

## Contribución al Estudio de los Humedales del Manto Eólico Litoral de El Abalarío-Doñana a partir de Imágenes AHS

C. Antón-pacheco<sup>(1)</sup>, M.T. Moreno<sup>(1)</sup>, J. A. Gómez<sup>(2)</sup>, M. Jiménez<sup>2</sup>, C. Mediavilla<sup>(1)</sup>, J.C. Gumiel<sup>(1)</sup>, E. Prado<sup>(2)</sup>, J.G. Rejas<sup>(2)</sup>, O. Gutiérrez<sup>(2)</sup> y A. Rebollo<sup>(1)</sup>

<sup>(1)</sup> Instituto Geológico y Minero de España. La Calera 1. 28760 Tres Cantos. 28760 Madrid. [c.pacheco@igme.es](mailto:c.pacheco@igme.es)

<sup>(2)</sup> Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Ctra. de Ajalvir, km 4. 28850 Torrejón de Ardoz. Madrid. [gomezsj@inta.es](mailto:gomezsj@inta.es)

### Resumen

El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) ha registrado dos campañas de vuelos con un sensor hiperspectral aeroportado AHS sobre el Manto Eólico Litoral de El Abalarío-Doñana (MEL). Este importante ecosistema comprende un gran número de lagunas permanentes y temporales que dependen en parte del agua subterránea. El sensor AHS es un nuevo espectrómetro de imagen aeroportado que, con 80 bandas, cubre gran parte de las regiones solar y térmica del espectro. Las imágenes obtenidas en primavera y final del verano de 2004 han sido geocodificadas utilizando los parámetros de orientación externa medidos por un sistema inercial GPS/INS a bordo del avión. Se ha realizado una corrección atmosférica utilizando espectrometría de campo registrada durante los vuelos. A partir de la información AHS corregida y calibrada, se han establecido los niveles de inundación de las formaciones palustres y sus fluctuaciones durante un ciclo hidrológico particularmente húmedo. Asimismo, se han aplicado diversos algoritmos de tratamiento de las imágenes AHS para caracterizar la vegetación higrófila (monte negro) característica de la zona, cuya distribución es un buen indicador de la profundidad del nivel freático en este sector del acuífero regional Almonte-Marismas.

**Palabras clave:** imágenes AHS, humedales, vegetación higrófila, acuífero, Doñana.

### Abstract

High spectral-resolution AHS data have been collected over the Manto Eólico Litoral El Abalarío-Doñana (MEL) within the nature reserve of Doñana, a Ramsar wetland. This ecosystem constitutes one of the largest and most important remaining wetlands in Europe. The MEL is located in the eolic mantle of the Huelva coastal plain and holds a large number of permanent and temporal shallow marsh lagoons. Natural vegetation is mainly composed of different

types of shrub communities, whose distribution depends on their position with regard to the phreatic water table depth of the Almonte-Marismas aquifer. The AHS system is a new 80-band airborne hyperspectral scanner covering the visible through long wave thermal IR. Data were collected during two flight campaigns in spring and early fall 2004. Atmospheric correction and in situ spectral reflectance measurements have been applied and the data has been geo-rectified using an integrated GPS/INS. Surface water fluctuations during the especially humid 2004 hydrologic cycle have been mapped and a preliminary spectral characterization of hygrophytic shrub vegetation has been performed

**Key words:** AHS data, wetlands, vegetation, water-table depth, Doñana.

### 1. Introducción

La comarca de Doñana constituye uno de los enclaves húmedos con mayor valor ecológico de Europa. Varios ecosistemas bien diferenciados: la marisma, las dunas móviles, las arenas estabilizadas (Manto Eólico del Abalarío-Doñana), y una zona de contacto entre las arenas y la marisma (ecotono de La Vera-Retuerta) conforman la mayor parte de los humedales de esta región. Aunque la marisma depende fundamentalmente de las aportaciones del sistema hidrológico superficial, la hidrodinámica y peculiaridades del complejo palustre del Manto Eólico y el ecotono están estrechamente relacionadas con las descargas de las aguas subterráneas del sistema acuífero Almonte-Marismas. La transformación de ciertos sectores de la marisma, las extracciones de aguas subterráneas para riegos de uso agrícola y el desarrollo de áreas urbanas próximas a estas zonas húmedas han provocado problemas zonales en el nivel freático del acuífero. Los descensos prolongados del nivel piezométrico, pueden producir severas modificaciones en la descarga natural por los ecotonos y reducir la extensión de los humedales durante la época seca.

Las imágenes registradas desde avión y satélite proporcionan una visión óptima de los niveles de inundación de la marisma y de las formaciones palustres y permiten detectar los cambios producidos a lo largo de distintos periodos hidrológicos. En este sentido se ha analizado una serie temporal de imágenes Landsat y del sensor aeroportado ATM para determinar las fluctuaciones de la lámina de agua de las lagunas peridunares de Doñana [1]. Los datos de tipo hiperespectral ofrecen una información en espectro continuo de manera que su estudio permite reconocer rasgos espectrales diagnósticos críticos para identificar los materiales. El sensor Airborne Hyperspectral System (AHS), recientemente adquirido por el INTA, se ha utilizado en este área con objeto de evaluar estas nuevas técnicas en el estudio y caracterización de las formaciones palustres y las distintas comunidades de vegetación higrófitica asociadas.

## 2. Área de estudio

El Manto Eólico Litoral de El Abalarío-Doñana (MEL) se extiende desde el río Tinto hasta la flecha de la desembocadura del Guadalquivir (figura 1). Esta formación eólica se incluye en el Ecosistema Litoral de Doñana [2], en el que se diferencian hasta cinco mantos eólicos en función de su geomorfología y comportamiento hidrodinámico [3]. Entre ellos destaca el denominado como Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables, donde se localiza el núcleo principal del complejo palustre endorreico de Doñana, del que existe un inventario recientemente actualizado [4]. Desde el punto de vista hidrogeológico, se sitúa en el extremo meridional del acuífero Almonte-Marismas, conocido también como acuífero de Doñana o sistema acuífero 27 [5], que se localiza en la cuenca baja del río Guadalquivir.

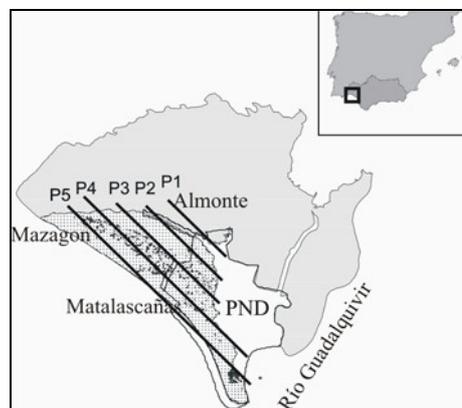


Figura 1: Situación del Manto Eólico Litoral de El Abalarío-Doñana (MEL) y líneas de vuelo AHS

La presencia del Parque Nacional de Doñana (54250 ha) y del Parque Natural de Doñana (53700 ha), que prácticamente lo circunda confieren a este entorno una peculiar relevancia ecológica. El acuífero está constituido por una alternancia de materiales detríticos con intercalaciones de limos y arcillas depositados durante el Pliocuaternario sobre un substrato regional de muy baja permeabilidad (formación "margas azules"). Los materiales acuíferos ocupan una extensión de 3400 km<sup>2</sup>, de los que 1800 km<sup>2</sup> están confinados bajo los sedimentos recientes arcillosos de la marisma (acuífero en carga) y el resto constituyen el área de recarga del acuífero libre. La recarga natural del acuífero se produce mayoritariamente por infiltración de agua de lluvia en la zona de acuífero libre. En la descarga una parte importante se efectúa por drenaje difuso hacia el mar, ríos y arroyos, por evapotranspiración y, en gran medida, por el bombeo para riego y abastecimiento urbano. El acuífero de Doñana sustenta gran parte de los humedales de esta región [6] que se localizan en pequeñas depresiones del terreno cuando intercepta el nivel freático, o bien surgen a partir de las descargas freáticas del agua subterránea, muchas veces difusas, hacia los arroyos, caños y el ecotono de la Vera.

El clima es de tipo mediterráneo subhúmedo con influencia oceánica. Se caracteriza por la variabilidad hiperanual e interanual de las precipitaciones, con una pluviometría media de 565 mm. Debido a su extrema irregularidad, las precipitaciones pueden reducirse a la mitad en años secos. La mayor parte de la precipitación anual se produce de octubre a marzo, con precipitaciones mínimas durante el verano, época en las que la mayor parte de la marisma se seca y la superficie inundada se reduce a la lámina de agua de algunas lagunas naturales y a las alimentadas artificialmente.

Sobre el MEL se extiende un importante conjunto de formaciones palustres y de comunidades vegetales. Estudios realizados en Doñana muestran que la profundidad del nivel freático y sus fluctuaciones son un factor condicionante en la distribución de los distintos tipos de vegetación higrófila [7]. Esta vegetación higrófila de matorral natural es característica de la zona (monte negro), de tal manera que su disposición es indicativa de las fluctuaciones de dicho nivel. Los descensos prolongados del nivel piezométrico, debidos a cambios hidrológicos naturales o artificiales por extracciones intensivas, pueden producir modificaciones severas en la descarga natural por los

ecotonos y reducir la extensión de los humedales durante la época seca.

En el sector este del MEL, en la zona de contacto entre el cordón de dunas semiestables y las arenas estabilizadas (Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables), dentro de la Reserva Biológica de Doñana, se localizan las lagunas peridunares de Doñana (Santa Olalla, Dulce, Las Pajas, Taraje, Zahillo, Charco del Toro y Brezo) y en la parte más septentrional un importante conjunto de lagunas temporales. En función de los niveles de encharcamiento aparecen distintos tipos de vegetación. La gradación de especies desde el borde de las lagunas hacia el interior se organiza en bandas alrededor de la lámina de agua. Junto al borde se desarrolla un tapiz de herbáceas (*Agrostis stolonifera*, *Cynodon dactylon*, *Panicum repens*, *Mentha pulegium*) y diversas especies de helófitos (*Juncus maritimus*, *Juncus acutus*, *Scirpus holoschoenus*). Hacia fuera del borde de la laguna, en las depresiones húmedas y con encharcamiento temporal en invierno, aparecen especies higrofitas como *Ulex minor*, *Erica scoparica*, *Rubus ulmifolius*, *Pistacia lentiscus*, *Phyllirea angustifolia*, *Myrtus communis*, *Smilax aspera*, *Pteridium aquilinum*,... En zonas más secas y más altas que las anteriores se desarrollan especies xerófitas del monte blanco como *Halimium halimifolium*, *Halimium commutatum*, *Cistus libanotis*, *Lavandula stoechas* y *Rosmarinus officinalis*. Al este del cordón de lagunas, en la zona de La Vera, la descarga de la humedad filtrada por las arenas permite una alta productividad vegetal. Se desarrollan juncales, carrizales, pastizales perennes y especies higrófilas (*Pistacia lentiscus*, *Rubus ulmifolius*, *Erica scoparica*, *Tamarix africana*, *Myrtus communis*, *Pteridium aquilinum*, *Smilax aspera*, *Rosa canina*, *Crataegus monogyna*,...).

### 3. Material

#### 3.1. Sensor AHS

El espectrómetro de imagen AHS (Airborne Hyperspectral Scanner, Imaging Group ArgonST [8] es un sensor aeroportado tipo "line-scanner" que registra en 80 bandas (Tabla 1), dentro de las ventanas atmosféricas, desde el visible al infrarrojo térmico y divide la radiación incidente en 5 espectrómetros o "puertos ópticos" individuales.

#### 3.2. Campañas aeroportadas

En primavera y final de verano de 2004 se han realizado dos campañas de vuelos cubriendo la totalidad del MEL. Se planificaron 5 líneas de vuelos

(Figura 1) con un GIFOV preferencial de 6,9 m, para lo que se tuvieron en cuenta la relación entre extensión de terreno y número de pasadas, cobertura lateral, solape transversal y rumbo de vuelo respecto al azimut solar. Las campañas se realizaron el 27 de abril y el 21 de septiembre, adaptando para cada fecha las horas de vuelo a la posición solar requerida. Se adquirieron 5 líneas a 6,9 m en abril y seis en septiembre. Para ambas campañas se repitieron dos líneas de vuelo en pasadas a 4,6 m. Debido a problemas técnicos no se registraron datos en el puerto 2 en ninguna de las dos campañas.

**Tabla 1. Características Técnicas AHS**

FOV: 90° IFOV: 2,5 mrad GIFOV: 2,5 ÷ 7 m Digitalización: 12 bits 750 píxeles / línea Dos cuerpos negros para calibración de los canales térmicos.	
<b>AHS config.espec / Región / n° canales/Δλ</b>	
Puerto 1 VIS+NIR / 442 -1019 nm / 20/30nm Puerto 2 <sup>a</sup> SWIR / 1491 -1650 nm /1/ 200 nm Puerto 2 SWIR / 2019 -2488 nm / 42/13nm Puerto 3 MWIR / 3030 – 5410 nm /7/300nm Puerto 4 LWIR /7950 -13170 nm /10/400nm	

### 4. Métodos

#### 4.1. Pre-procesos

Se han aplicado a las imágenes una serie de calibraciones y correcciones necesarias para el análisis de los datos hiperespectrales.

#### 4.2. Calibración a radiancia en el sensor

En el caso de las bandas reflectivas (puertos 1 y 2<sup>a</sup>, Tabla 1) los niveles digitales originales se han calibrado mediante coeficientes de calibración obtenidos en el Servicio de Teledetección del INTA utilizando una "esfera integradora" de calibración USS 400 (*Labsphere*) [9] cubierta con Spectrafect (*Labsphere*). Para las bandas térmicas (puertos 3 y 4, Figura 2) se ha aplicado una interpolación lineal utilizando el nivel digital registrado y la temperatura asignada a los cuerpos negros de referencia (10 y 50 °C en ambas campañas) situados antes y después de cada línea escaneada.

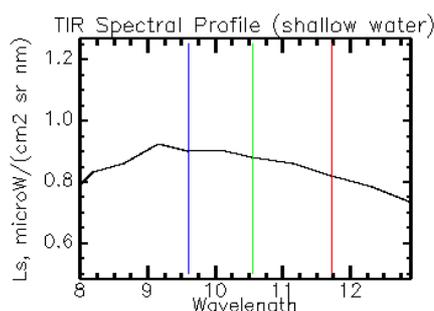


Figura 2: Radiancias en el sensor de las bandas térmicas

#### 4.1.2. Calibración a reflectividad en el terreno

Para la eliminación del efecto atmosférico y de iluminación, diferencial entre pasadas y campañas, se han convertido los valores de radiancia en el sensor a valores de reflectividad en el terreno. Para ambas campañas se ha corregido únicamente el puerto 1 aplicando el algoritmo “Empirical Line” [10] mediante firmas espectrales de superficies “brillantes” y “oscuras” dentro de la zona de estudio, adquiridas en sendas campañas de espectroradiometría de campo coincidiendo con cada vuelo.

#### 4.3.3. Georreferenciación

La corrección de las distorsiones sufridas por las imágenes AHS durante su adquisición debido a los movimientos de la plataforma y del sensor (figura 3), se han abordado mediante una corrección paramétrica utilizando el software de geocodificación directa PARGE (ReSe [11]). La georreferenciación de las imágenes mediante este método requiere disponer de los datos de orientación externa medidos en el momento de adquisición, así como con un modelo digital del terreno (MDT) de la zona de interés. Los datos de posición (X, Y, Z) y de alabeo, cabeceo y azimut han sido medidos por el sistema inercial PPS/INS POS/AV 410 [12] instalado a bordo de la plataforma aérea. Para el cálculo de la trayectoria, los datos GPS adquiridos han sido procesados aplicando correcciones diferenciales en post-proceso, utilizando para ello dos estaciones de referencia GPS permanentes enmarcadas dentro del Proyecto IBEREF [13]. Dichas estaciones se encuentran instaladas en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Topográfica de Madrid y en la Universidad de Jaén.

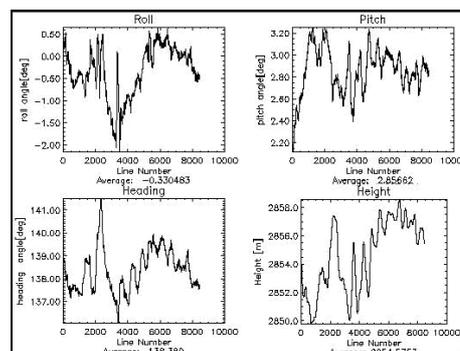


Figura 4: Angulos de la plataforma medidos por el POS/AV 410 para la pasada central a 6.8 m.

El MDT utilizado en el proceso de georreferenciación ha sido rasterizado a partir de la altimetría de las hojas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con paso de malla de 25 metros y remuestreado a 6 metros para las pasadas de 6.9 m y 4 metros para las pasadas de 4.6 m.

### 4.3. Espectroradiometría de campo y análisis de los datos AHS

Las campañas de radiometría se han efectuado con el espectrorradiómetro ASD FieldSpec del Laboratorio de Teledetección de Estudios Hídricos del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) y el GER 1500 del Servicio de Teledetección del INTA. Las medidas para transformar los valores de radiancia de las imágenes en reflectividades se han registrado principalmente en el área de las lagunas de Santa Olalla y La Dulce y en las arenas de los cordones dunares. Los registros sobre las cubiertas vegetales se han basado en la distribución horizontal de la vegetación, desde los pastizales y juncales del borde de la laguna de Santa Olalla al matorral higrófilo y al xerófilo en las zonas de topografía más elevada. Se han tomado medidas sobre los diferentes tipos de cubiertas vegetales: pastizales, helófitos, especies higrófitas y otras especies de carácter xerófito como son las correspondientes al monte blanco.

Las signaturas espectrales registradas en abril (Figura 5) y septiembre (Figura 6) ponen de manifiesto valores más altos de reflectividad a 0,55  $\mu\text{m}$  para el pastizal en septiembre. En esa fecha los pastizales asociados a zonas húmedas no se han agostado y tienen un mayor desarrollo foliar. Tanto el brezal como el monte blanco presentan valores intermedios y son los helófitos los que dan valores más bajos en este segmento.

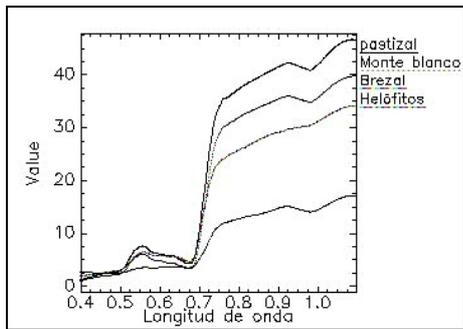


Figura 5: Signaturas espectrales de cubiertas vegetales registradas en abril

El pico de absorción a  $0,67 \mu\text{m}$  es más intenso para las herbáceas. En el caso del brezal y el monte blanco los valores son muy similares para ambas fechas. La signatura correspondiente a los helófitos presenta en esta región una inflexión menos acusada.

Aproximadamente a  $0,92 \mu\text{m}$  el pastizal de septiembre da los valores más altos; en esta región se observan las diferencias más acusadas para esta cubierta con respecto a los valores de abril. El brezal higrófitico presenta valores mayores que el monte blanco en septiembre, mientras que en abril la situación es inversa. La absorción que se produce a  $0,98 \mu\text{m}$  se pone de manifiesto en todas las cubiertas. El aumento de reflectividad hacia  $1,1 \mu\text{m}$  es también similar.

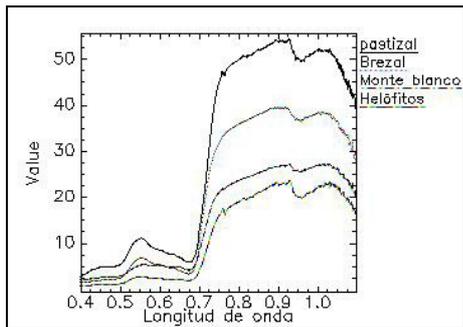


Figura 6: Signaturas espectrales de cubiertas vegetales registradas en septiembre

Una vez realizada la calibración de los datos registrados en el VIS y NIR a reflectividad, se ha aplicado la transformación Minimum Noise Fraction (MNF) con objeto de reducir el ruido y la dimensionalidad de la información relevante. Sobre las bandas resultantes se ha utilizado el algoritmo PPI (Pixel Purity Index) [14] para identificar los componentes espectralmente puros relacionados con

los distintos tipos de cubiertas vegetales anteriormente descritos. Mediante el clasificador angular (Spectral Angle Mapper) se ha obtenido una primera aproximación sobre la abundancia en cada píxel de los componentes de referencia.

#### 4.4. Cartografía de humedales

El año hidrológico de 2004 se ha caracterizado por una gran abundancia de precipitaciones. En la estación meteorológica del Palacio de Doñana, el valor de la precipitación acumulada durante el periodo octubre de 2003 a abril de 2004, alcanzó un valor de 690 mm, mientras que entre mayo y septiembre de 2004 la precipitación fue de 65,4 mm. El nivel de agua de la marisma y las lagunas alcanzó durante la primavera una cota excepcional, lográndose el máximo de superficie inundada en marzo-abril de 2004. Aunque el nivel se mantuvo hasta bien entrado el verano, en septiembre la lamina de agua se limitaba al cordón de lagunas de Santa Olalla, y a las alimentadas artificialmente del sector del El Acebuche. El registro de dos series completas del MEL con imágenes AHS en las etapas de máxima variación interanual del año 2004, ha permitido la cartografía de la fluctuación de la lámina de agua para este periodo.

A partir de las imágenes georreferenciadas se han realizado los mapas correspondientes a las superficies de lámina de agua de los sistemas lagunares y zonas de encharcamiento. Los resultados muestran que el nivel de la lámina de agua en abril de 2004 fue excepcionalmente alto, tanto en el sector oriental del MEL, correspondiente al Parque Nacional, como en el área central y occidental, correspondiente al Parque Natural, donde se ubican las lagunas temporales de El Abalarío. Cabe destacar, sin embargo, el estado de desecación de las lagunas del Río Oro, Carrizosa, Jiménez, La Vaca..., en el sector más occidental del Parque Natural. El cálculo de dichas superficies ha permitido establecer que en abril de 2004 la lámina de agua alcanzaba 744,10 ha y que en septiembre dicha superficie se redujo a 65,76 ha.

El control de la evolución de los niveles piezométricos del acuífero Almonte-Marismas se realiza mediante una red general que depende de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, en la que participan otros organismos de la administración, como el Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Actualmente el IGME dispone de una red específica de sondeos piezométricos multitubo en el entorno del complejo lagunar de Santa. Olalla-Charco del Toro. La Figura 7 muestra los registros piezométricos de 6 sensores de nivel con registro continuo instalados por el

IGME en el entorno de las lagunas durante el año 2004.

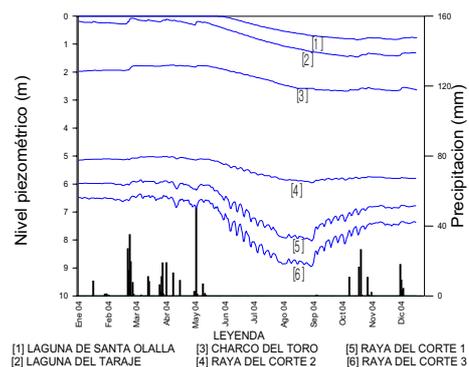


Figura 7: Precipitación y niveles del acuífero en 6 piezómetros del sector Santa Olalla durante 2004

Se observa que desde mayo (final interanual húmedo) hasta octubre (final interanual seco), todos los piezómetros descienden progresivamente en torno a los 80 cm. El ciclo anual enero 04/05 muestra unos descensos comprendidos entre 65 cm (Raya del Corte y Toro) y 120 cm (Taraje). Los acusados descensos que se observan en las curvas [5] y [6] reflejan el efecto de los bombeos de abastecimiento de Matalascañas en los niveles más profundos.

## 5. Resultados

Se han obtenido imágenes georreferenciadas en proyección UTM, Datum ED50 con un error medio cuadrático (RMS) estimado de 1 a 2 píxeles.

El análisis de las imágenes georreferenciadas ha permitido estimar la superficie de lámina de agua de las lagunas y zonas de encharcamiento del MEL en las dos fechas de máxima fluctuación interanual para un año hidrológico particularmente húmedo. Las imágenes registradas en abril, a pesar del alto nivel de inundación en esta fecha, parecen confirmar la desecación de algunas lagunas en sectores próximos a zonas donde se realizan bombeos del acuífero. Las imágenes registradas en septiembre reflejan la temporalidad de la mayor parte de estas formaciones palustres.

A pesar del reducido rango espectral de los datos registrados a causa del fallo del puerto 2, el ajuste espectral de las imágenes a la radiometría de campo ha permitido realizar una caracterización espectral preliminar de determinadas cubiertas vegetales higrófitas de interés por su relevancia ecológica.

## 6. Agradecimientos

Agradecemos a Ramón Peña, Antonio Ruiz-Verdú y José Antonio Domínguez y del Laboratorio de Teledetección del CEDEX el registro de la radiometría de campo durante la campaña de abril.

## 7. Referencias

- [1] Moreno, M.T., Antón-Pacheco, C y Gumiel, J.C., "Detección de las variaciones estacionales de las lagunas peridunares de Doñana a partir de imágenes Landsat e imágenes DS 1268 ATM". *Geo-Temas*, 6 (2): 353-356, 2004.
- [2] Montes, C., Borja, F., Bravo, M. A., y Moreira J. M., "Reconocimiento Biofísico de Espacios Naturales Protegidos. Doñana". Conserjería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. 311 pp. 1 mapa, 1998.
- [3] Borja, F. & Díaz del Olmo, F., Manto Eólico Litoral (MEL) de El Abalarío (Huelva, España): episodios morfogenéticos posteriores al 22.000 BP. Dinámica y Evolución de Medios Cuaternarios, Pérez, A. et al., (Eds). *Actas del Simposio Paleambiente Cuaternario de la Península Ibérica*: 375-390, 1996.
- [4] Ruiz-Labourdette, D., Coletto, C., Bravo, M. A., Borja, F., Borja, C., y Montes, C., "Mapa del Complejo Palustre de los Arenales Litorales de Doñana". Junta de Andalucía. 1 CD, in litt.
- [5] IGME, "Hidrogeología del Parque Natural de Doñana y su entorno". 64 pp. 1 mapa. 1992.
- [6] Bravo, M. A., & Montes, C., "Inventario de las formaciones palustres del manto eólico del Parque Nacional de Doñana (SW España)". *Acta VI Congreso español de Limnología*: 31-43. Granada. 1993.
- [7] Zunzunegui, M., Díaz Barradas, M.C., y García Novo, F., "Vegetation fluctuation in mediterranean dune ponds in relation to rainfall variation and water extraction". *Applied Vegetation Science*, 1: 151-160, 1998.
- [8] <http://www.argonst.com/>
- [9] <http://www.labsphere.com/>
- [10] Smith, G. M. and Milton, E. J., "The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance". *International Journal of Remote Sensing*, 20: 26553 – 2662, 1999.
- [11] <http://www.rese.ch/products.html>
- [12] <http://www.applanix.com/>
- [13] [www.iberef-gps.com](http://www.iberef-gps.com)
- [14] <http://www.rsinc.com/envi/>