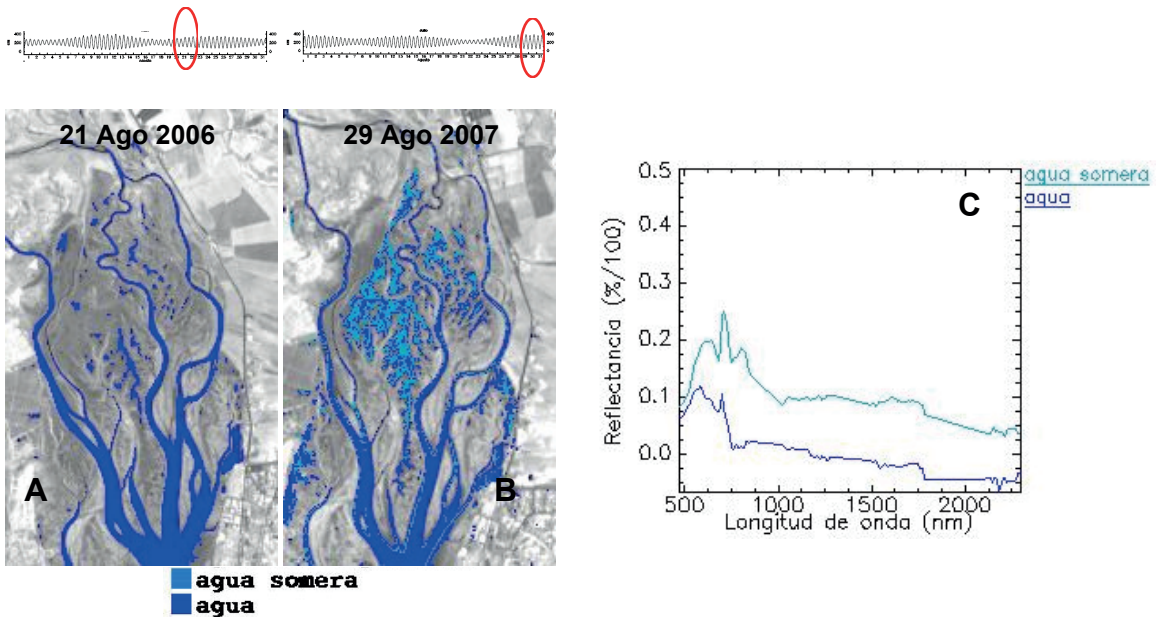


Figura 5. Mapas de agua extraídos de imágenes Hyperion. Arriba, datos horarios de altura de mareas del mes correspondiente a la escena del mapa, en el mareógrafo de Huelva (REDMAR). Círculo rojo sobre la fecha del mes. **A.** El 21 de Agosto de 2006, con altura de marea de 249 cm en periodo de intervalo de mareas intermedio. **B.** El 29 de Agosto de 2007, con altura de marea de 150 cm en periodo de mareas vivas. **C.** Espectros extraídos de imágenes Hyperion usados como miembros extremos para elaborar los mapas anteriores.

La secuencia de tratamiento de imágenes aplicada a la máscara de suelos desnudos produce un mapa de suelos con costras salinas más o menos desarrolladas (Figura 3H). Además, se delimitan las zonas de transición hacia la lámina de agua, reflejando zonas embarradas en las que se recoge espectralmente

la presencia de vegetación, y de agua somera, que también muestra rasgos espectrales de la presencia de vegetación.

Los mapas producidos por tratamiento de imágenes en la zona enmascarada como agua (Figura 3L), reproducen fielmente las zonas de agua profunda en

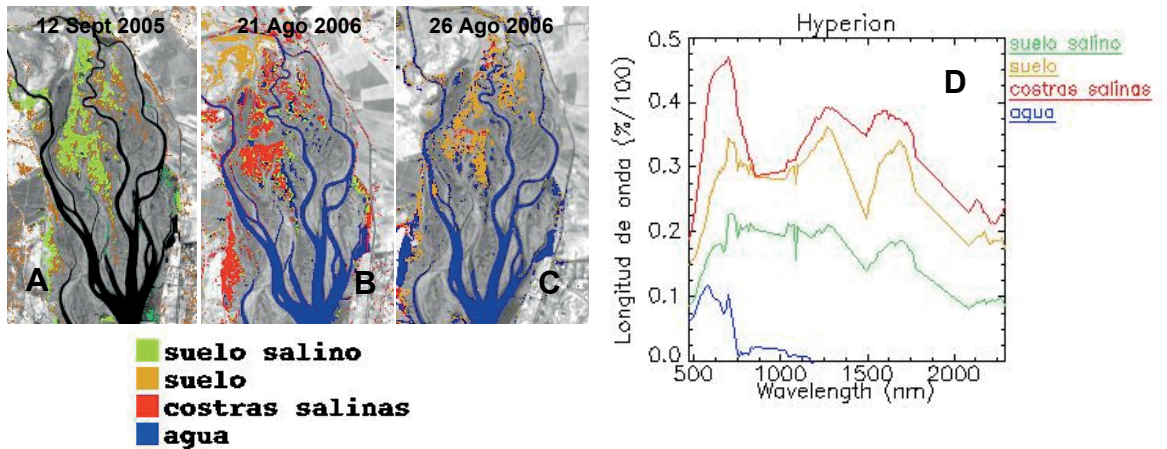


Figura 6. Mapas de costras salinas extraídos de imágenes Hyperion. **A.** El 12 de Septiembre de 2006, en un verano extremadamente caluroso y muy seco (AEMET). **B.** El 21 de Agosto de 2006, verano cálido y neutralmente húmedo. **C.** El 26 de Agosto de 2006. **D.** Espectros extraídos de imágenes Hyperion usados como miembros extremos para elaborar los mapas anteriores.

el centro de los canales, con bordes de agua somera. En las láminas de agua más superficiales, tanto a orillas de los canales, como en las charcas interiores de las marismas, se aprecia la influencia de la vegetación en la respuesta espectral. Las zonas de barro también muestran esta presencia de vegetación.

Los mapas realizados en las zonas cubiertas de vegetación (Figura 3N) resumen dos niveles de vigor en los matorrales halófilos, relacionados con la mayor humedad de agua en el suelo debida a la cercanía a los canales.

4. Resultados

La variabilidad climática se refleja habitualmente en la extensión de las superficies vegetadas, y en el vigor de las plantas. Los mapas de vegetación elaborados (Figura 4) revelan un estado de sequedad máxima en septiembre de 2005, y máxima extensión y vigor en agosto de 2007, de acuerdo con los datos climatológicos (AEMET).

La influencia de las mareas se manifiesta en las imágenes estudiadas de manera más extrema a finales de agosto de 2007, con amplias zonas en las que aparecen firmas espectrales típicas de agua con presencia de vegetación (Figura 5), en época de mareas vivas. El 21 de agosto de 2006, con la marea más alta de las escenas estudiadas, aparecen zonas encharcadas con respuesta espectral de agua relativamente profunda en zonas deprimidas del interior de la marisma del Burro (Figura 5).

El desarrollo de costras salinas durante los veranos de 2005 y 2006 permite intuir la evolución mineralógica de las costras según su respuesta espectral (Figura 6). Las condiciones de aridez máxima en septiembre de 2005, muestran amplias áreas cubiertas por un “suelo salino”, rodeadas de orlas con una respuesta espectral idéntica en absorciones típicas, pero con una reflectancia espectral reducida. Este “suelo salino” ocupa la misma extensión el 26 de agosto de 2006 (Figura 6). El 21 de agosto de 2006, dos semanas antes, esas mismas zonas están ocupadas por mezclas de sales de origen marino (Figura 6).

Es probable una evolución en las costras desarrolladas a partir de zonas encharcadas desde “sales marinas”, a “suelo” y “suelo salino”, en condiciones de aridez progresiva. Estas observaciones se limitan a imágenes de archivo, y a un número limitado de escenas, entre las que no se encuentran condiciones de mareas bajas y altas en épocas de mareas vivas.

5. Conclusiones

Las imágenes Hyperion permiten cartografiar eficazmente las costras salinas que se desarrollan en marismas en las desembocaduras de ríos contaminados.

Las imágenes de archivo del sensor Hyperion cartografiadas sugieren una secuencia progresiva en la evolución de las costras salinas, con respuestas

espectrales que indican la edafización progresiva de las costas salinas en situación de aridez persistente.

Esta evolución está respaldada por observaciones cartográficas sobre el vigor de la vegetación de las marismas basado en su comportamiento espectral, y el seguimiento de la influencia de las mareas en las superficies cubiertas por la lámina de agua.

Las observaciones anteriores se limitan al análisis de seis escenas Hyperion de archivo que se han corregido atmosféricamente con un método uniforme. El análisis de una secuencia de imágenes más amplia en condiciones más variadas, tanto climáticas como de amplitud de oscilación de mareas, enriquecerá sin duda las observaciones. También, comparando métodos distintos de correcciones atmosféricas, se ampliará la interpretación de la respuesta espectral de las sales fluviales o marinas en las marismas, y, por lo tanto, su cartografía. De este modo, se mejorarán los parámetros para un seguimiento rutinario con imágenes hiperespectrales, de la presencia de estas sustancias en marismas costeras.

Agradecimientos

Los datos Hyperion y la metodología de trabajo para la cartografía con datos hiperespectrales se desarrollaron durante la subvención CGL2007-60004/CLI. Las bases para comenzar este trabajo surgieron durante la tesis doctoral de Jorge Buzzi Marcos (BES-2008-003648).

Referencias

AEMET (Agencia Estatal de Meteorología, Spain), *Resumen Anual Climatológico de los años 2005, 2006, 2007 y 2009*. Último acceso: 19 de Marzo de 2014, <http://www.aemet.es>

Belluco, E., Camuffo, M., Ferrari, S., Modenese, L., Silvestri, S., Marani, A., Marani, M., 2006. Mapping salt-marsh vegetation by multispectral and hyperspectral remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 105(1), 54-67. doi: 10.1016/j.rse.2006.06.006.

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.

Hunter, E.L., Power, C.H. 2002. An assessment of two classification methods for mapping Thames Estuary intertidal habitats using CASI data. *International Journal of Remote Sensing*, 23(15), 2989-3008. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160110075596>

Jupp, D.L.B., 2001. Discussion around Hyperion Data. *CSIRO Office of Space Science Applications*, Earth Observation Centre: 1-9.

Jupp, D.L.B., Datt, B., Lovell, J., Campbell, S., King, E. 2002. Discussions around Hyperion Data: Background Notes for the Hyperion Data Users Workshop. *CSIRO Earth Observation Centre* 2002.

Riaza, A., Mueller, A. 2010. Hyperspectral Remote Sensing monitoring of Pyrite Mine Wastes: A record of climate variability (Pyrite Belt, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 61(3), 575-594. doi:10.1007/s12665-009-0368-y

Riaza, A., Buzzi, J., García-Meléndez, E., Carrère, V., Sarmiento, A., Mueller, A. 2012a. River acid mine drainage: sediment and water mapping through hyperspectral Hymap data, *International Journal of Remote Sensing*, 33(19), 6163-6185. doi:10.1080/01431161.2012.675454.

Riaza, A., Buzzi, J., García-Meléndez, E., Vazquez, I., Bellido, E., Carrère, V., Mueller, A. 2012b. Pyrite mine waste and water mapping using Hymap and Hyperion hyperspectral data, *Environmental Earth Sciences*, 66(7), 1957-1971. doi:10.1007/s12665-011-1422-0

Richter, R., Schläpfer, D. 2002. Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic correction. *International Journal of Remote Sensing* 23(13), 2631-2649. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160110115834>

REDMAR (Red de Mareógrafos de Puertos del Estado). *Informes Anuales años 2005, 2006, 2007 y 2009*. Último acceso: 19 de Marzo de 2014, <http://www.puertos.es>

RSI, 2000. ENVI User's Guide. *Research Systems Inc. Publications*.