

Cartografía de especies de matorral de la Reserva Biológica de Doñana mediante el sistema hiperespectral aeroportado INTA-AHS. Implicaciones en el estudio y seguimiento del matorral de Doñana.

M. Jiménez Michavila ¹

(1) Área de Teledetección del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial. Carretera de Ajalvir Km 4. Torrejón de Ardoz 28850, España.

➤ Recibido el 22 de diciembre de 2011, aceptado el 20 de enero de 2012.

Jiménez Michavila, M. (2012). Cartografía de especies de matorral de la Reserva Biológica de Doñana mediante el sistema hiperespectral aeroportado INTA-AHS. Implicaciones en el estudio y seguimiento del matorral de Doñana. *Ecosistemas* 21(1-2):211-217.

En los ecosistemas terrestres el conocimiento de la distribución espacial de la cubierta vegetal está determinado habitualmente a nivel de comunidad. Ahora bien, la presencia y abundancia de las especies integrantes puede variar debido a los gradientes ambientales, a las perturbaciones, y a las cualidades y la tasa reproductora de las propias especies. En las últimas décadas se ha puesto de manifiesto la importancia que una cartografía de especie pueden tener en el seguimiento de las comunidades, y en la evaluación de las medidas de gestión implementadas en espacios naturales protegidas.

Los métodos convencionales para la elaboración de este tipo de cartografías pueden ser inviables sobre ecosistemas de difícil acceso, o suponer trabajos de campo prohibitivamente costosos en tiempo y dinero sobre áreas extensas. El desarrollo de imágenes de alta resolución espacial desde satélite, supuso un avance en el análisis y seguimiento de la biodiversidad sobre especies de gran porte en zonas de baja diversidad. Para zonas heterogéneas o de alta diversidad, como el matorral mediterráneo o bosques tropicales, las imágenes hiperespectrales de alta resolución espacial muestran una capacidad superior (Nagendra et al. 2010). Un programa de seguimiento ecológico a largo plazo de la distribución espacial de especies vegetales mediante teledetección hiperespectral aeroportada, requiere de un protocolo que proporcione información periódica utilizando procedimientos repetibles y estandarizados, con los que poder detectar las zonas y la tasa de los cambios en composición de especies.

El objetivo principal de esta tesis es facilitar el uso de imágenes hiperespectrales aeroportadas para la elaboración de cartografías de especies vegetales, y que puedan formar parte de programas de seguimiento ecológico a largo plazo. Esta tesis se ha dividido en tres partes.

Procedimiento general para la realización de cartografías de especies mediante teledetección hiperespectral aeroportada

Se han recopilado las metodologías más recientes y estándares sobre adquisición, proceso, análisis y metadatos de imágenes hiperespectrales y datos auxiliares, que sirven de referencia para la aplicación de cualquier sistema hiperespectral

sobre todo tipo de formación vegetal (**Tabla 1**). Los aviones de “cota baja” que vuelan entre 300 y 5000 metros sobre el nivel del mar, son las plataformas más utilizadas. El formulario de requisitos de campaña publicado por EUFAR-HYRESSA (www.hyressa.net) ayuda a concretar los aspectos más variables, como la resolución espacial y las trayectorias de las líneas de vuelo. Las imágenes son procesadas por el centro operador de teledetección, generando un mosaico de las pasadas adquiridas en valores de reflectancia espectral georreferenciada. El proceso geométrico se realiza mediante métodos paramétricos basados en sistemas inerciales de navegación. El proceso radiométrico está sustentado en una calibración radiométrica y espectral de laboratorio, periódica y exhaustiva. Los datos de campo y auxiliares son fundamentales para el proceso y análisis de las imágenes, en especial un modelo digital de terreno de alta resolución espacial. Este aspecto está cada vez más extendido y facilitado por la Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) de cada Comunidad Autónoma. También la toma de datos en campo como: la recolección del recubrimiento de especies en parcelas de campo, que permiten la validación de la cartografía generada; la elaboración de una librería espectral de las especies mediante espectro-radiometría de campo, que permite caracterizar la separabilidad espectral entre ellas. Estas firmas de reflectancia espectral (**Fig. 1**) suponen además los “componentes puros” de entrada al algoritmo de desmezcla espectral. El análisis lineal de mezcla espectral (ALME) es el algoritmo de desmezcla espectral más utilizado para la estimación de los elementos a nivel sub-píxel en imágenes hiperespectrales. Aunque la vegetación tiende a un comportamiento no-lineal en la integración de la señal que forma el píxel, los métodos lineales siguen siendo de mejor aplicación e interpretación a la hora de cuantificar las proporciones de cada especie dentro del píxel.

La comunidad científica demanda un uso más eficiente de los datos y productos geográficos. Las iniciativas INSPIRE, en el ámbito europeo, y la *Open Geospatial Consortium* (OGC), en el internacional, están promoviendo normativas sobre formatos y metadatos que aumentan la interoperabilidad de los datos geoespaciales. En la actualidad el estándar de metadatos al que se pueden adaptar las imágenes hiperespectrales es la ISO-19115-2; para las cartografías la norma es la ISO-19115; los datos de campo siguen el *Ecology Metadata Language* (EML); las firmas espectrales, en cambio, no tienen un estándar a día de hoy.

Procedimiento general para de cartografía de especies vegetales mediante teledetección hiperespectral aeroportada					
Unidad	Elemento	Descripción	Entrada	Salidas	Comentario /Responsable
Zona de Estudio y Formaciones Vegetales	Comunidades Vegetales	-Recopilación de las características y estado fenológico de las especies	-Catálogos -Descripciones -Bibliografía	-Documento descriptivo de las especies dominantes	-Organismo Usuario
	Cartografías existentes	-Cartografías de la zona de estudio y comunidades vegetales. -Modelo Digital Terreno	-Mapas Digitales (formato raster o vectorial) -Metadatos	-Base de datos en un sistema de proyección común de todas las cartografía recopiladas	-Transformación de coordenadas -Organismo Usuario
	Muestreos de la Vegetación	-Planificación de un muestreo estratificado -Realización de muestreos de campo	-Documento especies vegetales -Cartografías existentes -Protocolo de muestreo de campo	-Localización de parcelas -Plan de muestreo -Datos de campo -Metadatos	-Estadillo de Campo -Mismo sistema de proyección que cartografía -Organismo Usuario
	Espectro-radiometría de Campo	Adquisición de firmas espectrales de especies vegetales y superficies naturales	-Documento especies vegetales -Cartografías existentes -Localización parcelas de muestreo de campo	-Librería espectral de especies vegetales -Firmas espectrales de superficies naturales -Metadatos	-Organismo Usuario -Colaboración del Centro Operador
	Separabilidad espectral de especies vegetales	Estudio de la variabilidad espectral intra-específica y la similitud inter-específica	-Librería espectral de especies vegetales -Métodos de evaluación de separabilidad espectral	-Variabilidad intra-específica -Similitud inter-específica	-Organismo Usuario

Sistema Hiperespectral Aeroportado	Calibración del Sensor	<ul style="list-style-type: none"> - Calibración radiométrica - Calibración espectral - Calibración geométrica 	<ul style="list-style-type: none"> -Parámetros del sensor -Procedimientos de calibración radiométrica -Procedimientos de calibración espectral -Procedimientos de calibración geométrica 	<ul style="list-style-type: none"> -Coeficientes de calibración -Centros y anchos de cada canal -Ángulos de des-alineamiento sensor-plataforma 	<ul style="list-style-type: none"> -Se realiza en las instalaciones del centro operador -Centro Operador
	Requisitos de usuario	-Documento que resume todos los aspectos para planificar la campaña de vuelos	<ul style="list-style-type: none"> -Cartografías existentes -Documento de especies vegetales -Separabilidad espectral de especies vegetales 	-Documento de requisitos de usuario	<ul style="list-style-type: none"> -Coordinación entre el centro operador y el Organismo usuario. -La separabilidad espectral informa sobre mejor época para vuelos
	Planificación de Campaña de Vuelo	-Documento que resume las líneas de vuelo, sus trayectorias y horas	<ul style="list-style-type: none"> -Requisitos de Usuario -Características del sensor 	-Documento con el programa de vuelos	-Centro Operador
	Corrección Atmosférica	-Transformación de las imágenes a valores de reflectancia en el terreno	<ul style="list-style-type: none"> -Imágenes "en bruto" -Coeficientes de calibración -Centros y anchos de cada canal -Parámetros atmosféricos 	-Imágenes de reflectancia en el terreno	<ul style="list-style-type: none"> -El Centro Operador realiza el proceso -El Organismo Usuario puede recolectar algunos datos atmosféricos.
	Corrección Geométrica	<ul style="list-style-type: none"> -Georreferenciación de las imágenes a un sistema de proyección -Mosaicos de las pasadas para la zona de estudio 	<ul style="list-style-type: none"> -Imágenes de reflectancia en el terreno -Calibración geométrica -Datos del sistema Inercial de Navegación -Estación de referencia -Modelo Digital Terreno 	-Mosaicos de Imágenes de reflectancia en el terreno georreferenciadas	-El centro operador realiza el proceso
	Capacidad Discriminativa de las especies vegetales	-Evaluación de la capacidad discriminativa de las especies vegetales con el poder resolutivo	<ul style="list-style-type: none"> -Características espaciales, espectrales y radiométricas del sensor -Librería espectral de especies vegetales 	-Error relativo en la diferenciación espectral, espacial y radiométrica entre las especies vegetales	<ul style="list-style-type: none"> -Es un paso opcional -Organismo Usuario
	Calidad de imágenes	-Aplicación de métricas que evalúan el error geométrico y radiométrico de las imágenes	<ul style="list-style-type: none"> -Mosaicos de Imágenes de reflectancia en el terreno georreferenciadas -Requisitos radiométricos y geométricos de usuario 	<ul style="list-style-type: none"> -Error en reflectancia -Error en posicionamiento 	<ul style="list-style-type: none"> -Tienen que seguir la norma ISO 19138 -El centro operador realiza el proceso
	Generación Metadatos	-Fichero adjuntos con información sobre las imágenes y los procesos aplicados	<ul style="list-style-type: none"> -Mosaicos de Imágenes de reflectancia en el terreno georreferenciadas 	<ul style="list-style-type: none"> -Fichero en lenguaje XML con la norma ISO 19115 	<ul style="list-style-type: none"> -Tienen que seguir la norma ISO 19115 -Centro operador -El centro operador realiza el proceso

Análisis de Imágenes	Fuentes de Incertidumbre en Desmezcla espectral	-Selección de los parámetros de entrada del algoritmo de desmezcla espectral	-Mosaicos de Imágenes de reflectancia en el terreno georeferenciadas -Librería espectral de especies vegetales	-Imágenes de presencia y abundancia de cada especie vegetal -Error por cada configuración	-Organismo Usuario -Es un paso opcional cuando de dispone de varias librerías espectrales
	Proceso Nominal de Desmezcla espectral	-Configuración del algoritmo de desmezcla espectral con los parámetros de mínimo error.	-Mosaicos de Imágenes de reflectancia en el terreno georeferenciadas -Librería espectral de especies vegetales	-Imágenes de presencia y abundancia de cada especie vegetal	-Organismo Usuario
	Verificación de la Cartografía	-Estimación del error de las cartografías de abundancia frente a datos de campo o cartografías de referencia	-Muestreos de campo -Imágenes de presencia y abundancia de cada especie vegetal	-Error entre el recubrimiento estimado por la imagen y el de los muestreos de campo.	-Organismo Usuario -Tienen que seguir la norma ISO 19138

Tabla 1. Procedimiento general para de cartografía de especies vegetales mediante teledetección hiperespectral aeroportada. Se describen todos los elementos necesarios para la zona de estudio y formación vegetal, para el sistema hiperespectral, y el análisis de la imagen. Identifica que papel juegan en cada elemento el centro operador de teledetección y el organismo usuario.

Cartografía de especies dominantes del matorral de la Reserva Biológica de Doñana utilizando el sistema hiperespectral aeroportado INTA-AHS

En el ecosistema de las *Arenas Estabilizadas* se desarrollan comunidades de matorral pirófito con especies dominantes esclerófilas como *Erica scoparia*, semie-esclerófilas como *Rosmarinus officinalis* y *Halimium halimifolium* y leguminosas como *Ulex australis* y *Stauracanthus genistoides*. Este matorral ha sustituido de manera mayoritaria al matorral "noble", formado por especies esclerófilas de gran porte como lentiscos (*Pistacia lentiscus*) y arrayan (*Myrtus communis*), y los bosques originales de alcornoque (*Quercus suber*) y sabinas (*Juniperus phoenicea* ssp. *turbinata*). La orografía dunar condiciona el acceso a los recursos hídricos subterráneos, y con ello la distribución de las distintas comunidades de matorral *Monte Blanco*, *Monte Intermedio* y *Monte Negro*. Otro factor condicionante para su distribución es el diferente régimen de lluvias estacional, se alternan una época seca con ausencia total de precipitaciones entre mayo-septiembre, y una época lluviosa, con una media de 600 ml, entre octubre-abril.

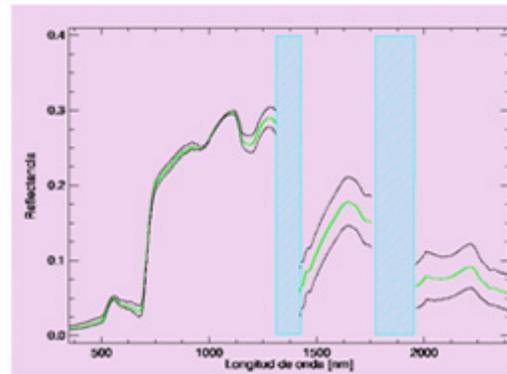
El 28 septiembre de 2005 (época seca) y el 29 de abril de 2008 (época húmeda) se realizaron campañas de vuelos sobre la Reserva Biológica de Doñana con el sistema hiperespectral aeroportado INTA-AHS (Fernández-Renau et al. 2005). Se procesaron las imágenes formando, para ambas épocas, mosaicos a 6 m de tamaño de píxel sobre el ecosistema de las *Arenas Estabilizadas*.

El test de *T-Student* aplicado sobre las firmas espectrales tomadas con el espectro-radiómetro ASD FieldSpec3 (www.asdi.com) en las dos épocas, muestra que las especies exhiben una mayor diferencia inter-específica en época seca ($p < 0.05$). Algoritmos que evalúan la similitud espectral, como *Spectral Angle Mapper* (SAM) y *Spectral Similarity Value* (SSV), aplicados sobre las firmas de época seca muestran diferencias significativas a nivel de comunidad y de tipos de hojas. A nivel de especie, las diferencias son también significativas, salvo para el caso de las bajas diferencias encontradas entre las especies de leguminosas.

Espectro-radiometría de campo sobre brezo de escobas (*Erica scoparia*)



Reflectancia espectral en época húmeda (octubre-abril)



Reflectancia espectral en época seca (mayo-septiembre)

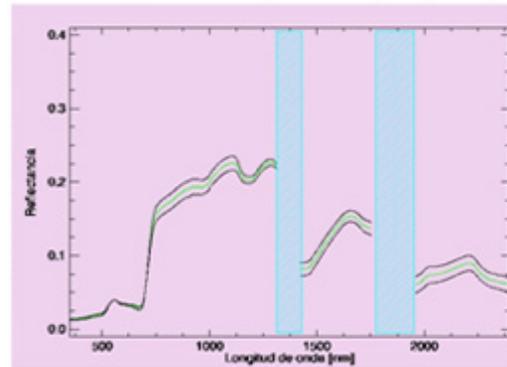


Figura 1. Adquisición de firmas espectrales mediante espectro-radiometría de campo, ejemplo de *Erica scoparia*. Ambas gráficas tienen la reflectancia media de cada época con la curva en verde, la curva en negro representa el intervalo de la desviación estándar debida a la variación del índice de área foliar (LAI por Leaf Area Index) presente en el ecosistema de las Arenas Estabilizadas de Doñana.

Para estimar la cobertura de las especies dominantes se ha aplicado el algoritmo de desmezcla espectral *Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis* (MESMA). Es una extensión del ALME que permite introducir variaciones de un mismo "componente puro". El índice de área foliar (LAI por *Leaf Area Index*) es uno de los factores más determinantes en la respuesta espectral del matorral y se introdujeron firmas espectrales de los rangos de LAI encontrados (**Fig. 1**). La comparación frente al recubrimiento de campo muestra una relación fuertemente positiva para *E. scoparia* en ambas fechas, el R^2 es de 0.852 en época seca ($p < 0.05$) y de 0.635 en la época lluviosa ($p < 0.05$). Para *H. halimifolium* y *R. officinalis*, la correlación es también muy positiva para la imagen de 2005 con un R^2 de 0.76 y 0.66 ($p < 0.05$), y de 0.5 y 0.43 ($p < 0.05$) para la imagen de 2008. En cambio, las especies *U. australis* y *S. genistoides* muestran un acuerdo muy pobre en ambas fechas, estando sus valores de R^2 por debajo de 0.3.

En Doñana las especies dominantes de matorral exhiben diferencias espectrales más significativas en la época seca (**Fig. 2**). En la época húmeda, la variabilidad intra-específica es mayor y el sustrato de las arenas está recubierto de líquenes y plantas anuales que dificultan la separación entre especies.

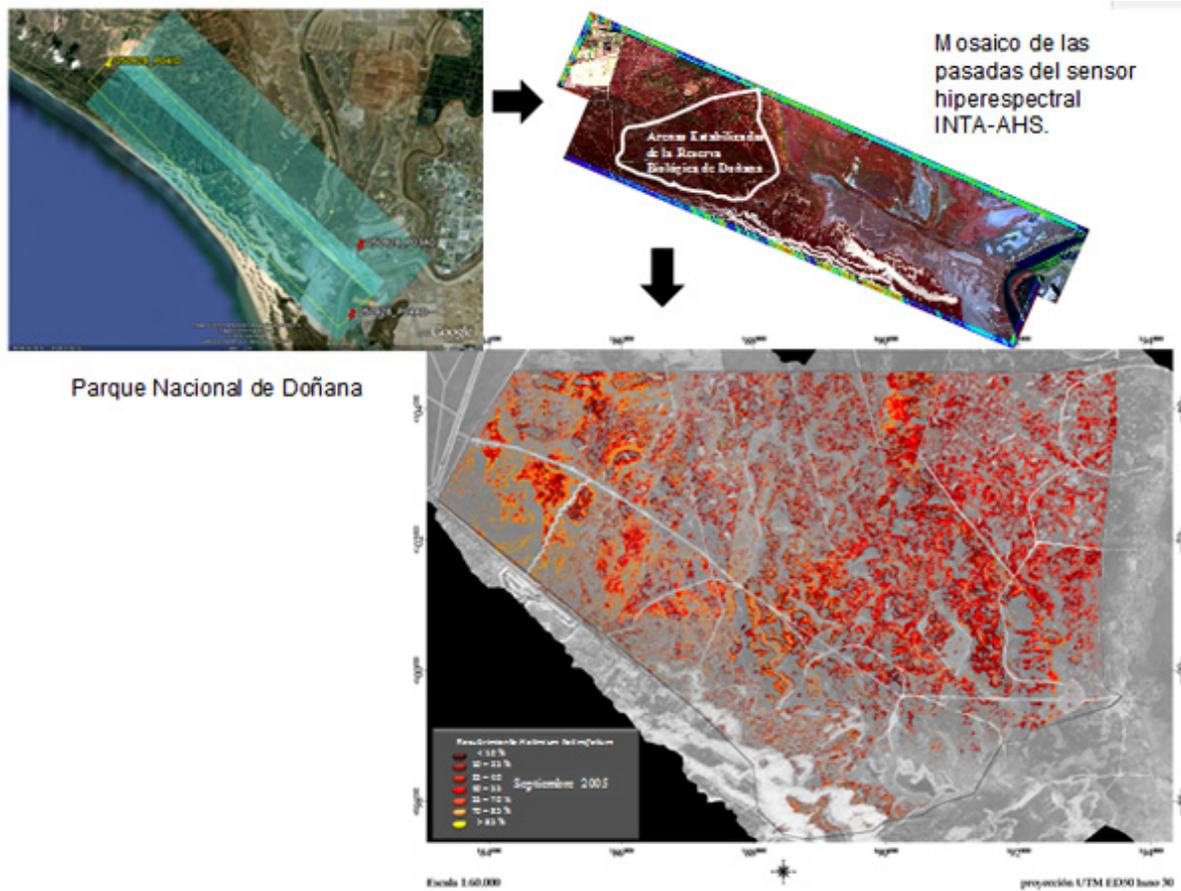


Figura 2. Cartografía de recubrimiento de *Halimium halimifolium* en el ecosistema de las Arenas estabilizadas generada a partir de dos pasadas adquiridas con el sistema hiperespectral aeroportado INTA-AHS el 28 de septiembre de 2005.

Estudio y seguimiento de la estructura y funcionamiento de las comunidades vegetales

En el ámbito de Doñana, el conocimiento de la ecología de las comunidades de matorral está bien determinado. Disponer de una cartografía explícita de la distribución espacial de las especies vegetales mejora el estudio y seguimiento de estas comunidades (Asner et al. 2005).

La extracción directa de multitud de “perfiles” y “sub-escenas” con la presencia y abundancia de cada especie frente a las alturas del modelo digital del terreno, permite profundizar en el estudio de las relaciones de esta distribución y los procesos ecológicos. En las *Arenas Estabilizadas* se observa la presencia de especies del matorral en sitios donde potencialmente no las situaría el modelo de distribución de Muñoz Reinoso (Muñoz Reinoso 2005). Se detectan zonas de laxitud en la composición de especies entre comunidades que los modelos de distribución no predicen.

Se generaron cartografías de tipos funcionales y servicios utilizando caracteres y tipos funcionales publicados (Díaz Barradas et al. 1999). El tipo más abundante y mayoritario es el que aglutina las especies semi-esclerófilas de mayor distribución como el jaguarzo y el romero. Ambas son especies que colonizan terreno de *Las Naves* y de *Manto Arrasado*.

A día de hoy, diferentes medidas de gestión sobre el territorio como: las repoblaciones de pino piñonero y eucaliptos, los desbroces llevados a cabo en el Plan del Manejo del Lince y las extracciones masivas del acuífero de Doñana, afectan a dichas formaciones originarias y al matorral actual. Se estima necesario realizar un seguimiento de sus poblaciones para la planificación de estrategias de conservación. Se ha definido un protocolo para el seguimiento de la distribución espacial de las especies dominantes del matorral de Doñana mediante el sistema INTA-AHS.

Agradecimientos

A Carmen Anton del IGME, a Javier Bustamante de la EBD-CSIC, a toda el Área de Teledetección del INTA, al grupo de seguimiento de la EBD, y al Laboratorio de Socio-Ecosistemas de la UAM.

Referencias

Asner, P.G., Elmore, A.J., Hughes, F., Warner, A., Vitousek, P.M. 2005. Ecosystem structure along bioclimatic gradients in Hawai'i from imaging spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* 96:497-508. Díaz Barradas, M.C., Zunzunegui, M., Tirado, R., Ain-Lhout, F., García Novo, F. 1999. Plant functional types and ecosystem function in Mediterranean scrub. *Journal of Vegetation Science* 10:709-716.

Fernández-Renau, A., Gómez, J.A., de Miguel, E. 2005. The INTA-AHS system. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites IX. *Proceedings of the SPIE*, Volumen 5978, pp. 471-478.

Nagendra, H, Rocchini, D., Ghatge, R., Sharma, B., Pareeth, S. 2010. Assessing plant diversity in a dry tropical forest: comparing the utility of Landsat and Ikonos satellite images. *Remote Sensing* 2:478-496.

Muñoz Reinoso, J.C., García Novo, F. 2005. Multiscale control of vegetation patterns: the case of Doñana (SW Spain). *Landscape Ecology* 20:51-61.

MARCOS JIMÉNEZ MICHAVILA

Cartografía de especies de matorral de la Reserva Biológica de Doñana mediante el sistema hiperespectral aeroportado INTA-AHS. Implicaciones en el estudio y seguimiento del matorral de Doñana

Tesis Doctoral

Área de Teledetección del INTA. Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid

Fecha: Julio 2011

Dirección: Antonio Pou (UAM), Ricardo Díaz-Delgado (EBD-CSIC)