



España

## ESTUDIO DE LOS HUMEDALES Y DE LOS USOS DEL SUELO EN LA COMARCA DE DOÑANA Y SU ENTORNO MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN





<b>INFORME</b>	<b>Identificación: TD-01-07</b>
	<b>Fecha: 13-08-07</b>
<b>TÍTULO:</b> Estudio de los humedales y de los usos del suelo en la comarca de Doñana y su entorno mediante técnicas de Teledetección	
<b>PROYECTO:</b> Estudio de los humedales y de los usos del suelo en la comarca de Doñana y su entorno mediante técnicas de Teledetección	
<b>RESUMEN (continuar al dorso en caso necesario):</b> <ul style="list-style-type: none"><li>- Cartografía de las fluctuaciones de la lámina de agua de las lagunas permanentes y temporales del Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana (MELAD) a partir de una serie temporal de imágenes Landsat registradas a lo largo de una secuencia de veinte años.</li><li>- Evaluación de la capacidad de datos hiperespectrales del sensor aeroportado AHS para determinar las oscilaciones máximas de los niveles de inundación de las formaciones palustres a lo largo del ciclo hidrológico 2004-2005. La espectralradiometría de campo y el tratamiento de las imágenes AHS han permitido caracterizar la vegetación higrofitica (monte negro) de la zona, cuya distribución es un buen indicador de la profundidad del nivel freático del acuífero de Doñana.</li><li>- Cartografía de las superficies de cultivo de regadío a partir de la utilización combinada de imágenes Landsat registradas en tres fechas del año 2004 para estimar las demandas de riego y los retornos al acuífero Almonte-Marismas.</li><li>- Incorporación de la información generada en un SIG y cruce de la misma con las cartografías de cambios de uso del suelo, datos pluviométricos y de niveles piezométricos con objeto de caracterizar las afecciones de los mismos.</li><li>- Implementación de una metodología de tratamiento de imágenes de teledetección para la cartografía y el seguimiento temporal de los humedales en Doñana y su entorno.</li><li>- Cálculo de la ETr correspondiente a julio de 2005 y generación de mapas continuos de ETr del sector Almonte- Marismas.</li></ul> <b>Palabras clave:</b> Teledetección, Doñana, acuífero Almonte-Marismas, humedales, evapotranspiración, usos del suelo, Imágenes Landsat, AHS, MODIS, METEOSAT	
<b>Revisión</b>	<b>Autores:</b>
<b>Nombre:</b> Carmen Antón-Pacheco	Maria Teresa Moreno Álvarez Juan Carlos Gumiel Gutiérrez Carmen Antón-Pacheco Carlos Mediavilla
<b>Unidad:</b> Dirección de Geología y Geofísica	<b>Responsable:</b> Carmen Antón-Pacheco
<b>Fecha:</b> 08/08/2007	



## RESUMEN (continuación):

### ABSTRACT

Multiple-date Landsat data and hyperspectral AHS data have been evaluated for identification and monitoring of wetlands in the Manto Eólico Litoral El Abalarío-Doñana (MEL) within the nature reserve of Doñana, a Ramsar wetland. The MEL, located in the eolic mantle of the Huelva coastal plain, 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 Doñana aquifer. Hyperspectral AHS data have allowed mapping surface water fluctuations corresponding to the hydrologic cycle 2004-2005. *In situ* spectral reflectance measurements have led to characterisation of hygrophytic shrub vegetation. Additionally, irrigated fields were determined to estimate return irrigation water fluxes into the Almonte\_Marismas aquifer.

**Key words:** Remote sensing, Doñana, Almonte-Marismas aquifer, wetlands, land use, Landsat, MODIS, METEOSAT, AHS

1	Introducción	3
1.2	Objetivos	6
2	Área de Estudio	8
2.1	Marco geológico	9
2.2	Marco ecológico	12
2.3	Climatología	17
2.4	Hidrología superficial	18
2.5	Vegetación	19
3	El Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana	21
3.1	El Complejo Palustre	24
3.2	Vegetación	30
4	Cartografía de Formaciones Palustres del MELAD	35
4.1	Descripción de la serie temporal de Imágenes Landsat	35
4.2	Corrección geométrica y radiométrica de Imágenes Landsat	39
4.3	Análisis e interpretación de imágenes Landsat	39
4.4	Cartografía de las formaciones palustres	53
4.5	Características del Sensor Hiperespectral AHS	55
4.6	Campañas de Vuelos AHS	58
4.7	Procesado de los datos AHS	59
4.7.1	Calibración a radiancia en el sensor	60
4.7.2	Calibración a reflectividad	60
4.7.3	Georreferenciación y generación de mosaicos	62
4.8	Espectrorradiometría de campo	63
4.9	Cartografía de las formaciones palustres a partir de datos AHS	65
4.10	Estudio piezométrico del sector de Santa Olalla	68
4.10.1	Análisis detallado de los niveles piezométricos	73
5	Dinámica de cambios de las formaciones palustres durante 1985–2005	76

6	Cartografía de Usos del Suelo en el sector Almonte-Marismas	107
6.1	Cartografía de superficies de regadío en 2004	
6.1.1	Cálculo de superficies de regadío mediante estimación directa	111
6.1.2	Cálculo de superficies de regadío mediante clasificación de imágenes	115
6.1.3	Resultados del cálculo de superficies mediante regresión simple	115
6.1.4	Superficies de cultivos por celdas en el dominio del modelo de flujo	116
6.2	Cartografía de superficies agrícolas entre 1985 y 2005	118
6.3	Cartografía de superficies forestales	122
6.4	Cambios en las superficies agrícolas y forestales en el ámbito del acuífero Almonte-Marismas entre 1985 y 2005	125
6.4.1	Cambios en las superficies agrícolas	126
6.7.1	Cambios en las superficies forestales	1259
7	Cartografía de la Vegetación Higrofitica	129
7.1	Cartografía de la vegetación higrofitica a partir de la imagen Landsat	129
7.2	Cartografía de la vegetación higrofitica a partir de las imágenes AHS	131
8	Estimación de la Evapotranspiración	137
8.1	Introducción	137
8.2	Materiales utilizados	138
8.3	Metodología	140
8.4	Resultados y Discusión	144
9	Estructura de la Base de Datos	147
10	Resultados	148
12	Agradecimientos	150
13	Referencias	150

# 1 Introducción

El presente estudio ha sido realizado por el Servicio de Teledetección de la Dirección de Geología y Geofísica. Supone en cierto modo la continuación de los trabajos que se desarrollaron en un estudio previo en el contexto del convenio IGME-CMAJA *Estudio del Impacto de la Sequía en los Acuíferos de Andalucía* (IGME, 2002). Los resultados obtenidos a partir del análisis de 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 (Moreno, *et al.*, 2004), permitieron plantear un estudio más amplio con objeto de aplicar diversas técnicas de teledetección en Doñana y su entorno.

Las imágenes multiespectrales que se registran desde satélite proporcionan una información de primer orden para el estudio de los procesos dinámicos y de las características del estado del agua, de la vegetación y de los suelos de la superficie terrestre. Los datos registrados por los sensores hiperespectrales suministran una información más detallada para el reconocimiento de rasgos espectrales diagnósticos críticos en la identificación de las distintas cubiertas superficiales. El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) adquirió en 2003 un sensor aeroportado de estas características, el Airborne Hyperspectra Scanner (AHS). Un convenio de colaboración con el INTA ha permitido adquirir este tipo de información y evaluar su utilidad en el área de Doñana.

En la consecución de los diferentes apartados de este proyecto han colaborado diversos técnicos e investigadores. Cabe destacar el soporte logístico prestado por el personal de la oficina de proyectos del IGME en Sevilla, y la participación de Carlos Mediavilla y Ana Rebollo en la realización del estudio piezométrico del sector de Santa Olalla; José Antonio Gómez, Marcos Jiménez, Elena Prado, Juan Gregorio Rejas y Óscar Gutiérrez, del Laboratorio de Teledetección del INTA, han participado en el trabajo de planificación y realización de los vuelos AHS, así como en el calibrado de los datos y la campaña de espectroradiometría de campo de septiembre de 2004. Antonio Ruiz-Verdú y José Antonio Domínguez del Laboratorio de Teledetección del CEDEX han llevado a cabo el registro de la radiometría de campo de abril de 2004 y septiembre de 2005. Sara Soto, durante una beca de formación en el IGME, ha realizado el estudio de la evapotranspiración utilizando las imágenes y medios proporcionados por el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV).

Los humedales constituyen uno de los ecosistemas más productivos y de mayor valor ecológico del planeta por la gran biodiversidad que albergan. Tradicionalmente han sido considerados como zonas insalubres e improductivas, con gran potencialidad para el cultivo, y en ocasiones localizados en áreas de gran interés paisajístico, lo que ha ocasionado su desarrollo agrícola o turístico. La rápida regresión que durante el siglo pasado han sufrido los humedales de todo el mundo, en extensión y calidad ambiental, ha ocurrido también en España. El Inventario de Humedales, realizado en 1991 por la Dirección General de Obras Hidráulicas del Ministerio de Obras Públicas y Transportes (tabla 1), indica que el 60% de los humedales españoles ha desaparecido entre 1950 y 1990.

Tipo de humedal	Superficie original (ha)	Superficie actual (ha)	% Superficie actual/original
Interiores	40600	16421	40,4
De montaña	2389	2314	96,9
Kársticos	874	784	89,7
Interiores dulces	14802	4805	32,4
Interiores salino	6743	5212	77,2
Llanuras de inundación	15867	3234	20,3
Costeros	239628	97679	40,6
<b>Total</b>	<b>280228</b>	<b>114100</b>	<b>40,7</b>

Tabla1. Evolución de la superficie de humedales y lagos españoles incluidos en el Inventario de la DGOH (1991). En García Novo F. y Marín Cabrera C. (2005)

Los sistemas acuáticos de la comarca de Doñana representan uno de los enclaves húmedos con mayor valor ecológico de Europa. Aunque la marisma depende fundamentalmente de las aportaciones del sistema hidrológico superficial, otros importantes ecosistemas de Doñana, como las lagunas permanentes y temporales, las zonas húmedas del contacto de las arenas y la marisma (ecotono) y algunos márgenes de arroyos dependen en gran medida de los aportes de agua subterránea.

La Reserva Biológica de Doñana se fundó en las fincas adquiridas por la World Wildlife Foundation (WWF) en 1964 y fue declarada Parque Nacional en 1969. Es Reserva de la Biosfera (1980), se incluye en la lista de Zonas Húmedas de Importancia Internacional como hábitat de aves acuáticas adscritas al Convenio de Ramsar (1982), forma parte de la Red Natura como Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) (1988), y Patrimonio de la Humanidad (1994). Tras la sentencia del Tribunal Constitucional en 2004, la gestión de los Parques Nacionales pasó a ser competencia autonómica. En la actualidad, según acuerdo del Comité Andaluz de Reservas de la Biosfera, la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (CMA JA) ha propuesto la

ampliación de Reserva de la Biosfera de Doñana a todo el entorno del Parque Natural. Así mismo, la CMA JA ha iniciado los trámites para solicitar la implantación del programa MAB (Hombre y Biosfera) de la UNESCO en la zona que corresponde al Parque Natural, coincidiendo con la gestión única que ejerce la Consejería en todo el territorio a partir del traspaso de las competencias del Parque Nacional de Doñana.

Numerosos proyectos de investigación han abordado el estudio de las zonas húmedas de Doñana desde distintas perspectivas con objeto de mejorar el conocimiento de los factores hidrogeológicos, geomorfológicos y ecológicos, que condicionan el funcionamiento del sistema acuífero Almonte-Marismas. Entre ellos caben destacar los estudios realizados por Montes *et al.*, (1998), Manzano *et al.*, (2002), García Novo y Marín Cabrera (2005), Custodio *et al.*, (1995, 2006), Fernández & Borja (2006). Desde la década de los años ochenta del pasado siglo, a partir de la disponibilidad de imágenes de la serie Landsat, se han realizado diversos estudios de la inundación de la marisma (Tenajas, J.L. y Llamas, R., 1986.; Menanteau, L., 1997.; Aragonés, D. *et al.*, 2005) y de la ocupación del suelo en el sector Almonte-Marismas (Moreira, J.M. *et al.*, 1989; Siljeström, P. *et al.*, 1989; González, A. *et al.*, 1991; Cuevas, J.M. y González Alonso, F., 1992, Moreira, J.M. y Ojeda, J., 1992).

En los últimos años el IGME ha realizado y participado en diversos proyectos en Doñana. Entre ellos cabe mencionar: *Desarrollo y aplicación de métodos para el seguimiento del impacto sobre las aguas subterráneas del vertido de lodos mineros: caso Aznalcóllar (2000-2001)*, *Salinización asociada a la precipitación y a las aguas subterráneas en distintas áreas del territorio español continental a insular (Área de Doñana) (2000-2002)*, *Impacto de la sequía en los acuíferos de Andalucía (acuífero Almonte-Marismas, entorno de Doñana) (2001-2002)*, *BaSeLiNe: niveles de referencia de calidad natural de las aguas en los acuíferos europeos (Área de Doñana) (2001-2003)*, *Revisión de la información geofísica existente en el acuífero Almonte-Marismas (Doñana) (2002-2004)*, *Comportamiento hidrogeoquímico de los acuíferos de la zona de la marisma de Doñana (2002-2005)*, *Evolución histórica de la sedimentación en las marismas de la Bahía de Cádiz y Bajo Guadalquivir (2003)*, *Modelación estratigráfica y sedimentológica de los depósitos plio-cuaternarios del área de Doñana y su entorno (Bajo Guadalquivir) (2004-2007)*, *Mejora del modelo matemático del acuífero Almonte-Marismas como apoyo a la gestión de los recursos hídricos (2005-08)*.

La coordinación de los trabajos científicos y técnicos en Doñana es fundamental para una buena gestión integral de los recursos hídricos. La rotura de la balsa de lodos de las Minas de Aznalcóllar, en abril de 1998, y la posterior respuesta de la Administración Central (*Proyecto Doñana 2005*) y Autonómica (*Proyecto del Corredor Verde*), ha



puesto de manifiesto la necesidad de abordar la gestión de este tipo de espacios naturales desde un ámbito multidisciplinar del conocimiento de las Ciencias de la Tierra.

### **1.1 Objetivos**

Durante los últimos cincuenta años, el área de Doñana y su entorno han sido sometidos a una profunda modificación con la introducción de bosques de pino y eucalipto, así como de arrozales y cultivos de regadío. Los cambios producidos a causa de la transformación de ciertos sectores de la marisma, de las extracciones de aguas subterráneas para riegos de uso agrícola realizados en su entorno y el desarrollo de áreas urbanas próximas han provocado problemas zonales en el nivel freático del sistema acuífero Almonte-Marismas que sustenta en gran medida los humedales de Doñana. El análisis de los cambios en las cubiertas y usos del suelo proporcionan una información fundamental en los estudios de gestión y planificación territorial y de impacto ambiental. La cartografía de los cambios de usos que se han producido en la comarca de Doñana es una información de gran interés para evaluar la incidencia de las extracciones en los sistemas lagunares, en los márgenes de arroyo y en las zonas húmedas del ecotono.

Las imágenes obtenidas por los satélites de recursos naturales aportan una información multispectral, multitemporal y digital muy útil en la realización de estudios geológicos, hidrogeológicos y geoambientales. La periodicidad en el registro de la información que proporcionan estos satélites, posibilita el estudio y cartografía de las variaciones temporales de los cuerpos de agua y de la vegetación higrofitica asociada a lo largo de una secuencia prolongada de condiciones hidrológicas diferentes. La identificación de los cambios de uso del suelo por teledetección es una técnica fiable y precisa que permite cuantificar las modificaciones del medio natural desde una perspectiva temporal. La comparación de clasificaciones de diferentes fechas y el análisis simultáneo de datos multitemporales son técnicas que permiten establecer dichos cambios. El análisis de esta información mediante un sistema de información geográfico facilita el análisis de los datos de teledetección y su integración con otro tipo de información referenciada.

Los objetivos de este estudio se enmarcan en la búsqueda de indicadores que relacionen las manifestaciones de sequía en las zonas húmedas con la evolución de los niveles freáticos del acuífero, las precipitaciones y los usos de las aguas subterráneas. Una de las herramientas disponibles en la actualidad para realizar la cartografía y el estudio de la evolución temporal de los humedales es el tratamiento y

análisis de imágenes de satélite y de sensores aeroportados. La utilidad de las imágenes Landsat y de las registradas por un sistema aeroportado para el estudio de las fluctuaciones de la superficie de la lámina de agua de las lagunas peridunares del sistema de Santa Olalla en el Parque Nacional de Doñana, se puso de manifiesto en el estudio ya citado (Moreno, M.T. *et al.* (op. cit.)).

El objetivo general del proyecto ha sido el análisis de imágenes multispectrales de satélite e hiperespectrales de sensores aeroportados para realizar la cartografía y estudiar la evolución temporal de las formaciones palustres del Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana (MELAD) (Borja, F. y Díaz del Olmo, F., 1996), así como de las zonas de encharcamiento y zonas húmedas del contacto entre las arenas y la marisma (ecotono) durante el periodo 1985-2005. Asimismo, se ha contemplado la elaboración de la cartografía actualizada de las superficies agrícolas y forestales con el fin de optimizar la cuantificación de las estimaciones de la demanda de agua en usos agrícolas y los retornos de riego al acuífero Almonte-Marismas, cuyo modelo matemático de balance hídrico está actualmente en revisión por la Dirección de Aguas Subterráneas del IGME. Por último, se ha aplicado un método para calcular la evapotranspiración a partir de la utilización combinada de imágenes de satélite y datos meteorológicos

Para la consecución de estos objetivos se han establecido las siguientes fases:

- Selección de imágenes Landsat que cubran en la medida de lo posible las fases interanuales de máxima inundación y estiaje correspondientes a ciclos hidrológicos secos y húmedos ocurridos entre los años 1985-2005. Aplicación y evaluación de diversos algoritmos de tratamiento de las imágenes para la discriminación de superficies de agua, zonas encharcadas y vegetación higrofítica en los mantos arenosos de Doñana y su entorno.
- Adquisición y análisis de datos aeroportados de alta resolución espectral AHS de tipo experimental. Esta información se ha registrado durante tres campañas de vuelos efectuadas en las fases de máxima variación interanual correspondientes a un ciclo hidrológico húmedo. A partir de estos datos se ha tratado de caracterizar el estado y evolución de las lagunas y zonas húmedas, así como el comportamiento espectral de la vegetación natural de los mantos eólicos.
- Cálculo de la superficie de los cultivos de regadío con el fin de obtener las demandas y volúmenes de riego durante el año 2004, y los retornos al acuífero.

En una segunda fase, se ha realizado la cartografía de las superficies agrícolas y forestales durante distintas fechas entre 1985-2005 para identificar los cambios producidos por el uso agrícola y las repoblaciones de pinos y eucaliptos en ese periodo.

- Selección y análisis de imágenes MODIS y METEOSAT, y datos climatológicos de estaciones meteorológicas para el cálculo de la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) según el método de Allen, R. G. *et al.*, 1998, adaptado por el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV).

## 2 Área de Estudio

La comarca de Doñana se localiza en el suroeste de Andalucía, en la cuenca baja del río Guadalquivir, incluyendo los terrenos marismenos y las arenas que los circundan (figura 1). El Parque Nacional de Doñana y el Parque Natural de su entorno confieren a esta área una especial relevancia ecológica, ya que constituyen uno de los enclaves húmedos de mayor importancia a nivel nacional e internacional. Comprende extensos humedales como la marisma del Guadalquivir y un importante conjunto de formaciones palustres localizadas en los mantos arenosos. Su situación geográfica, en la confluencia entre las regiones mediterránea y atlántica, hace de Doñana el eslabón europeo en las rutas migratorias Europa-África.

Aunque la marisma se nutre fundamentalmente de agua superficial, el agua subterránea es vital en el mantenimiento de estos humedales, especialmente durante el estiaje. El sistema acuífero Almonte-Marismas, conocido tradicionalmente como acuífero de Doñana o sistema acuífero 27, según la antigua nomenclatura del IGME (1983), se denomina actualmente 05-51 por la parte mayoritaria que corresponde a la Unidad Hidrogeológica de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG). Está limitado al oeste por el río Tinto, al norte por los materiales impermeables de margas azules del Mioceno superior que afloran a lo largo de la autovía Sevilla-Huelva, al sur por el Océano Atlántico y al este por el río Guadalquivir.

La agricultura es la actividad económica más importante de esta comarca seguida por el turismo de las poblaciones costeras y de los Parques. Las poblaciones principales son Almonte y sus pedanías (Matalascañas y El Rocío), Villamanrique de la Condesa, Hinojos, Moguer, Mazagón, Palos, Lucena, Rociana, Pilas, Bollullos Par del Condado y Aznalcázar.

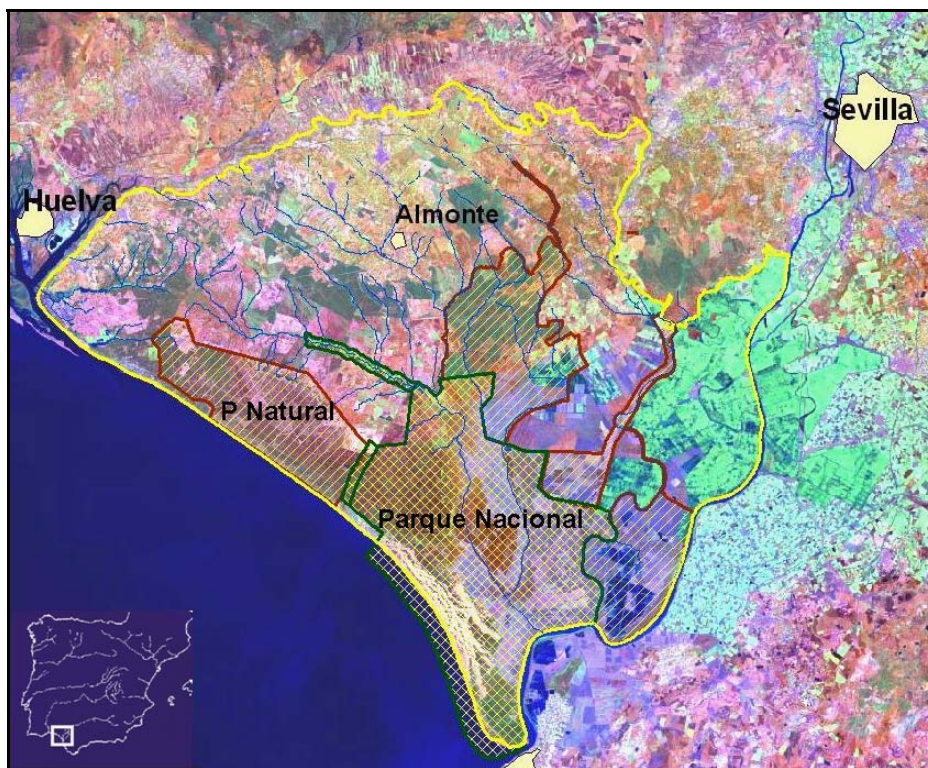


Figura 1. Situación geográfica del acuífero Almonte-Marismas

## 2.1 Marco geológico

La cuenca del Guadalquivir es una depresión alargada en dirección NE-SW que constituye, en un marco geológico a escala regional, la última expresión de una cuenca tipo antepaís entre los dominios norte “pasivo” y sur “activo”, éste último relacionado con la orogenia Bética. Esta cuenca Miocena está rellena por sedimentos depositados desde el Tortonense, en el extremo oriental de la cuenca, hasta la actualidad, ya que la sedimentación continúa actualmente en el Golfo de Cádiz. La mayoría de estos depósitos corresponden a sedimentos autóctonos del Mioceno superior (margas azules) y Plio-Cuaternario, así como a los materiales alóctonos (olistostroma del Guadalquivir), desprendidos hacia el norte y centro de la cuenca a partir del apilamiento tectónico del borde sur orogénico activo.

El relleno sedimentario de la cuenca se ha descrito en varios trabajos de Martínez del Olmo, W. *et al.*, 1984; Suárez, J. *et al.*, 1989; Riaza, C. y Martínez del Olmo, W., 1996 y Sierro, F.J. *et al.*, 1990, 1993, 1996, 2000 y 2001, distinguiendo diferentes secuencias estratigráficas a partir de los trabajos de sísmica y sondeos realizados para la investigación de hidrocarburos.

En el Bajo Guadalquivir los primeros estudios realizados a nivel regional para el reconocimiento del modelo geológico se basaron en los antiguos sondeos profundos de prospección de hidrocarburos (Perconig, E. (1960 y 1962) y Viguiet, C., 1974). En el entorno de Doñana esta información básica se pudo complementar con el desarrollo del Proyecto hidrogeológico FAO-Guadalquivir, iniciado en el año 1965, así como con los posteriores trabajos realizados durante la ejecución de los 500 sondeos de explotación contemplados en el Proyecto Plan Transformación de la Zona Regable Almonte-Marismas, desarrollado en la década de los 70s por el Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA) con la colaboración del IGME. Como resultado de esos trabajos de investigación se estableció un primer esquema geológico del subsuelo, con una concepción eminentemente hidrogeológica (FAO, 1975), donde ya se puso de manifiesto la complejidad litoestratigráfica de la zona, sobre todo en el sector marisma.

El acuífero Almonte-Marismas está constituido por una alternancia de arenas, arenas limosas y gravas con intercalaciones de limos y arcillas. Se trata de sedimentos detríticos de origen deltaico, aluvial, marino-costero y estuarino depositados durante el Plio-Cuaternario. Estos materiales descansan sobre la formación “margas azules” del Guadalquivir, que se establece como un substrato regional de muy baja permeabilidad. En conjunto los materiales acuíferos tienen un espesor variable entre unos pocos metros, al norte en el área de cabecera, y más de 300 m en el sector costero suroriental.

Los materiales que forman el sistema acuífero Almonte-Marismas ocupan una extensión de 3400 km<sup>2</sup>, de los que 1800 km<sup>2</sup> están confinados bajo los sedimentos recientes de las arcillas de marisma (acuífero en carga) y el resto constituyen el área de recarga del acuífero libre. La figura 2 muestra las respectivas superficies de afloramiento como síntesis de la cartografía MAGNA (IGME, 1974, 1980, 1983 y 1992).

Las principales características estratigráficas y sedimentológicas de los materiales que afloran son las siguientes:

- Margas azules (Tortonense-Plioceno inferior). Esta formación aflora en todo el borde septentrional del acuífero y constituye su substrato impermeable con un leve buzamiento hacia el sur. Está constituida por margas con estratificación masiva que hacia el techo pasan gradualmente a limos y arenas.
  
- Limos basales (Plioceno medio). Constituye un tramo poco homogéneo con alternancia de limos, limos arenosos y arcillas con frecuentes cambios laterales de

facies. Localmente y en profundidad predominan los tramos areniscos y lumaquéllicos.

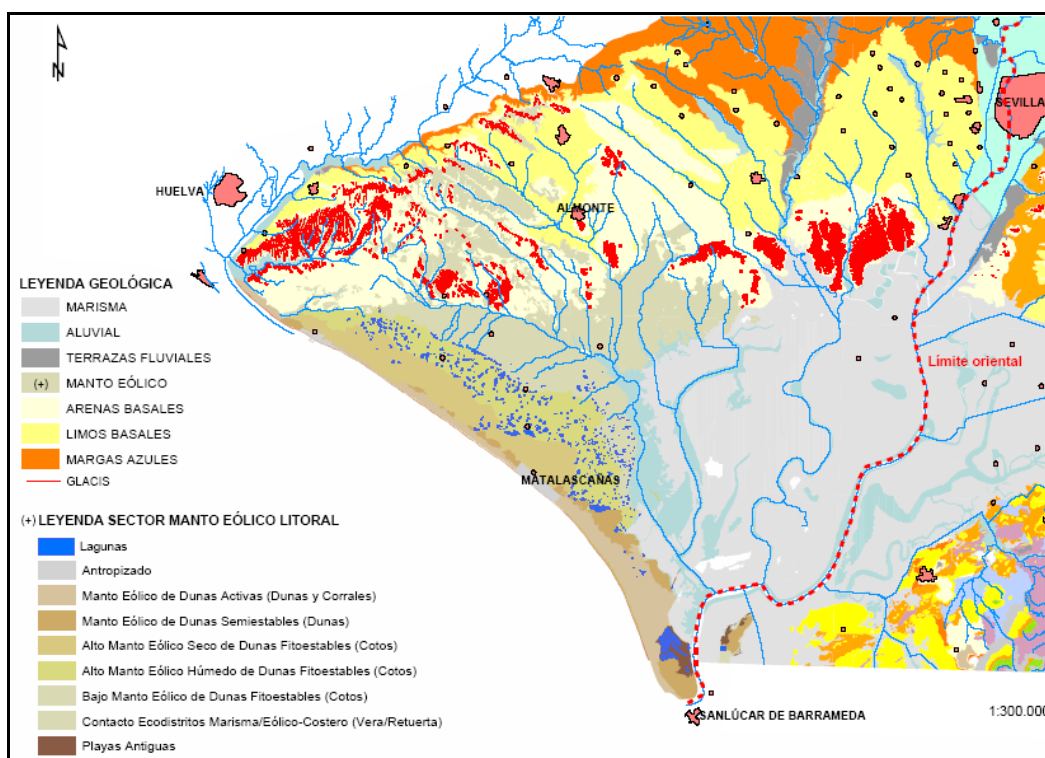


Figura 2. Mapa geológico del entorno de Doñana [modificado de serie MAGNA (1974-1980) y mapa del Complejo Palustre de los Arenales Litorales de Doñana de Ruiz-Labourdette, D. *et al* (CMA-JA)]

- Arenas basales (Pleistoceno). Este tramo está formado fundamentalmente por arenas blanco-amarillentas a rojizas y limos. Constituye el acuífero principal por sus características hidrogeológicas y su gran extensión.
- Marismas (Holoceno-actual). Resultado del cierre de la barra costera y colmatación sedimentaria del antiguo estuario. En superficie se identifica como una amplia extensión inundable de arcillas bajo las que subyacen sedimentos groseros (gravas y cantos rodados) de origen fluvio-marino, con una cierta continuidad lateral.
- Manto eólico (Holoceno-actual). Está formada por arenas eólicas que constituyen el Manto Eólico Litoral de El Abalarío–Doñana (MELAD), dentro del Ecosistema Litoral de Doñana (Montes, C. *et al.*, op. cit.), donde se diferencian hasta cinco mantos eólicos, en función de su geomorfología y comportamiento hidrodinámico, entre los que destaca el Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables, en el que se localiza el núcleo principal del Complejo Palustre de Doñana.

Posteriores trabajos de Salvany, J.M. y Custodio, E. (1995), realizados a partir de la correlación litológica en profundidad de las muestras del detritus de varios sondeos hidrogeológicos, han permitido diferenciar cuatro unidades litológicas en los materiales pliocuaternarios. De muro a techo: Unidad Deltaica (Plio-Pleistoceno), Unidad Eólica (Pleistoceno superior-Holoceno), Unidad Aluvial (Pleistoceno superior) y Unidad Marismas (Pleistoceno superior-Holoceno). Este modelo litoestratigráfico se encuentra actualmente en revisión por parte del equipo IGME-UPC.

En los últimos años se están realizando nuevos trabajos de investigación en el ámbito geológico (Zazo, C. *et al.* 1985, 1994, 1999) para identificar las variaciones paleoclimáticas y establecer los límites de las subdivisiones del Cuaternario, mediante la aplicación de estudios paleontológicos, sedimentológicos, paleomagnéticos, geoquímicos (isótopos estables), palinológicos, geomorfológicos, paleosuelos, dataciones isotópicas, etc.

Sin embargo, la historia geológica del relleno Plio-Cuaternario en el área de Doñana sigue estando poco conocida por varios motivos, entre otros: 1) por la escasez de estudios bio y cronoestratigráficos en sedimentos profundos, 2) por la posición de estos materiales (primeros 300 m) dentro de la “unidad sísmica transparente” en la investigación petrolera (Civis, J. *et al.*, 2004), 3) por el coste económico y dificultad técnica que conlleva la realización de nuevos sondeos profundos con recuperación de testigo continuo, 4) por la contrariedad que representa la obtención de permisos de perforación en parajes con figuras de protección ambiental, y 5) por la dificultad que supone el elaborar un modelo geológico de facies sedimentarias y cronoestratigrafía, suficientemente contrastado por equipos multidisciplinares.

Actualmente el IGME está realizando en el ámbito de Doñana, como apoyo al modelo hidrogeológico conceptual del acuífero Almonte-Marismas, una serie de nuevos sondeos profundos de investigación geológica (200-300 m/c.u.) con recuperación de testigo continuo, con el objetivo de elaborar un modelo de distribución de facies sedimentarias de los depósitos Plio-Cuaternarios que conforman el sistema de acuíferos de Doñana.

## **2.2 Marco ecológico**

En Doñana se diferencian tres unidades ambientales: el Sistema Eólico, la Marisma y La Vera. El Sistema Eólico y la Marisma se definen por su origen geomorfológico, hidrológico y la naturaleza del sustrato, mientras que La Vera-Retuerta es la zona de

contacto entre estas dos unidades. Cada unidad alberga elementos y especies animales y vegetales propios de gran interés.

La Marisma (figura 3) es la unidad de mayor extensión y con una dinámica más importante. Esta llanura de inundación de naturaleza arcillosa aparece en invierno cubierta de agua y en verano muestra la arcilla endurecida y resquebrajada. Es un ecosistema con una alta productividad y biodiversidad, que constituye la zona de paso, cría e invernada para las aves europeas y africanas. En la Marisma se pueden distinguir pequeñas variaciones del relieve que influyen en la hidrología del sistema y en la disposición de la vegetación. Así, los macrófitos acuáticos se instalan en las zonas donde la inundación es más prolongada, como es el caso de los lucios, que son superficies de menor cota. Los helófitos se establecen principalmente en los caños y quebradas, que son cauces con circulación predominante de agua superficial. Las zonas más elevadas de la llanura aluvial corresponden a los paciles y vetas; es aquí donde se desarrolla la vegetación que no resiste la inundación o que la soporta durante periodos muy cortos (quenopodiáceas halófitas y gramíneas).

El Sistema Eólico corresponde a los territorios de sustrato arenoso. La disponibilidad de agua es el factor fundamental entorno al que se organizan los elementos bióticos y abióticos en esta unidad. Las características intrínsecas al sustrato, así como las pendientes, en general suaves, condicionan en los arenales una elevada capacidad para filtrar agua de lluvia sin producir escorrentía. Las aportaciones de agua superficial y especialmente las de carácter subterráneo determinan el asentamiento de las distintas especies vegetales.



Figura 3. La Marisma desde la torre de observación del Palacio de Doñana



En el Sistema Eólico se distinguen los siguientes sub-sistemas: manto eólico estabilizado, sistema de dunas móviles y flecha litoral. Las arenas estabilizadas se caracterizan por un mosaico de distintos tipos de vegetación de matorral y arbolado (monte negro, monte blanco, alcornoques, sabinas y pinares), cuya distribución depende fundamentalmente de la profundidad del nivel freático del acuífero. El paisaje predominante en muchas zonas es el de los pinares de piñonero (figura 4), que se introdujeron en las repoblaciones que comenzaron en el siglo XVIII. Especies como el alcornoque, el acebuche, la sabina y el enebro eran las especies principales de los bosques originales. Su extensión se redujo notablemente debido a diferentes aprovechamientos forestales y tratamientos selvícolas, entre los que destacan las repoblaciones con coníferas. En las zonas más altas y secas se localizan formaciones de sabinas, mientras que el alcornoque y el acebuche aparecen en puntos con mayor disponibilidad hídrica. El matorral ocupa una gran extensión en el manto eólico estabilizado. En las zonas intermedias y altas se desarrolla el denominado “monte blanco”, mientras que en las más bajas y húmedas aparece el “monte negro”.

En el Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables es donde se localiza el núcleo principal del complejo palustre. A este rosario de formaciones palustres hipogénicas o alimentadas por aguas subsuperficiales y de carácter temporal o permanente está asociado un tipo de vegetación con requerimientos hídricos mayores (higrofitica). En el manto eólico estabilizado se observan también restos de las plantaciones de eucaliptos realizadas durante la segunda mitad del siglo XX. Se han llevado a cabo talas, principalmente durante la última década, que han eliminado la mayor parte de estas masas en el manto estabilizado; en la actualidad sólo quedan pequeñas superficies por tratar.



Figura 4. Manto eólico estabilizado (El Abalarío - Parque Natural de Doñana)

El sistema de dunas móviles (figura 5) de Doñana es uno de los más extensos a nivel europeo. Está formado por cuatro trenes de dunas principales, que avanzan desde el mar hacia el interior. La vegetación original de la zona son los enebrales costeros. Su extensión se redujo debido a los aprovechamientos forestales con fines madereros y a las repoblaciones con pino piñonero.



Figura 5. Sistema de dunas móviles y corrales

En los valles interdunares, conocidos como corrales (figura 6), se localizan pinares de piñonero aprovechando la humedad edáfica más elevada. La disponibilidad de agua en estas depresiones interdunares permite también la presencia de formaciones matorrales y juncuales.



Figura 6. Zonas de encharcamiento en un corral

La flecha litoral (figura 7) se localiza al sureste del sistema de dunas móviles. Predominan los terrenos arenosos, aunque se localizan zonas de naturaleza arcillosa, como es el caso de los llanos (cubiertos de pastizales) o los navazos (en donde se desarrollan plantas higrofitas). El paisaje actual es el de pinares de piñonero, enebrales y masas mixtas de ambas especies. La mayor parte del sur del Sistema Eólico corresponde a masas de pinar, aunque existen también zonas dominadas por formaciones de enebral costero. Esta especie junto con la sabina, el lentisco y el taraje corresponde a la formación vegetal dominante anterior a las actuaciones forestales de principios del siglo XVIII.



Figura 7. Flecha litoral

La Vera-Retuerta (figura 8) corresponde a las zonas de contacto y transición entre la Marisma y las arenas estabilizadas de los Mantos Eólicos Fitoestables y las arenas de las dunas de los Mantos Eólicos litorales. Se caracteriza por su alta productividad debido principalmente a la descarga de las aguas subterráneas, que se produce a lo largo del contacto. La vegetación que se desarrolla en esta franja es muy cambiante, debido a que soporta niveles de inundación muy diferentes a lo largo de un año.



Figura 8. La Vera - Retuerta

### **2.3 Climatología**

El clima es de tipo mediterráneo subhúmedo con influencia atlántica e inviernos suaves. Se caracteriza por la variabilidad interanual de las precipitaciones, con una pluviometría anual media que oscila entre 500 y 600 mm, que puede 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 la que la mayor parte de la marisma se seca y la superficie inundada se reduce a la lámina de agua de algunas de las lagunas naturales y a la de las alimentadas artificialmente.

La influencia del Atlántico produce una suavización de las temperaturas de esta región. La temperatura media anual es elevada, oscilando entre 18°C y 19°C. Las temperaturas máximas se registran durante julio y agosto, llegando a alcanzarse los 42°C. Las heladas no son frecuentes y la media de las mínimas durante los meses de diciembre y enero se acerca a 7°C. El número de horas de insolación es elevado, de aproximadamente 3.000 horas/año. Los vientos predominantes son del sureste y oeste, con velocidades medias de 2 m/s. La evapotranspiración de referencia media anual acumulada es del orden de 1.300 mm.

En el estudio relativo a la serie temporal de imágenes Landsat para cartografiar las formaciones palustres del MELAD, se han tomado los datos de la estación meteorológica Palacio de Doñana suministrados por la Estación Biológica de Doñana (CSIC), que dispone de observaciones desde noviembre de 1978 hasta la actualidad

(EM05) (Reserva Biológica de Doñana, 2006). Los datos que se han estudiado son los correspondientes a temperaturas y precipitaciones. En el estudio para el cálculo de la evapotranspiración, se han utilizado los datos climatológicos de 32 estaciones meteorológicas situadas en el área correspondiente al acuífero Almonte-Marismas.

## **2.4 Hidrología superficial**

Los arroyos presentan una gran variedad de caudales debido a la estacionalidad de las precipitaciones y pueden pasar en tiempos relativamente cortos, de varios m<sup>3</sup> por segundo a unas decenas de litros por segundo, o incluso caudales nulos. La fuente casi exclusiva de recarga natural del acuífero es la debida a la infiltración de agua de lluvia local en la zona de acuífero libre, donde afloran las arenas y limos arenosos. Esta recarga sólo es incrementada en pequeña cantidad por retornos de riego en los terrenos irrigados con la propia agua subterránea, por infiltración de aguas usadas (que son también aguas subterráneas de origen local) y por pequeños aportes del río Guadiamar en su tramo inferior antes de entrar en la marisma, donde la existencia actual de extracciones de agua subterránea favorece su recarga (Custodio, E. op.cit.).

La descarga natural del acuífero se efectúa de varias formas:

- por drenaje difuso hacia el mar, a lo largo de toda la franja costera,
- hacia ríos y arroyos principales: río Tinto y arroyo de La Rocina,
- a lo largo de los ecotonos o zonas de contacto entre las arenas y las arcillas de la Marisma,
- por evaporación directa desde el nivel freático cuando está próximo a la superficie,
- por evapotranspiración de la vegetación de tipo freatófilo (monte negro y bosques en galería) así como de las plantaciones de eucaliptos.
- mediante descarga a las lagunas temporales y permanentes (sistema de Santa Olalla), localizadas en el Manto Eólico Litoral,
- una pequeña parte del flujo de agua subterránea se dirige hacia el acuífero confinado; en esta zona, mediante flujos ascendentes lentos, a través de las arcillas, llega a la superficie de la Marisma, formando pequeñas depresiones circulares llamadas "ojos" que suelen mantener una lámina de agua durante gran parte del año.

Las conexiones existentes entre las aguas superficiales y subterráneas permiten mantener las zonas encharcadas durante el estiaje, manteniendo habitats húmedos permanentes para refugio de la fauna y sustentando la vegetación higrofítica. El

acuífero Almonte-Marismas sustenta gran parte de los humedales de esta región (Bravo, M. A. y Montes, C., 1993), que se localizan en pequeñas depresiones del terreno cuando éstas interceptan 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-Retuerta.

## **2.5 Vegetación**

Las repoblaciones forestales con pinar de piñonero desde el siglo XVIII hasta el siglo pasado y con eucalipto desde 1940 sobre gran parte de la provincia de Huelva, han modificado el paisaje primitivo. Gran parte de la vegetación original, correspondiente al monte esclerófilo, dominado en su mayoría por el alcornoque y el matorral mediterráneo, fue sustituido por masas de pinar de piñonero, cuyo objetivo era revalorizar las tierras y fijar las dunas litorales, pues su movilidad perjudicaba las actividades y asentamientos humanos. A partir de 1940 se realizaron repoblaciones con especies del género *Eucalyptus* para atender las demandas madereras y especialmente de pasta de papel. Las repoblaciones se localizaron e intensificaron especialmente en los arenales y dunas costeras.

En la superficie correspondiente al acuífero Almonte-Marismas, las repoblaciones con pino piñonero (*Pinus pinea*) comenzaron en el siglo XVIII en la zona de Villamanrique. El buen rendimiento de estas masas provocó la expansión de las repoblaciones en la comarca de Doñana (desde El Asperillo hasta la Ría de Huelva), que ocuparon gran parte del territorio correspondiente a especies como el enebro, la sabina, el acebuche y el alcornoque. Se produjeron cambios aún mayores a partir de 1940, con la introducción del eucalipto (*Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus camaldulensis*), especie alóctona y de crecimiento rápido, que requiere de grandes aportes de agua. Las plantaciones de eucalipto no sólo afectaron de forma negativa al desarrollo de las formaciones arbóreas y de matorral de la zona; sus necesidades hídricas mayores a las del pinar favorecieron su instalación y excelente desarrollo en las zonas más húmedas, lo que motivó la pérdida de funcionalidad original de muchas lagunas y el impacto negativo en la vegetación típica de estas formaciones.

La eliminación de la masa original previa a la repoblación provocó graves daños al suelo y a la topografía del terreno. Las repoblaciones produjeron un descenso del nivel freático debido al incremento de la evapotranspiración (Trick, Th., 1998). En los sectores de El Abalarío-La Rocina-Mediana gran parte de los humedales se desecaron con la introducción del eucalipto (De La Lama, G., 1976; Márquez, D., 1985; Ojeda, J. F., 1987; Espina, J. y Estévez, A., 1992; Espina, J. y Estévez, A., 1993; Custodio, E. y

Palancar, M., 1995; Sousa, A. y García Murillo, P., 1998; Trick, Th. op. cit.; Manzano, M. *et al.* (op. cit.)), aunque se están recuperando a partir de la eliminación de estas plantaciones en las últimas décadas. La pérdida de valor de los productos obtenidos de estos aprovechamientos forestales y las nuevas políticas ambientales han originado, a partir de los años 80 del siglo pasado, el inicio de la sustitución de los eucaliptales por masas de pinar de piñonero y como consecuencia la regeneración de los complejos lagunares.

Por otro lado, a partir de los años 60-70 del siglo pasado, la transformación de tierras forestales y de marisma en tierras agrícolas, se llevó a cabo tanto a través de iniciativa privada como de iniciativa pública (Plan Almonte-Marismas) en una buena parte de la región, promoviéndose especialmente el cultivo agrícola intensivo. En la actualidad el uso del suelo más importante es el agrícola, tanto de secano como de regadío.

La introducción de cultivos agrícolas en Doñana también ha ocasionado graves problemas en el nivel freático del acuífero. El Plan Almonte-Marismas, proyecto avalado por la FAO, promovió la expansión del cultivo agrícola de regadío basándose en los abundantes recursos del acuífero. Esta transformación supuso un cambio radical en los usos del suelo en las marismas y en los arenales. Se desecó una parte de la marisma y se eliminaron bosques, matorrales y pastizales originales de los arenales. Los nuevos usos corresponden a los cultivos de arroz, algodón, remolacha, cítricos y frutales de hueso. Se modificó el trazado de caños y brazos del Guadalquivir y Guadiamar, se abrieron pozos y se instalaron infraestructuras de bombeo y riego,... Todos estos cambios han provocado a lo largo del tiempo descensos en los niveles freáticos en muchos puntos del acuífero, como es el caso del cono originado en la zona correspondiente a las fincas Hato Blanco y Hato Ratón, debido al gran volumen de agua subterránea extraída para regadíos.

El cultivo del fresón se ha extendido ampliamente en el entorno de Doñana, ocupando incluso terrenos de la masa de pinar. Se trata de una agricultura en donde priman las grandes producciones en poco tiempo, una agricultura de invernaderos, de cultivo bajo plástico, con empleo intensivo de agua, fertilizantes, herbicidas y plaguicidas. La implantación de estos cultivos agrícolas tiene otro efecto negativo añadido que es la contaminación que produce.

A estos factores de origen antrópico hay que añadir el desarrollo de áreas urbanas turísticas próximas a estas zonas húmedas, como Matalascañas y Mazagón, que también están provocando descensos locales en el nivel freático del acuífero debido a los bombeos de agua subterránea en los periodos vacacionales.

Todos los factores mencionados que producen una explotación intensiva y localizada del agua subterránea, han ocasionado impactos severos en las formaciones palustres, llegando incluso a originar su desaparición en ciertos casos. También se ha visto afectada la vegetación higrofítica, que deja paso a otra de carácter más xérico en aquellas áreas donde el descenso del nivel freático es más acusado.

### 3 El Manto Eólico Litoral de El Abalarío-Doñana (MELAD)

El denominado Gran Ecosistema Fluvio-Litoral de Doñana (figura 9) está formado por ecosistemas del tipo playas tanto actuales como relictas, mantos eólicos (fitoestables, semiestables o activos) y marismas de distinta consideración genético funcional (aluvial, mareal) (Fernández, M. y Borja, F. 2006).

El Manto Eólico Litoral de El Abalarío-Doñana (MELAD) se sitúa en el extremo meridional del acuífero Almonte-Marismas. Está limitado al norte por el Arroyo de La Rocina y al sur por la Costa de Castilla y se extiende desde el río Tinto (límite oeste) hasta la flecha de la desembocadura del Guadalquivir (límite este), ocupando una superficie de 453 km<sup>2</sup>.

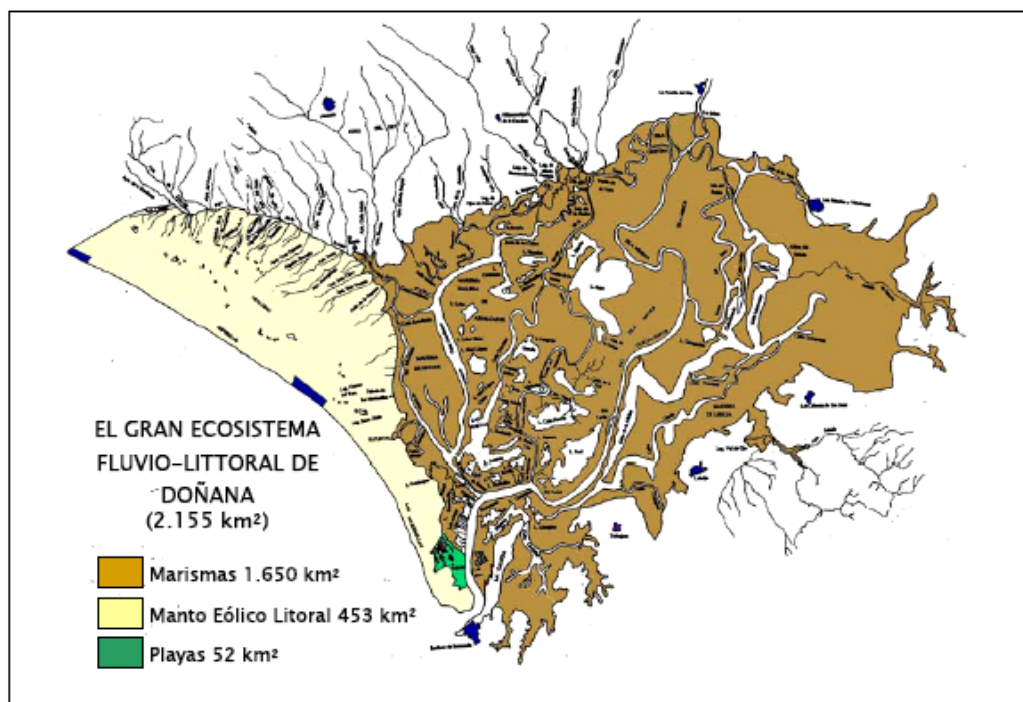


Figura 9. El Gran Ecosistema Fluvio-Litoral de Doñana, tomado de Fernández, M. & Borja, F., 2006



Se compone de cinco ecosistemas eólicos reconocidos a escala de *ecosección* [Borja, F. y Díaz del Olmo, F. (op. cit.)], que se diferencian por su génesis y su grado de estabilidad. Entre los ecosistemas fitoestables datados entre el Pleistoceno superior-Holoceno inferior se encuentran: el *Bajo Manto Eólico* de carácter exorreico donde se desarrolla el sistema de cañadas de la margen derecha del arroyo de La Rocina, el *Alto Manto Eólico Húmedo* al que se asocia el Complejo Palustre de El Abalarío-Doñana (Ruiz Labourdette, D. *et al.*, en preparación), y el *Alto Manto Eólico Seco* propio de los ambientes de sabinares o naves. El *Manto Eólico de Dunas Semiestables* y el *Manto Eólico de Dunas Activas* son los más recientes y constituyen las dunas móviles (figura 10).

Las formaciones palustres tienen diferente origen y modo de abastecimiento hídrico, aunque la mayoría están relacionadas con los sistemas de flujo de las aguas subterráneas (Bravo, M.A. y Montes, C. (op. cit.); Custodio, E. *et al.* (op. cit.); Lozano, E., 2004; García Novo, F. y Marín Cabrera, C., op. cit.). Su dinámica depende en gran medida de la acusada estacionalidad de las precipitaciones. En el sistema acuífero de Doñana la piezometría regional se adapta con bastante fidelidad a la topografía del terreno, destacando el domo de El Abalarío, al oeste de la Marisma [Manzano, M. *et al.* (op. cit.)].



Figura 10. Ecosistemas eólicos de El Manto Eólico Litoral de El Abalarío-Doñana (MELAD) (Borja, F. y Díaz del Olmo, F., 1996)

Según la tipificación de los humedales españoles realizado por Manzano, M., *et al.* (op. cit.), se clasifican por su carácter genético funcional dependiendo de sus características hidrológicas y geomorfológicas (hidrogeomorfología), sus relaciones con las cuencas superficiales y los acuíferos de referencia, así como por su estructura jerárquica y sus posibles afecciones. La clasificación genético-funcional de carácter hidro-geomorfológico se basa en el origen del agua, el modo de vaciado, su hidroperiodo (frecuencia y permanencia de la inundación), la tasa de renovación y su hidroquímica e hidrodinámica. La relación de los humedales con las aguas subterráneas hacen que dependan, además, en gran medida de la ubicación del humedal respecto a la red de flujo del agua subterránea en el acuífero (Manzano, M., *et al.* (op.cit.)).

En las áreas arenosas de recarga del acuífero se localizan humedales permanentes y temporales, de carácter epigénico, hipogénico y mixto. Corresponden a pequeñas depresiones eólicas, erosivas o morfológicas, en donde el nivel freático intercepta la superficie. La mayoría tiene carácter temporal. En octubre, el inicio de las primeras lluvias que continúan progresivamente hasta abril, da lugar al llenado de las cubetas. Durante el estiaje, el descenso del nivel freático, las pérdidas por evaporación y evapotranspiración provocan una importante reducción o la total desaparición de la lámina de agua. Es el caso de las lagunas situadas en los arenales de Coto del Rey, Ribeteñilos, El Peladillo, Ánsares, El Abalarío, lagunas peridunares como Charco del Toro, Zahillo, Taraje,... Otras lagunas son permanentes, como Dulce, Santa Olalla, Las Madres y otras alimentadas artificialmente, como es el caso de El Huerto, Las Pajas y Acebuche. Las lagunas epigénicas temporales en el área de recarga (lagunas de Jiménez, Ana, Norte de La Vaca, en el sector de El Abalarío), se localizan en zonas donde el terreno no intercepta con el nivel freático del acuífero, manteniendo agua debido a que tras las lluvias se producen flujos vadosos o hipodérmicos en la zona no saturada que descargan en la cubeta (Custodio, E., *et al.* (op. cit.); Borja, F. y Díaz del Olmo, F. (op. cit.), Manzano, M. *et al.* (op. cit.)). Las de tipo mixto, como parte de los humedales situados al este de Ribeteñilos (laguna de Sancho Mingo), reciben agua por escorrentía superficial y en raras ocasiones por descarga del nivel freático del acuífero en las cubetas.

Los humedales que se sitúan en zona de descarga pueden ser permanentes, temporales o mixtos, de carácter hipogénico y epigénico. Se caracterizan por su gran densidad en vegetación debido a la humedad constante que mantienen durante prácticamente todo el año. Algunos de los arroyos que discurren por la superficie de este acuífero deben parte de su caudal al drenaje de agua subterránea (arroyos La Rocina y Río Loro), lo que permite el desarrollo de bosques de galería a lo largo de sus

cauces. En la zona de ecotono entre el MELAD y la Marisma se producen afloramientos del acuífero en las depresiones, dando lugar a lagunas (El Hondón).

La vegetación higrofítica que se desarrolla en estas formaciones palustres depende tanto del régimen de lluvias como de las fluctuaciones del nivel freático del acuífero. Diversos estudios realizados en Doñana muestran que la profundidad del nivel freático es un factor condicionante en la distribución de la vegetación higrofítica (Zunzunegui, M. *et al.*, 1998). Este tipo de vegetación de matorral natural es característica de la zona (monte negro), de tal manera que su disposición es indicativa de las fluctuaciones de dicho nivel.

El agua subterránea y el comportamiento del acuífero son dos factores fundamentales en el mantenimiento y supervivencia de estos humedales. Los descensos prolongados del nivel piezométrico, debidos a cambios hidrológicos naturales o artificiales por extracciones intensivas, pueden producir severas modificaciones en la descarga natural por los ecotonos y reducir la extensión de los humedales durante la época seca. Estos descensos afectan al importante conjunto de formaciones palustres y de comunidades vegetales que se extiende sobre el MELAD.

### **3.1 El Complejo Palustre**

El sector oriental del MELAD alberga importantes complejos palustres como el sistema de lagunas peridunares de Santa Olalla situadas en la zona de contacto entre el cordón de dunas semiestables y las arenas estabilizadas. De estas lagunas cabe destacar: Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, Taraje, Zahillo, Charco del Toro y Brezo (figura 11), entre otras. Estas lagunas tienen su origen en la descarga del acuífero por la base de los frentes de avance del sistema dunar (De Torres, T., 1977).

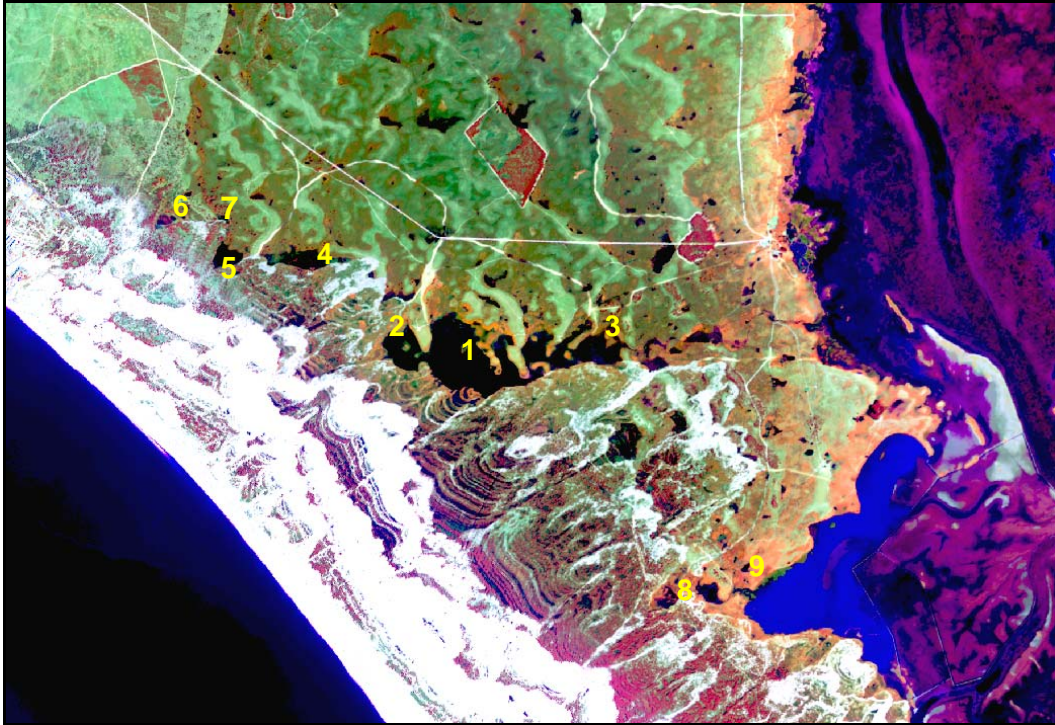


Figura 11. Sector de Santa Olalla (imagen AHS de abril de 2004) [1: Santa Olalla, 2: La Dulce, 3: Las Pajas, 4: Taraje, 5: Zahillo, 6: Charco del Toro, 7: Brezo, 8: El Sopotón, 9: Laguna del Guerrero]

Al este del cordón de lagunas peridunares, en la zona conocida como la Vera o Retuerta, el afloramiento del agua subterránea infiltrada por las arenas permite una alta productividad vegetal. En esta zona de contacto entre las arenas y la marisma se desarrollan especies pascícolas, de helófitos (figura 12), higrofíticas (*Pistacia lentiscus*, *Rubus ulmifolius*, *Erica scoparia*, *Tamarix africana*, *Myrtus communis*, *Pteridium aquilinum*, *Smilax aspera*, *Rosa canina*, *Crataegus monogyna*,...) y en determinados puntos alcornoques y bosques de ribera.

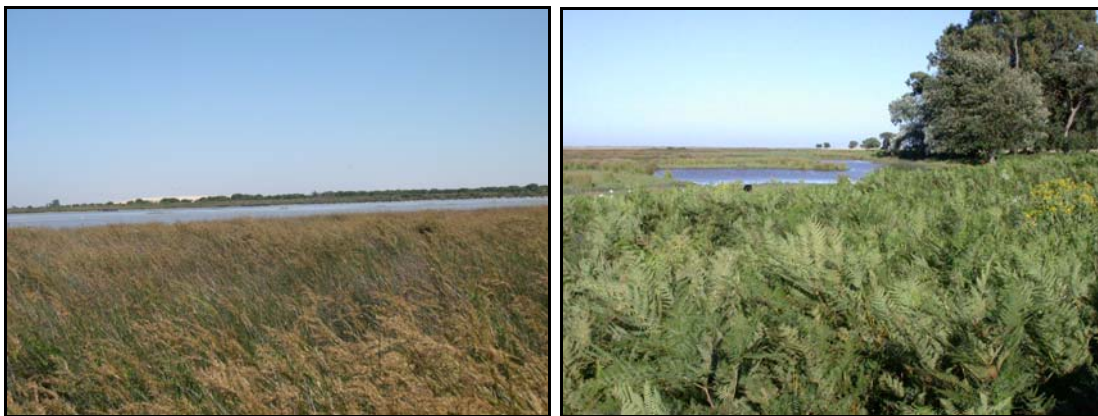


Figura 12. La Vera

Las variaciones que han sufrido estas formaciones palustres y la vegetación asociada se deben a diferentes factores, como la alternancia de períodos secos y húmedos (variaciones interanuales) y variaciones intraanuales, el avance de las dunas vivas (que produce colmatación de los humedales de menor extensión y un impacto sobre la vegetación que se desarrolla en los corrales), los incendios, los aprovechamientos cinegéticos y pascícolas, las repoblaciones durante la última mitad del siglo XX con *Pinus pinea* en el entorno de las lagunas, la inclusión de esta zona dentro de los límites de la Reserva Biológica y el Parque Nacional y en las tres últimas décadas el desarrollo de áreas urbanas próximas a estas zonas húmedas (Matalascañas), que han originado importantes descensos en el nivel freático debido a las extracciones de agua subterránea.

En la parte más septentrional del MELAD, sobre arenas estabilizadas se desarrollan otros complejos palustres como la laguna del Caballo, Navazo del Toro, Contrabandista, Mata de los Domínguez. Las cubetas de estas lagunas no son tan profundas como las de las peridunares, lo que origina la temporalidad de las mismas. Las variaciones en las precipitaciones, las repoblaciones forestales con pinar de piñonero, el aprovechamiento pascícola y cinegético son algunos de los factores que definen y alteran la vegetación que se establece en estas formaciones palustres. Los helófitos y las especies pascícolas (*Scirpus holoschoenus*, *Agrostis stolonifera*, *Panicum repens*) se desarrollan en donde hay un mayor encharcamiento. Son los brezos de escobas (*Erica scoparia*) y el tojo (*Ulex minor*) los que predominan en general en todo el borde de la superficie de las lagunas.

En la mitad oeste del MELAD se realizaron numerosas repoblaciones forestales durante la última mitad del siglo XX con especies del género *Eucalyptus* (especialmente con *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus camaldulensis*) y con especies del género *Pinus* (*Pinus pinea*) para satisfacer las necesidades de pasta de papel y madera en esa época, así como para erradicar el paludismo existente en los humedales de la zona. Las repoblaciones de eucalipto han ocasionado un impacto negativo mayor que la pinácea. El eucalipto es una especie alóctona de crecimiento rápido y con turnos de corta muy inferiores (9–12 años) a los que pueda tener una especie del género *Pinus* en España. Como ocurre con cualquier especie de crecimiento rápido y turno corto, no fertiliza el suelo y más bien contribuye a su degradación, favorecida por la composición de las cortezas y aceites foliares. Es una especie con altos requerimientos de agua y con una tasa de evapotranspiración muy elevada, por lo que origina una reducción de las superficies encharcadas y una disminución en el nivel freático del acuífero.

La superficie correspondiente al Bajo Manto Eólico de Dunas Fitoestables se repobló principalmente con especies del género *Eucalyptus*. Al sur de esta zona (Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables y Alto Manto Eólico Seco de Dunas Fitoestables) se realizaron repoblaciones con pináceas y mirtáceas. En los terrenos demasiado secos para el eucalipto se optó por la repoblación con pino piñonero.

Durante la última década se ha procedido a desmontar la mayor parte de las masas de eucaliptos existentes en estos sectores y otros adyacentes. Se han ido sustituyendo por masas de pinar y otras especies autóctonas, con el fin de promover un aprovechamiento forestal cuyo objetivo principal es la función protectora. El paisaje corresponde en la actualidad a masas arbóreas de pinar de piñonero con sotobosque de “monte blanco” en donde la topografía es más elevada y de “monte negro” en donde existe una mayor disponibilidad hídrica. Se observan todavía algunos puntos de eucaliptar, que quedan limitados a algunas cubetas de las formaciones palustres y zonas más húmedas. La eliminación de estos pies y el control de la regeneración por rebrote de esta especie se están llevando a cabo mediante tratamientos que eviten en la medida de lo posible los riesgos de erosión eólica.

El conjunto de formaciones palustres conocidas como complejo de El Abalarío se caracteriza por su marcada temporalidad. Durante el periodo de encharcamiento están cubiertas por pastizales y en las partes menos encharcadas aparecen especies del “monte negro”. No es común encontrar en esta zona las especies de las lagunas turbosas, aunque pueden aparecer en puntos muy concretos. Los tratamientos selvícolas realizados a finales del siglo XX, que han aclarado la masa de pinar y eliminado la de eucalipto, han favorecido la recuperación generalizada de las lagunas en este sector de El Abalarío.

La línea de contacto entre el Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables y el Bajo Manto Eólico de Dunas Fitoestables, situada dentro del Parque Natural de Doñana, corresponde al conjunto de lagunas turbosas de Ribetejilos. Las formaciones palustres y la vegetación asociada de esta franja presentan en la actualidad grandes alteraciones debido a las actividades selvícolas llevadas a cabo durante el siglo XX (especialmente la repoblación con mirtáceas, figura 13). En las cubetas de estas lagunas se observa una zona encharcada, que corresponde a la mayor profundidad. Entorno a ella se localizan especies helófitas, que dan paso a una segunda banda en donde predomina el pastizal (*Agrostis stolonifera*, *Panicum repens*, *Hypericum elodes*, *Molinia caerulea* var. *arundinacea*, etc.), que se desarrolla en una lámina de agua de menor profundidad. La banda que rodea a este pastizal corresponde a especies de “monte negro”. A lo largo de este hilo de lagunas, en la parte más meridional de las

formaciones palustres podemos encontrar especies como *Arbutus unedo*, *Phillyrea angustifolia*, *Pistacia lentiscus*, *Rubus ulmifolius*, *Myrtus communis*, *Cytissus grandiflorus*, etc.



Figura 13. Camino de Ribetehilos

Las cubetas que mantienen el nivel freático casi en superficie durante prácticamente todo el año, se caracterizan por tener suelos turbosos que favorecen el desarrollo de especies como *Erica ciliaris* y *Ulex minor* (figuras 14) (García Murillo, P y Sousa Martín, A. 1997 y 1999). También se pueden encontrar especies como *Erica scoparia*, *Molinia caerulea* var. *arundinacea* (muy afectada por el diente del ganado), *Cistus psilosepalus*, ejemplares aislados de *Salix atrocinerea*,... (García Murillo, P. y Sousa Martín, A. (op. cit.)). En donde la presión del diente del ganado es intensa, las matas de brezo (*Erica ciliaris*) se desarrollan entre el tojo (*Ulex minor*), que soporta mejor dicha presión por la presencia de espinas en sus ramas. En determinados puntos de alta humedad edáfica, baja disponibilidad de nutrientes y elevada acidez del sustrato se encuentran esfagnos en algunas de las cubetas (*Sphagnum inundatum* y *Sphagnum denticulatum*) (Sousa Martín, A., 2004). García Murillo, P. y Sousa Martín, A. (1998) destacan la importancia y el interés en la conservación de estas formaciones turbosas de carácter atlántico y de las turberas, en general, tan escasas en Andalucía y de gran valor por sus rasgos de atlanticidad y por su alto valor biológico debido a su carácter relíctico.



Figura 14. Ribetehilos. Detalle de *Erica ciliaris*, *Pteridium aquilinum*, *Molinia caerulea*, *Ulex minor*

En los arroyos de mayor entidad del sector y especialmente en el límite norte del Manto Eólico Litoral, que se corresponde con el arroyo de La Rocina es posible observar vegetación ripícola como saucedas (*Salix atrocinerea*), fresnos (*Fraxinus angustifolia*), álamos (*Populus nigra* y *Populus alba*), sanguinos (*Frangula alnus*), zarzamoras (*Rubus ulmifolius*), madreselvas (*Lonicera* sp.), helechos, ... (figura 15).



Figura 15. Arroyo de La Rocina



### 3.2 Vegetación

La vegetación actual en el MELAD se caracteriza en general por el predominio del matorral mediterráneo, que se entremezcla con formaciones arbóreas, arbustivas, de matorral y herbáceas. La distribución de los distintos tipos de vegetación viene determinada fundamentalmente por la fluctuación de la capa freática (Zunzunegui, M. op.cit.), que a su vez, está influida por la topografía. Las comunidades existentes en el ecotono de La Vera-Retuerta dependen de la inundación de la marisma y de las descargas freáticas del agua subterránea hacia esta zona, en la que el afloramiento de la humedad filtrada por las arenas permite una alta productividad vegetal.

La mitad este del MELAD se incluye en el Parque Nacional de Doñana (se excluye de este estudio el ecosistema de la marisma). En tiempos pasados la vegetación de esta zona estaba representada por bosques de sabinas (*Juniperus phoenicea* subsp. *turbinata*), enebros (*Juniperus oxycedrus* subsp. *macrocarpa*) y alcornoques (*Quercus suber*) distribuidos en el territorio en función de los distintos gradientes de humedad edáfica y movilidad del sustrato (García Novo, F. y Marín Cabrera, C., (op. cit.)). La vegetación actual es el resultado de alteraciones debidas a factores como las repoblaciones forestales con pino piñonero, el diente del ganado, especialmente el de caza, el carboneo y los incendios, la variabilidad en las precipitaciones, así como el desarrollo agrícola y de áreas urbanas próximas a esta zona, que generan importantes descensos en el nivel freático.

Esta zona arenosa presenta en la actualidad un paisaje dominado por el matorral. En función de la topografía, la disponibilidad de agua es uno de los factores principales que determina el tipo de comunidad de matorral. En las zonas más elevadas y secas se localiza el “monte blanco” (figura 16, figura 18), caracterizado por especies como el jaguarzo blanco (*Halimium halimifolium*), el romero (*Rosmarinus officinalis*), el romero macho (*Cistus libanotis*), el cantueso (*Lavandula stoechas*), el tomillo (*Thymus mastichina*), el jaguarzo amarillo (*Halimium commutatum*), la aulaga (*Stauracanthus genistoides*) (González Bernáldez, F. et al., 1975; García Murillo, P. y Sousa Martín, A., 1999; Zunzunegui, M. et al. (op. cit.)).



Figura 16. Monte blanco

Las más húmedas y deprimidas, con encharcamiento temporal en invierno, corresponden al “monte negro” (figuras 17 y 18), constituido por una cobertura de especies higrofitas como el brezo de escobas (*Erica scoparia*), la brecina o mogueriza (*Calluna vulgaris*), el tojo (*Ulex minor*), el arrayán (*Myrtus communis*) entre otras (González Bernáldez, F. *et al.* (op. cit.); García Murillo, P. y Sousa Martín, A. (op. cit.); Zunzunegui, M. *et al.* (op. cit.)).

Entre el matorral xerofítico y el higrofito existe una transición en función del gradiente topográfico en donde aparecen especies como el tojo (*Ulex australis*), el brezo de escobas (*Erica scoparia*) y el jaguarzo blanco (*Halimium halimifolium*) (figura 19). La proporción de estas especies viene determinada por el carácter más o menos hidromórfico del suelo (García Murillo, P. y Sousa Martín, A. (op. cit.)). La vegetación higrofitica de matorral (monte negro) es característica de la zona, de tal manera que su disposición es indicativa de las fluctuaciones del nivel piezométrico del acuífero. Los descensos prolongados de dicho nivel 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 esta época seca.



Figura 17. Monte negro



Figura 18. Transición de monte blanco a monte negro

El estrato arbóreo en las zonas más elevadas está constituido por sabinas (*Juniperus phoenicea* subsp. *turbinata*), localizados en lugares protegidos de los vientos marinos. Junto a la sabina se encuentran especies como el espino negro (*Rhamnus oleoides*), la rubia (*Rubia peregrina*), el torvisco (*Daphne gnidium*) o la retama loca (*Osyris quadripartita*). En los suelos arenosos más húmedos se establecen alcornoques (*Quercus suber*) y acebuches (*Olea europaea* var. *sylvestris*), acompañados de un cortejo de especies de “monte noble” como el madroño (*Arbutus unedo*), el lentisco (*Pistacia lentiscus*), el arrayán (*Myrtus communis*), el helecho común (*Pteridium*

*aquilinum*) y la zarzamora (*Rubus ulmifolius*). La degradación más intensa de este bosque mediterráneo da paso al matorral de “monte negro”.

Durante el siglo XVIII se realizaron repoblaciones forestales de pino piñonero (*Pinus pinea*) sobre zonas ocupadas por la sabina (*Juniperus phoenicea* subsp. *turbinata*). Actualmente se observan manchas con sotobosque que varía en función de la topografía y del tratamiento selvícola aplicado a la masa. El pinar aparece mezclado también con la sabina (*Juniperus phoenicea* subsp. *turbinata*). En el siglo XX se realizaron plantaciones de eucalipto para su explotación forestal. El impacto negativo en el nivel freático y la vegetación motivaron la posterior eliminación de la masa repoblada. Hoy en día hay pocos puntos donde se conserve el eucalipto (figura 19), como en el Coto del Rey, aquí se encuentra junto a formaciones de ribera cuyas especies más comunes son el fresno (*Fraxinus angustifolia*), la zarzamora (*Rubus ulmifolius*), la zarzaparrilla (*Smilax aspera*), el lentisco (*Pistacia lentiscus*) (figura 20).



Figura 19. Repoblaciones de eucalipto en el Coto del Rey



Figura 20. Vegetación de ribera en el Coto del Rey

La figura 21 muestra un posible corte de la vegetación en el MELAD teniendo como punto de referencia central una formación palustre o zona encharcada. La gradación de especies desde el borde de la laguna hacia el interior se organiza en bandas alrededor de la lámina de agua. Junto al borde se desarrolla un tapiz de herbáceas (*Agrostis stolonifera* L, *Cynodon dactylon*, *Panicum repens*, *Mentha pulegium*) y diversas especies de helófitos (*Juncus maritimus*, *Juncus acutus*, *Scirpus holoschoenus*). El pasto perenne y los helófitos se caracterizan por tener humedad prácticamente durante todo el año (encharcamiento en la época invernal y afloramiento de humedad el resto del año). Hacia zonas más externas del borde de la laguna, en las depresiones húmedas y con encharcamiento temporal en invierno se desarrollan las especies correspondientes al matorral de “monte negro”. Este matorral higrofitico da paso a las especies xerofíticas del “monte blanco” y al pinar, que se establecen en las zonas más secas y altas.

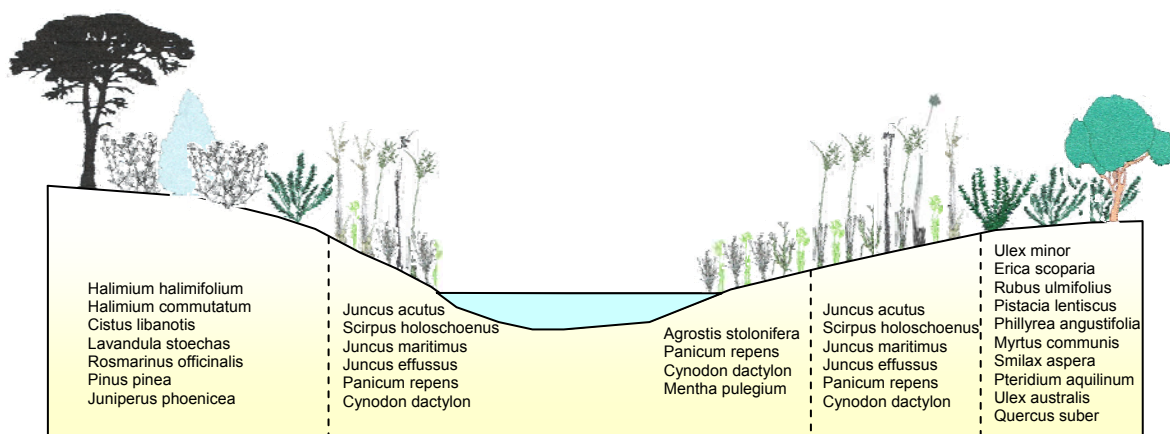


Figura 21. Distribución espacial de la vegetación en los Mantos Eólicos Húmedos (Sousa Martín, A. 2004, modificado)

## 4 Cartografía de Formaciones Palustres del MELAD

### 4.1 Descripción de la serie temporal de Imágenes Landsat

Las imágenes obtenidas por los satélites de recursos naturales proporcionan información multiespectral, multitemporal y digital muy útil en la realización de estudios geoambientales. Su carácter digital permite la referenciación, calibración y coregistro de imágenes multitemporales, facilitando su utilización rápida y precisa en el estudio de fenómenos dinámicos. La integración y el manejo posterior de esta información en un sistema de información geográfico facilitan el análisis de los datos de teledetección y su integración con otro tipo de información referenciada. Una de las características más importantes de estos datos es su registro periódico que permite realizar un estudio multitemporal para la cuantificación y detección de cambios del medio natural. El análisis de cambios en las cubiertas y usos del suelo proporciona información fundamental en los estudios de gestión y planificación territorial y de impacto ambiental.

La información detallada sobre la extensión de los cuerpos de agua es importante para la predicción de inundaciones o desbordamientos y su seguimiento, así como para la caracterización e inventario de humedales. En el caso de cubiertas como las formaciones palustres, disponer de información precisa de su extensión y de su distribución espacial es un requisito previo a su óptima gestión y utilización (Dwivedi, R.S. *et al.*, 1999; Frazier, P.S. y Page, K.J., 2000). La teledetección es una herramienta que permite la cartografía de los cuerpos de agua de un área extensa en un momento dado en el tiempo (Verdin, J.P., 1996; Frazier, P.S. y Page, K.J. (op. cit.)). El seguimiento de cubiertas con dinámicas que pueden variar rápidamente, como es el caso del agua, hace necesario el uso de datos con una gran resolución temporal o con una serie que recoja un amplio rango de condiciones hidrológicas (Frazier, P.S. y Page, K.J. (op. cit.)). Estas características ha motivado que la Convención Ramsar considere la teledetección como una herramienta de primer orden en el estudio y condiciones del estado de los humedales (GECT *et al.*, 2004). La posibilidad de evaluar mediante datos de teledetección los cambios en los humedales respecto a condiciones anteriores, es importante en la toma de decisión de inclusión de un humedal en el registro de sitios amenazados (Earth Satellite Corporation, 2007). La Agencia Espacial Europea comenzó en el año 2003 el Proyecto GlobWetland. Sus objetivos son el facilitar el seguimiento y evaluación de las condiciones de los humedales, así como de los factores que puedan amenazar el equilibrio de estos ecosistemas (ESA, 2007).

Los datos registrados por el satélite Landsat se han utilizado en numerosas aplicaciones. Su valor potencial en la detección y cartografía de cuerpos de agua se ha

evaluado en numerosos trabajos (Ernst-Dottavio, C. L. *et al.*, 1981; Overton, I., 1997; Wilson, P. A., 1997; Frazier, P.S. y Page, K.J. (op. cit.)). El análisis multitemporal de las imágenes de este satélite se ha utilizado para la identificación e inventario de humedales como paso previo a su gestión (Lunetta, R.S. y Balogh, M.E., 1999; Frazier, P.S. y Page, K.J. (op. cit.)). La resolución temporal del satélite Landsat es de 16 días. Existe un importante archivo de imágenes Landsat TM desde el año 1984 a la actualidad y de imágenes Landsat ETM+ desde 1999. Esta extensa base de datos posibilita la cartografía de distintas cubiertas y el análisis de cambios en las mismas.

La teledetección se ha aplicado en diversos estudios relacionados con humedales españoles. A partir de imágenes Landsat 5 TM ha sido posible determinar los efectos causados por los regadíos en la disponibilidad de recursos hídricos en el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel (Vela, A. *et al.*, 1999) y en los humedales litorales de la laguna del Mar Menor (Pardo, M.T. *et al.*, 2004). En el caso de las marismas de Doñana, se han reconstruido patrones históricos recientes y se ha analizado su régimen de inundación a partir de una serie temporal de este satélite (Aragonés, D. *et al.* (op. cit.)). Las bandas de los sensores TM y ETM+ han permitido establecer la presencia o ausencia de sales en los suelos entorno a los cuerpos de agua (Pérez González, M.A., *et al.*, 2001), definir el contorno y características de la laguna de Gallocanta, así como las coberturas ligadas a las fluctuaciones del nivel de la lámina de agua (Díaz de Arcaya, N. *et al.*, 2005).

Como se ha visto en el capítulo 3.2, las lagunas permanentes y temporales son de forma inherente sistemas dinámicos. Los cuerpos de agua se caracterizan por sus rápidos cambios, lo que dificulta la obtención de información relativa a su extensión y situación utilizando técnicas de investigación tradicionales. La teledetección posibilita la cartografía de cubiertas sobre una gran superficie en una fecha determinada. La resolución temporal y la disponibilidad de datos a lo largo de una secuencia prolongada en el tiempo permiten recoger un amplio rango de condiciones. En este caso, la periodicidad en el registro de la información permite el estudio y la cartografía de las variaciones temporales de los cuerpos de agua a lo largo de un período de tiempo con diferentes condiciones hidrológicas. Dada la resolución espacial de las imágenes Landsat (30 m), resultan adecuadas para la cartografía de cuerpos de agua con superficies mínimas de 0,1 ha (Eckhardt, D.W. y Litke, D.W. 1988).

A partir de los datos de pluviometría de la zona (figura 22), se ha realizado la selección de imágenes teniendo en cuenta los ciclos hidrológicos húmedos y secos a lo largo del período de estudio.

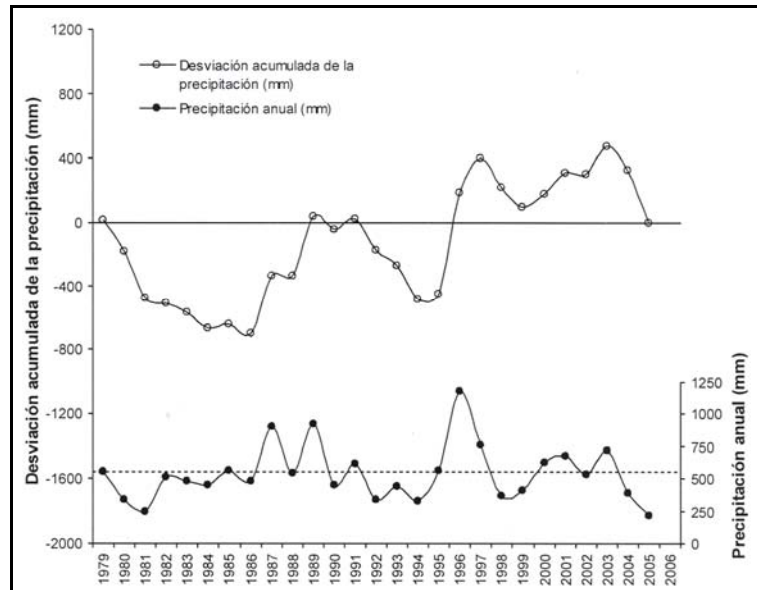


Figura 22. Gráfico de precipitaciones anuales y desviación acumulada de la precipitación (1979 – 2006), tomado de Custodio, E., Dolz, J., Manzano, M. (2006)

Además de la variabilidad interanual, se han considerado las diferentes condiciones que muestran las lagunas debido a las fluctuaciones estacionales. La mayor parte de la precipitación se produce de octubre a marzo, y las mínimas durante el verano. Para cada ciclo hidrológico seleccionado, se eligieron dos imágenes: una correspondiente a la fecha disponible más próxima a la precipitación máxima y representativa de los máximos niveles de inundación (entre diciembre y marzo), y otra registrada en la época de estiaje cuando los niveles de inundación son mínimos (entre julio y septiembre). De este modo se ha generado una base de imágenes que reflejan las máximas diferencias interanuales entre distintos periodos hidrológicos e intraanuales dentro de cada ciclo hidrológico.

Se han seleccionado un total de 30 imágenes del satélite Landsat (escena 202-034, sensores TM y ETM+) correspondientes al período 1985–2005 (tablas 2, 3 y 4).

Sensor	Thematic Mapper TM	Enhanced Thematic Mapper Plus ETM+
Resolución temporal	16 días	16 días
Resolución radiométrica	8 bits	8 bits
Bandas espectrales	8	7 + Pancromática

Tabla 2. Características de los sensores TM y ETM+



<b>Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)</b>	<b>Landsat 7</b>	<b>Rango espectral (micrómetros)</b>	<b>Resolución (m)</b>
	Banda 1	0.45-0.52	30
	Banda 2	0.53-0.61	30
	Banda 3	0.63-0.69	30
	Banda 4	0.78-0.90	30
	Banda 5	1.55-1.75	30
	Banda 6	10.40-12.50	60
	Banda 7	2.09-2.35	30
	Banda 8	0.52-0.90	15

Tabla 3. Configuración espectral del sensor ETM+

<b>Thematic Mapper (TM)</b>	<b>Landsat 5</b>	<b>Rango espectral (micrómetros)</b>	<b>Resolución (m)</b>
	Banda 1	0.45-0.52	30
	Banda 2	0.52-0.60	30
	Banda 3	0.63-0.69	30
	Banda 4	0.76-0.90	30
	Banda 5	1.55-1.75	30
	Banda 6	10.40-12.50	120
	Banda 7	2.08-2.35	30

Tabla 4. Configuración espectral del sensor TM

Las imágenes utilizadas han sido cedidas en parte por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (CMA JA) y la Estación Biológica de Doñana (EBD), y el resto adquiridas por el Instituto Geológico y Minero de España (tabla 5).

<b>Fecha</b>	<b>Sensor</b>	<b>Fuente</b>	<b>Fecha</b>	<b>Sensor</b>	<b>Fuente</b>
01/02/1985	TM	EBD	09/03/1998	TM	EBD
03/01/1986	TM	EBD	07/01/1999	TM	EBD
07/02/1987	TM	EBD	18/07/1999	TM	CMAJA
05/09/1988	TM	IGME	19/02/2000	ETM+	IGME
17/04/1989	TM	CMAJA	20/01/2001	ETM+	IGME
15/02/1990	TM	IGME	10/04/2001	ETM+	IGME
16/08/1990	TM	IGME	01/09/2001	ETM+	IGME
04/01/1992	TM	EBD	24/02/2002	ETM+	EBD
07/02/1993	TM	EBD	16/06/2002	ETM+	IGME
08/12/1993	TM	EBD	10/01/2003	ETM+	IGME
14/03/1994	TM	IGME	25/03/2004	ETM+	EBD
06/09/1994	TM	CMAJA	26/04/2004	TM	EBD
12/01/1995	TM	EBD	29/06/2004	TM	IGME
09/07/1996	TM	IGME	20/09/2005	TM	IGME
18/02/1997	TM	EBD			

Tabla 5. Relación de imágenes Landsat seleccionadas para el periodo 1985-2005

## **4.2 Corrección geométrica y radiométrica de Imágenes Landsat**

Las imágenes Landsat han sido corregidas geométricamente para ajustarlas a una proyección UTM, Datum ED50. Para ello, se ha modificado la posición de los niveles digitales de los píxeles de la imagen original, de modo que se pueda localizar la posición de cualquier punto de la escena en un mapa. La corrección se ha realizado tomando puntos de control homólogos entre las bandas de cada una de las imágenes y la información digital (escala 1:25.000) del Instituto Geográfico Nacional (IGN) correspondiente a las capas de Hidrografía y Planimetría (comunicaciones y núcleos de población) y la ortofoto del año 2002 de la Junta de Andalucía. Se han tomado 80 puntos de control bien definidos (cruces de carreteras, poblaciones,...) y distribuidos de manera uniforme en la imagen, y se han utilizado en la corrección de todas las escenas. La transferencia de los ND (niveles digitales) originales a la posición corregida se ha realizado por el método de “vecino más próximo”, con un error cuadrático menor de un píxel (30 m).

La realización del análisis multitemporal requiere comparar imágenes registradas en fechas diferentes por lo que ha sido necesario efectuar una homogeneización radiométrica con objeto de eliminar las variaciones atmosféricas y de iluminación existentes en las distintas escenas. Esta corrección se ha realizado según el método desarrollado por G. Chander *et al.*, (2004).

## **4.3 Análisis e interpretación de imágenes Landsat**

Una vez realizadas las correcciones geométricas y radiométricas, se han evaluado los análisis más adecuados para la interpretación de las imágenes. La interpretación visual se ha realizado mediante comprobación de datos en el terreno. En el trabajo de campo se han realizado observaciones sobre el estado de la distribución horizontal de la vegetación desde el borde del agua de las lagunas hasta las zonas más secas que rodean a las mismas, sobre la zona de ecotono o de contacto arena-marismas así como el estado de la lámina de agua existente en las lagunas en las fechas coincidentes con el desarrollo del proyecto. En estos puntos se han tomado muestras de suelo para análisis mineralógico, tipo de vegetación (con medida de la fracción de cubierta cubierta), medida de GPS y fotografía. Esta información se incluye en la base de datos generada en el proyecto.

Las lagunas pueden presentar varias situaciones a lo largo de un ciclo hidrológico. Generalmente presentan lámina de agua después de precipitaciones suficientemente intensas que se producen entre diciembre y marzo/abril. Durante el estiaje, la superficie

de la lámina de agua se reduce o desaparece por completo, mostrando un suelo húmedo o seco, dependiendo del rigor del verano y del nivel freático del acuífero. En ciclos hidrológicos particularmente secos, el descenso del nivel freático y la ausencia de precipitaciones pueden ocasionar la desaparición de lámina de agua en la mayor parte de las lagunas.

En este tipo de formaciones palustres es característica la presencia de vegetación capaz de soportar altos niveles de inundación, como es el caso de las especies helófitas, que aparecen en la cubeta de muchas lagunas. Existe además una zona de transición entre el sistema acuático y el terrestre donde el nivel freático del acuífero está normalmente próximo a la superficie y en donde se establecen especies pascícolas; éstas se sitúan en el borde de la laguna, cubriendo en algunos casos toda o parte de la laguna cuando los niveles han descendido y existe la humedad suficiente. La cartografía de este tipo de vegetación pascícola y de helófitos es particularmente interesante en este estudio, pues permite un análisis pormenorizado de la evolución de la capa freática (Allen-Díaz, B.H., 1991; Gong, P. *et al.*, 2004).

El tratamiento digital de las imágenes se ha realizado en base al comportamiento espectral que presentan el agua y la vegetación en las distintas regiones del espectro electromagnético. El agua refleja la radiación incidente en las longitudes de onda cortas, dando el máximo en el azul, mientras que en el infrarrojo cercano e infrarrojo medio absorbe completamente la radiación solar. Las bandas del visible dan información sobre contenido de materiales en suspensión. La vegetación presenta baja reflectividad en el visible, alta en el infrarrojo cercano (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ .) y baja con presencia de algunos máximos relativos en el infrarrojo de onda corta. La baja reflectividad del visible se debe al efecto absorbente de los pigmentos de la hoja (clorofilas, xantofilas, caroteno). Estos pigmentos absorben la radiación en las bandas del espectro situadas en torno a 0,445  $\mu\text{m}$ . o a 0,645  $\mu\text{m}$ ., apareciendo entre ambas una banda a 0,55  $\mu\text{m}$ . que presenta un pico relativo de reflectividad coincidente con el verde del espectro visible. La elevada reflectividad en el infrarrojo cercano se debe a la baja absorción de las clorofilas y a la estructura interna de la hoja. La hoja presenta una alta reflectividad en el infrarrojo cercano en claro contraste con la baja reflectividad que muestra en el visible, especialmente en la banda roja.

Desde el lanzamiento del primer satélite de la serie Landsat una de las aplicaciones de estas imágenes ha sido la discriminación de cuerpos de agua (Bennett, M.W.A., 1987). Se han realizado estudios basados en las bandas del infrarrojo cercano (banda 4), infrarrojo próximo (banda 5) e infrarrojo de onda corta (banda 7) (Manavalan, P. *et al.*, 1993; Smith, G.M. y Milton, E.J. 1999). La banda 4 proporciona superficies inferiores a

las reales: según el estudio de Bennett, M.W.A. (op.cit.), obtuvieron un 40% menos de superficie a la esperada. Además, existe la posibilidad de que cubiertas como zonas urbanas, pastizales y sombras puedan ser identificados como cuerpos de agua usando el rango espectral de la banda 4 (Baumann, P.R., 1999; Frazier, P.S. y Page, K.J. (op. cit.)). En el caso de la banda 7, el error puede deberse a que cultivos sometidos a intensos riegos sean confundidos con el agua. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que la banda 5 (1,55  $\mu\text{m}$ . – 1,75  $\mu\text{m}$ .) del sensor TM es la más adecuada para la delimitación precisa del contacto agua-tierra (Johnston, R. y Barson, M., 1993; Verdin, J.P. (op. cit.); Gong, P. *et al.* (op. cit.), 2004; Moller-Jensen, L., 1990; Overton, I. (op. cit.); Lunetta, R.S. y Valgo, M.E. (op. cit.); Castañeda, C. 2002). La banda 5 es además la menos sensible a la carga de sedimentos del agua (Lee, K-S. *et al.*, 2001), por lo que resulta el mejor indicador para definir el límite agua-tierra cuando se trata de aguas turbias o vegetación emergente o flotante (Bustamante, J. *et al.*, 2005).

La discriminación de la vegetación fotosintéticamente activa se basa principalmente en el contraste que presenta entre las bandas del visible, especialmente entre el rojo y las situadas en la región del infrarrojo. Las bandas de los sensores TM y ETM+ más utilizadas con este tipo de cubiertas son la 3, 4, 5 y 7 (Holder, D.N.H. y Ahern, F.J. 1986; Foody, G.M. *et al.*, 1996; Thenkabail, P.S., 2003).

En varias zonas húmedas de la Península Ibérica se han realizado diversos estudios a partir de imágenes de satélite: cartografía de la marisma de Doñana utilizando las primeras imágenes de la serie Landsat (Tenajas, J.L. y Llamas, R. (op. cit.)), análisis del potencial de las imágenes del sensor TM de Landsat para reconstruir los cambios históricos estacionales en las características de las aguas de las marismas de Doñana (Bustamante, J. *et al.* (op. cit.)), así como estudios regionales de los humedales existentes entre el río Guadiana y el río Barbate (Menanteau, L. (op. cit.)) y en las saladas de los Monegros (Castañeda, C. *et al.* (op. cit.)).

En un estudio preliminar del sector de Santa Olalla (Moreno, M.T. *et al.* (op. cit.)), se evaluaron diferentes métodos para realizar la cartografía y el seguimiento temporal de las fluctuaciones de dichas lagunas: fotointerpretación, segmentación y clasificación supervisada. El método de fotointerpretación consiste en la vectorización de la lámina de agua de las lagunas sobre las imágenes compuestas por las bandas que mejor enfatizan el límite de la superficie de los cuerpos de agua con el suelo y la vegetación. Se obtiene de este modo una capa/vector correspondiente a los cuerpos de agua. Este método proporciona buenos resultados, pero su inconveniente es su laboriosidad cuando se trabaja sobre superficies muy numerosas. Sólo se realizó con este método

la cartografía de la lámina de agua, pues las zonas encharcadas, donde hay mezcla de pastizal y agua, son difíciles de discriminar visualmente.

La segmentación es una técnica digital sencilla que se basa en la selección de un rango de valores mínimo y máximo correspondiente a las cubiertas que se quieren delimitar. Este método se ha utilizado para cartografiar cuerpos de agua, niveles de inundación de humedales y extensión de desbordamientos en ríos entre otras aplicaciones (Manavalan, P. *et al.* (op. cit.); Overton, I. (op. cit.); Shaikh, M. *et al.*, 1997; Baumann, P.R., 1996; Frazier, P.S. y Page, K.J. (op. cit.)). De las bandas correspondientes al infrarrojo, el infrarrojo próximo (banda 5 de los sensores TM y ETM+) es la que mejores resultados proporciona (Thenkabail, P.S. *et al.*, 1994; Frazier, P.S. y Page, K.J. (op. cit.)).

En el estudio sobre las lagunas del sector de Santa Olalla, el análisis de la estadística de los valores correspondientes a los cuerpos de agua (figura 23) muestra variaciones importantes en las bandas del visible, mientras que el rango se reduce considerablemente en las bandas del infrarrojo próximo, especialmente en las bandas 5 y 7. La banda 5 es la que ofrece una mejor discriminación de los píxeles correspondientes al agua, no mezclándose con otro tipo de cubiertas. Sobre esta banda se ha seleccionado el rango de valores mínimo y máximo correspondiente al agua y a las zonas encharcadas.

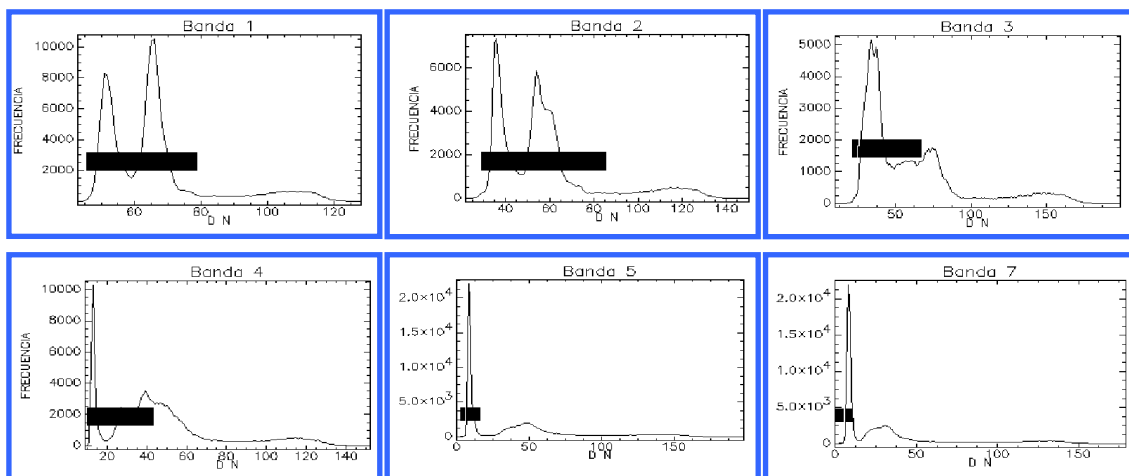


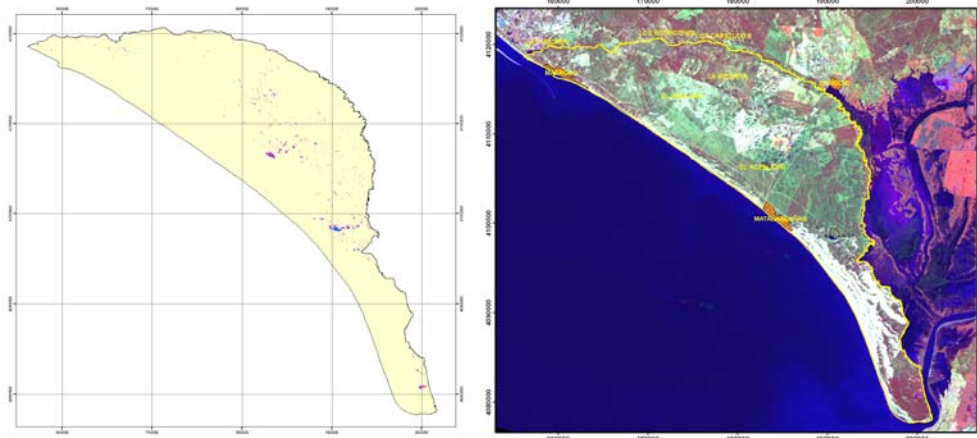
Figura 23. Histogramas de bandas individuales con indicación del rango de valores de los píxeles correspondientes a agua

La clasificación supervisada es otro método que se ha empleado con éxito en este tipo de aplicaciones (Manavalan, P. *et al.* (op. cit.); Lee, K.H. y Lunetta, R.S., 1995; Blackman, J.G., *et al.*, 1955; Kingsford, R.T. *et al.*, 1997; Brady, A.M. *et al.*, 1999). El tratamiento de clasificación digital consiste en categorizar una imagen multibanda, de

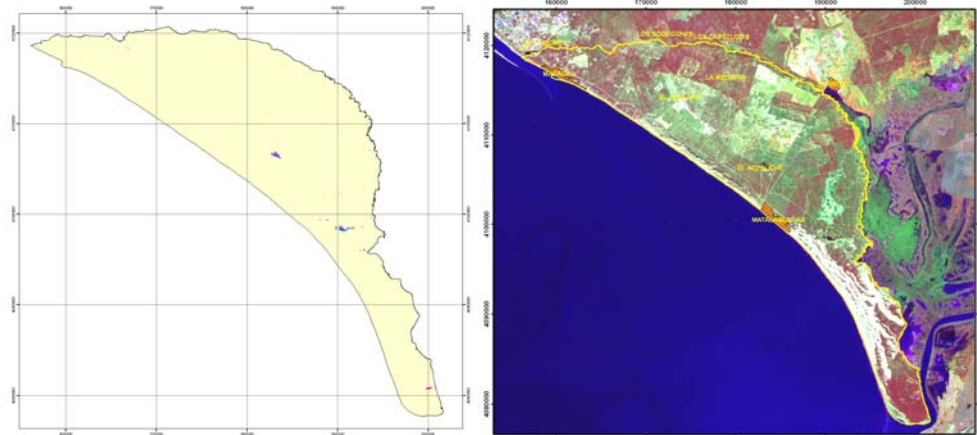
tal forma que los niveles digitales detectados por el sensor pasan a una escala categórica, es decir, el nivel digital de un píxel clasificado identifica la clase donde se ha incluido. La clasificación digital realizada por el método de máxima probabilidad considera que los ND de cada clase se ajustan a una distribución normal, lo que permite separar mejor estas categorías en todas las bandas.

El uso de la clasificación supervisada de máxima probabilidad sobre todas las bandas registradas por el sensor TM ha dado excelentes resultados en la cartografía de cuerpos de agua. Es un método más ajustado que la segmentación, dando errores inferiores al 10% (Kingsford, R.T. *et al.* (op. cit.); Frazier, P.S. y Page, K.J. (op. cit.)). La ventaja añadida de la clasificación supervisada es el uso de todas las bandas del sensor que introducen toda la información registrada en el visible e infrarrojo, posibilitando la discriminación de un mayor número de cubiertas. El análisis sobre bandas individuales (segmentación) dificulta en ocasiones la identificación de aquellas cubiertas con respuestas espectrales muy similares. La clasificación sobre todas las bandas permite recoger un mayor abanico de respuestas espectrales, de modo que pequeñas diferencias en cubiertas semejantes pueden ser detectadas al considerar toda la información registrada en las distintas regiones del espectro electromagnético.

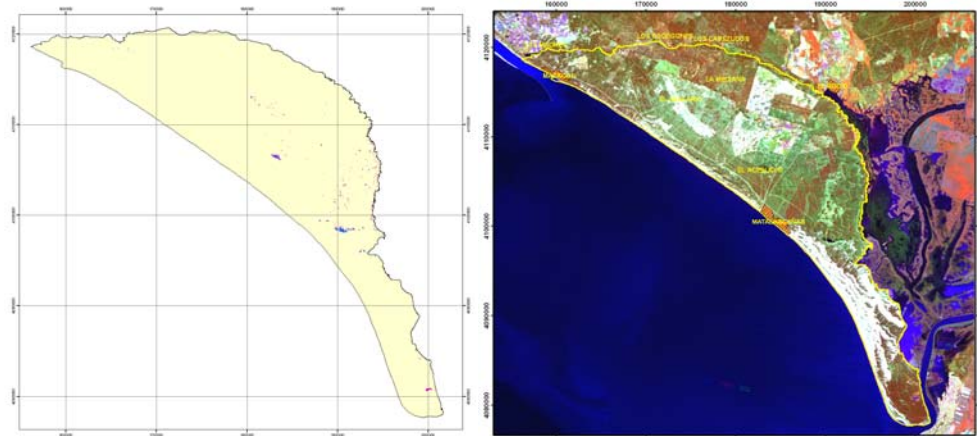
En una primera fase denominada de entrenamiento, y a partir de las observaciones de campo, la fotografía aérea y la base digital de las formaciones palustres de referencia tomada de Ruiz-Labourdette, D. *et al.* (CMA-JA), se ha establecido una categoría representativa de los cuerpos netos de agua y una segunda clase que representa píxeles localizados en zonas de borde y zonas encharcadas con vegetación pascícola y/o helófitos. Esta sistemática se ha aplicado a cada una de las imágenes Landsat de la serie temporal para toda el área correspondiente al MELAD. En la figura 24 aparece una composición en falso color (TM453) de cada una de las escenas de las distintas fechas seleccionadas y los resultados de las clasificaciones digitales correspondientes.



**01/02/1985**

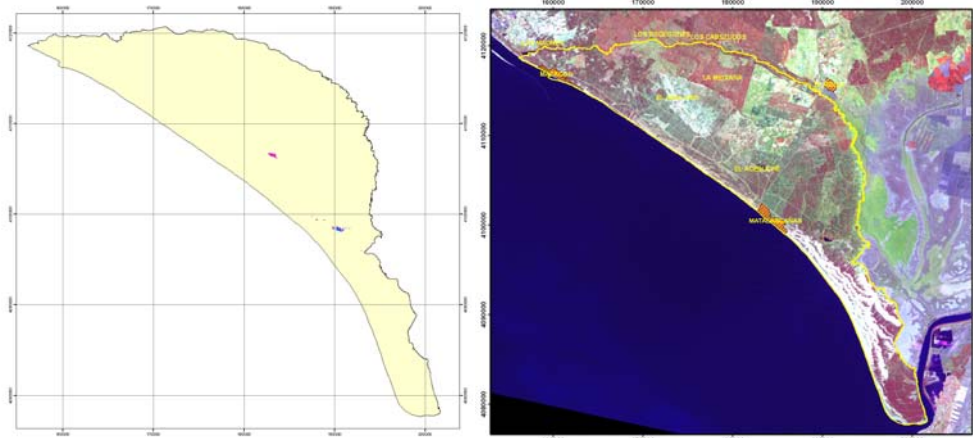


**03/01/1986**

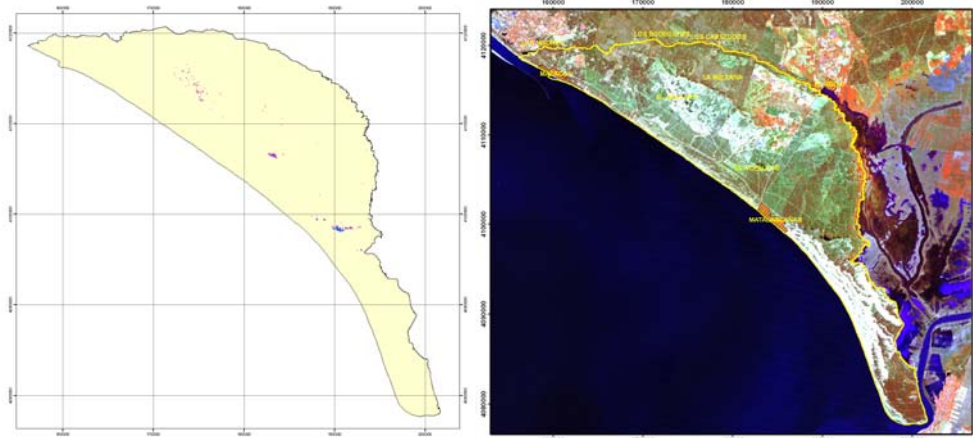


**07/02/1987**

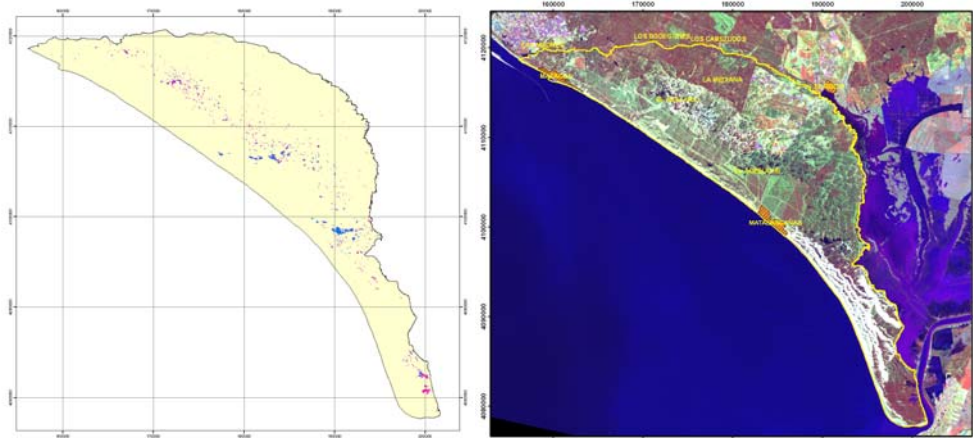
■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas



05/09/1988



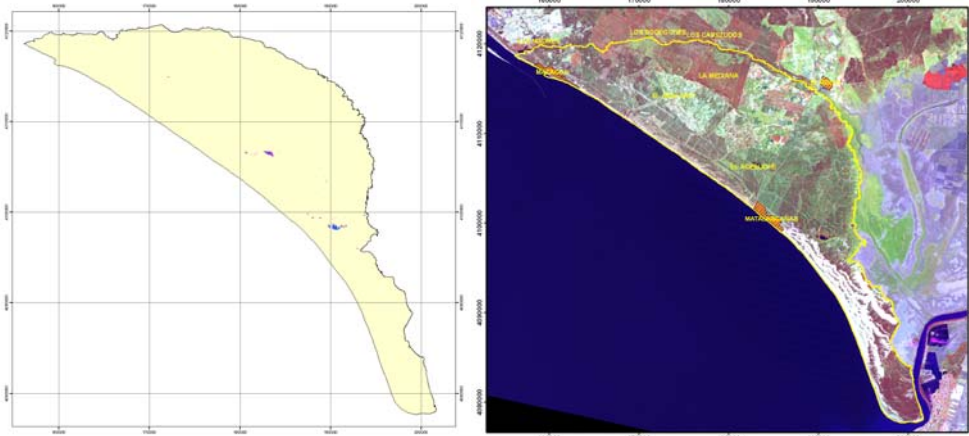
17/04/1989



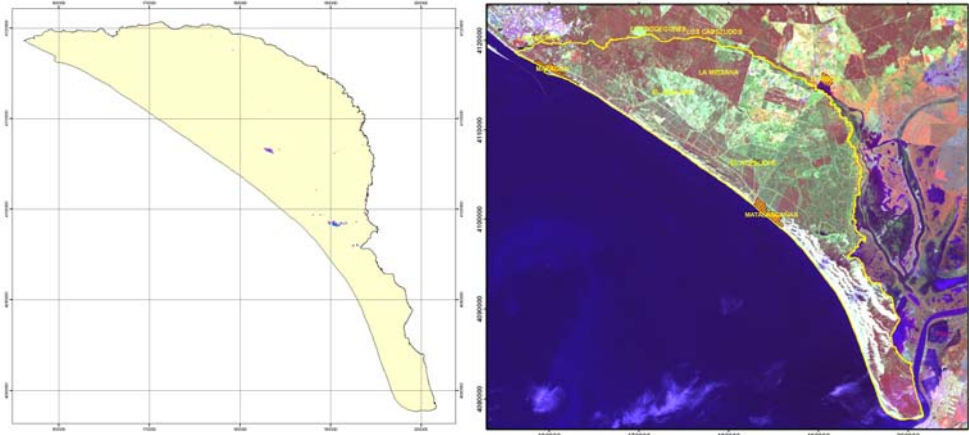
15/02/1990

■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas

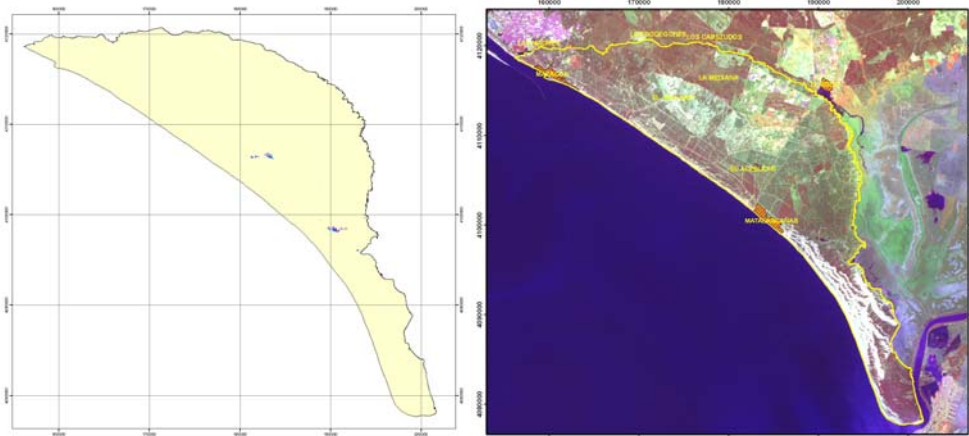




16/08/1990

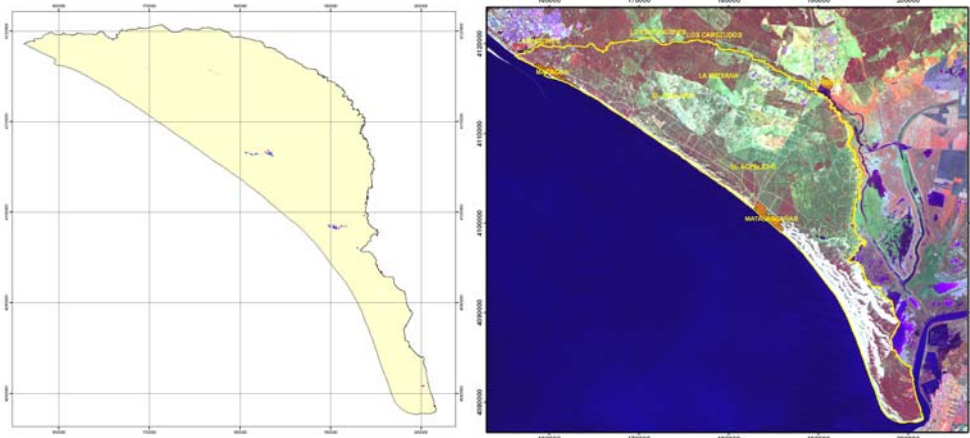


04/01/1992

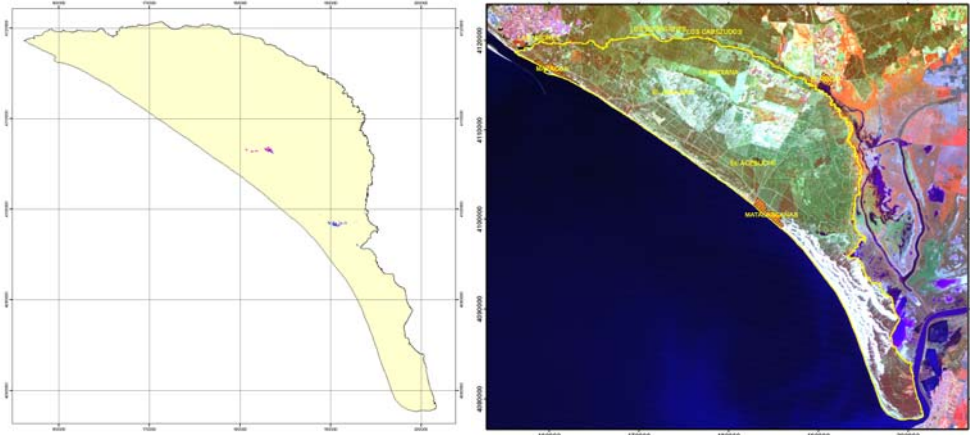


07/02/1993

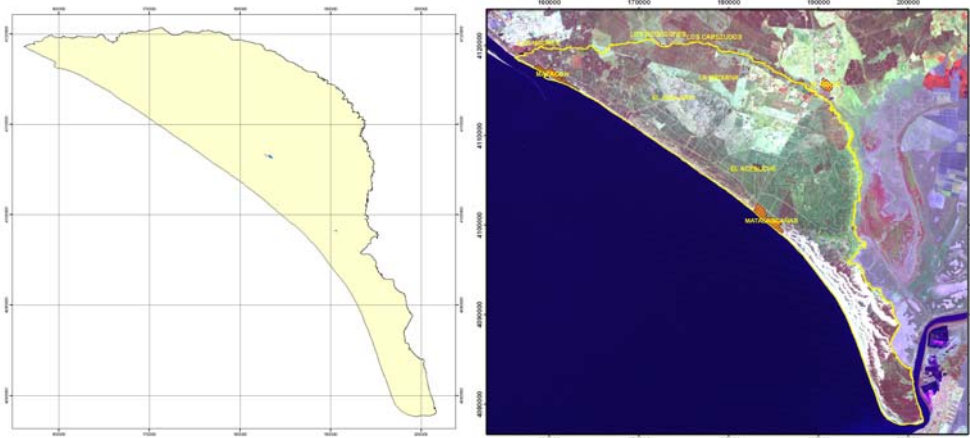
■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas



08/12/1993

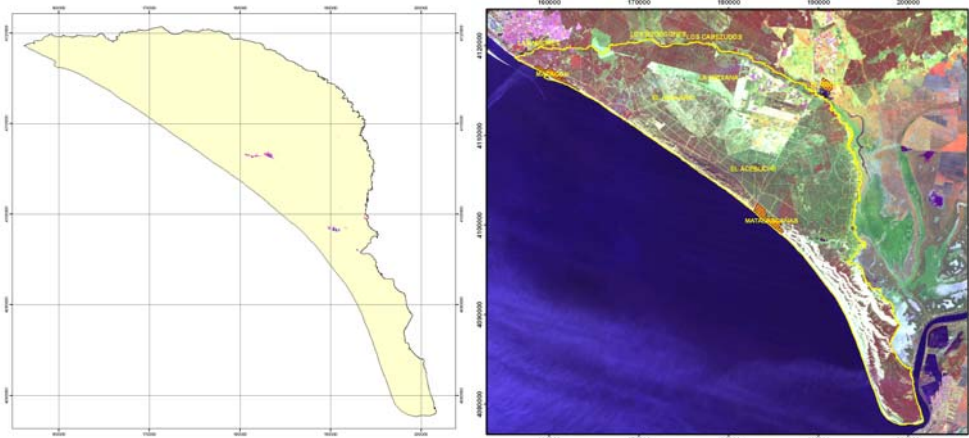


14/03/1994

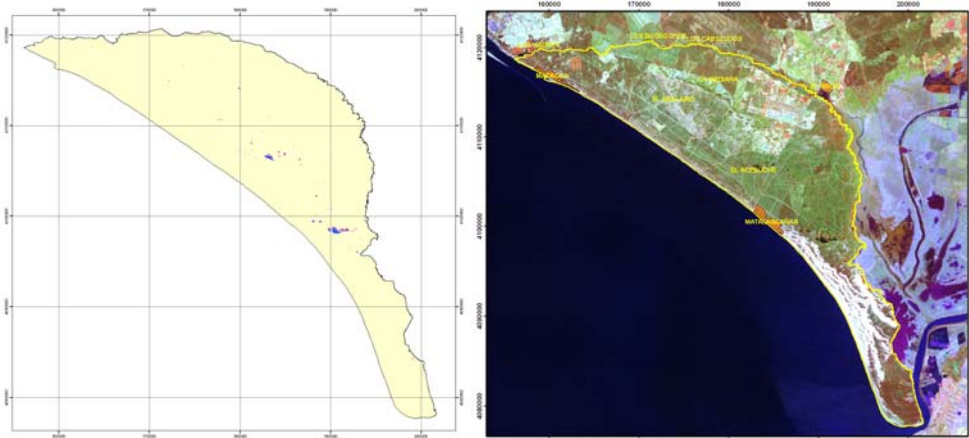


06/09/1994

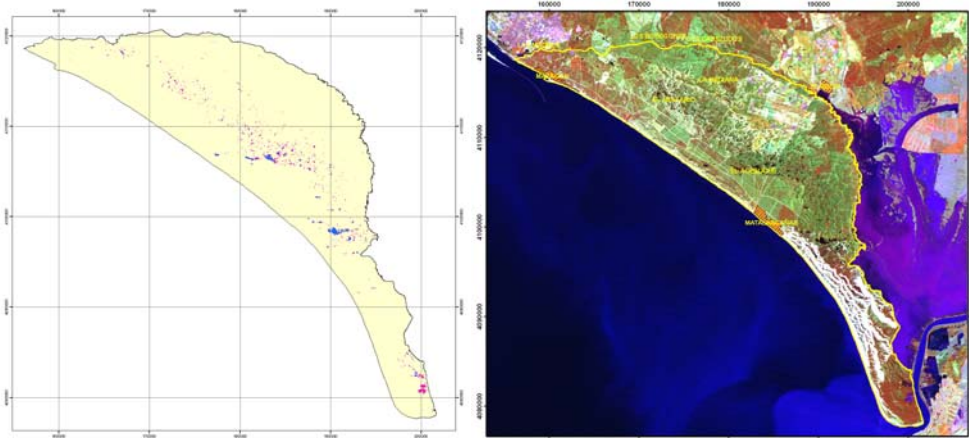
■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas



**12/01/1995**

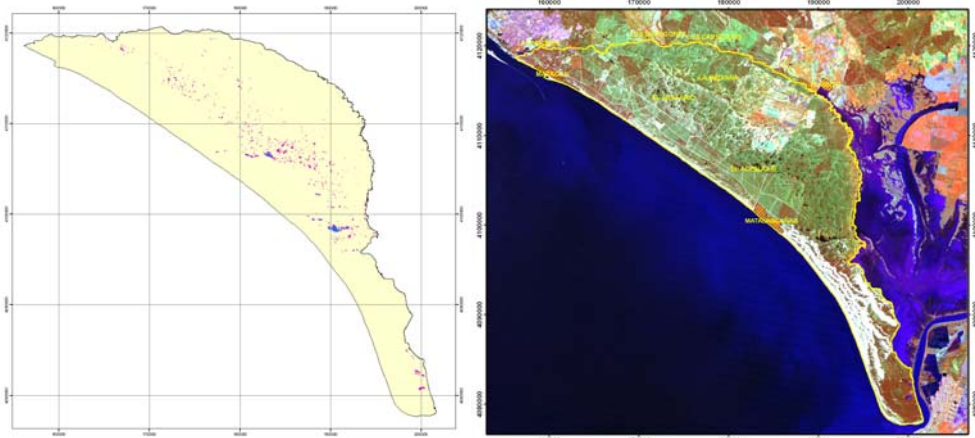


**09/07/1996**

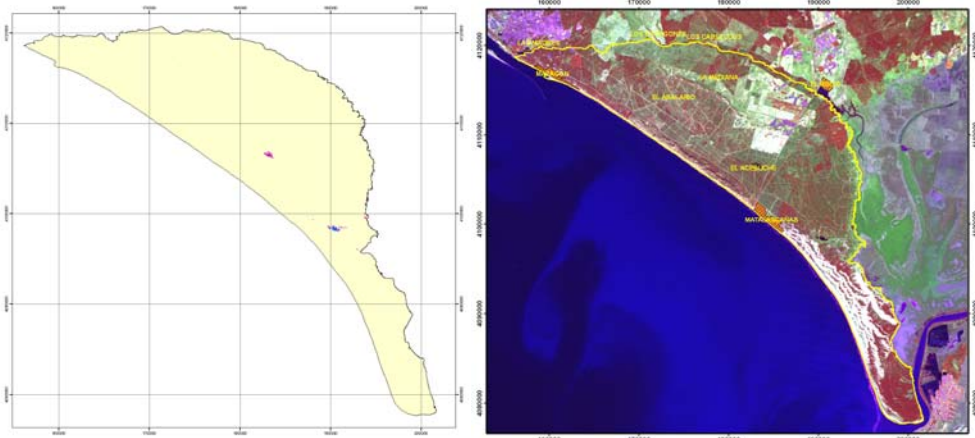


**18/02/1997**

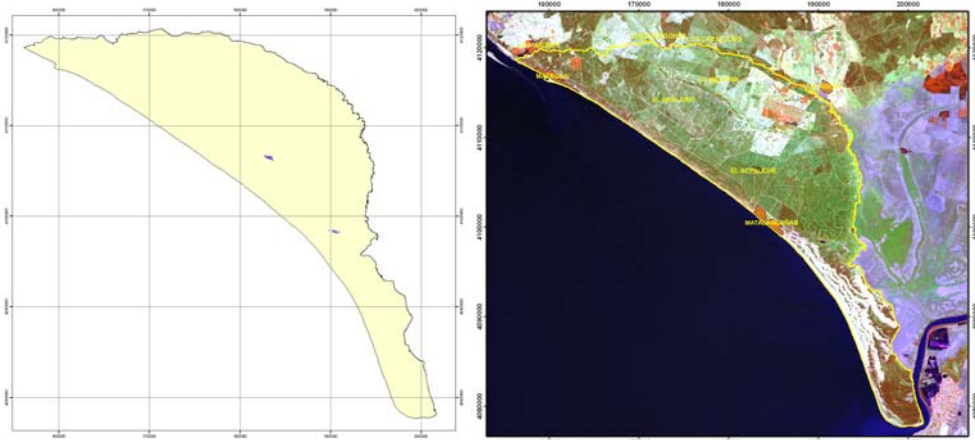
■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas



**09/03/1998**

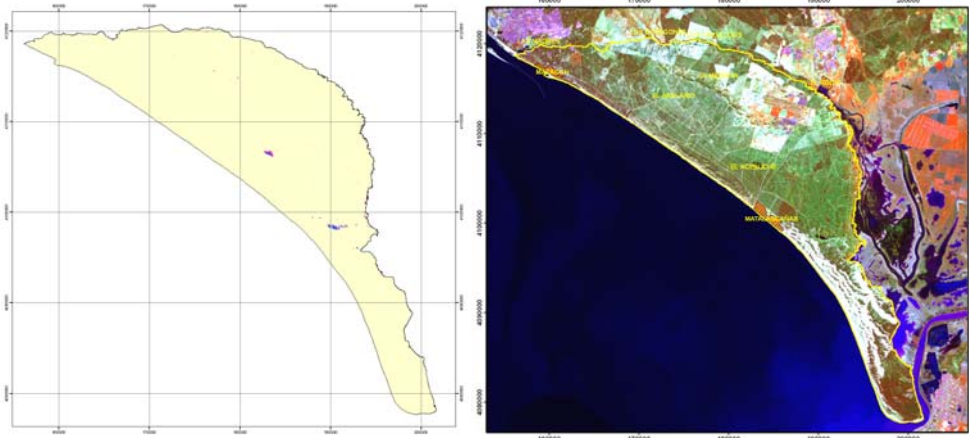


**07/01/1999**

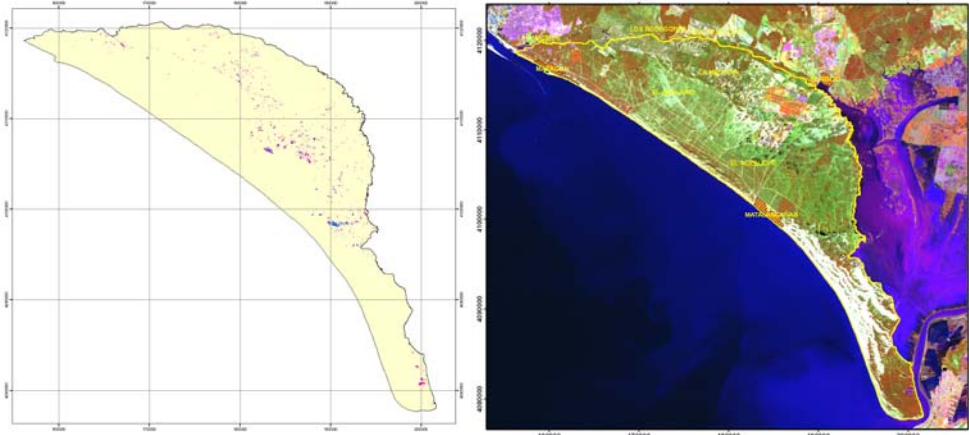


**18/07/1999**

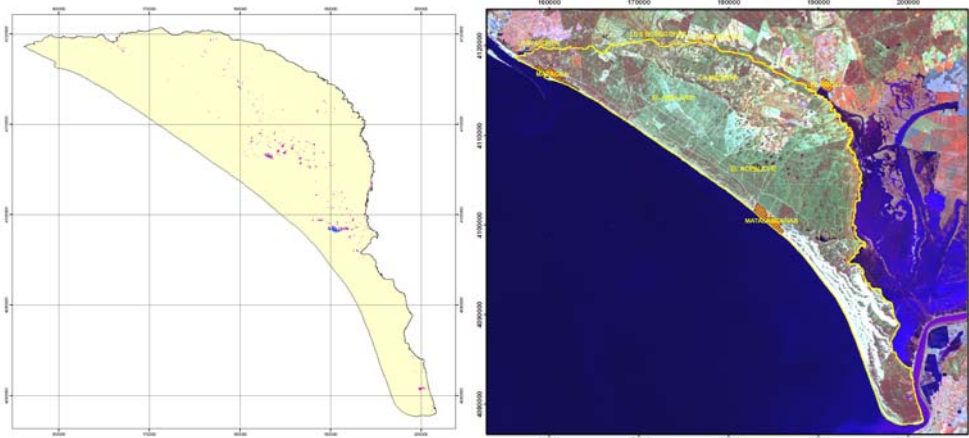
■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas



**19/02/2000**

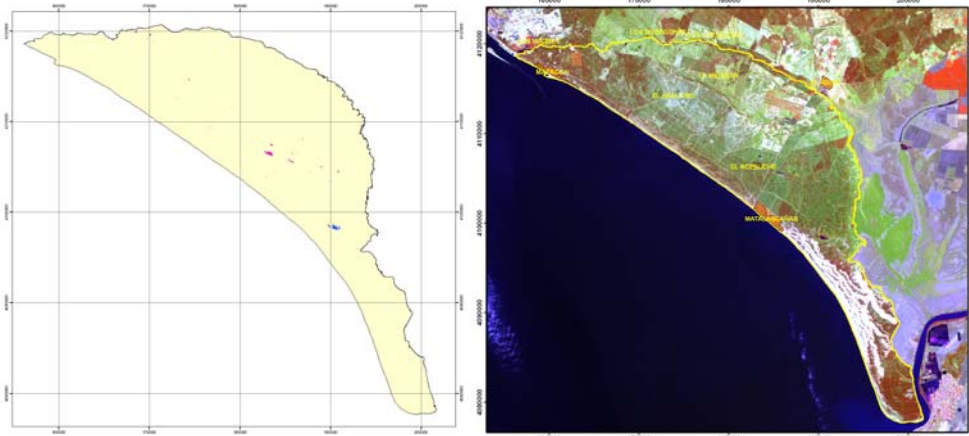


**20/01/2001**

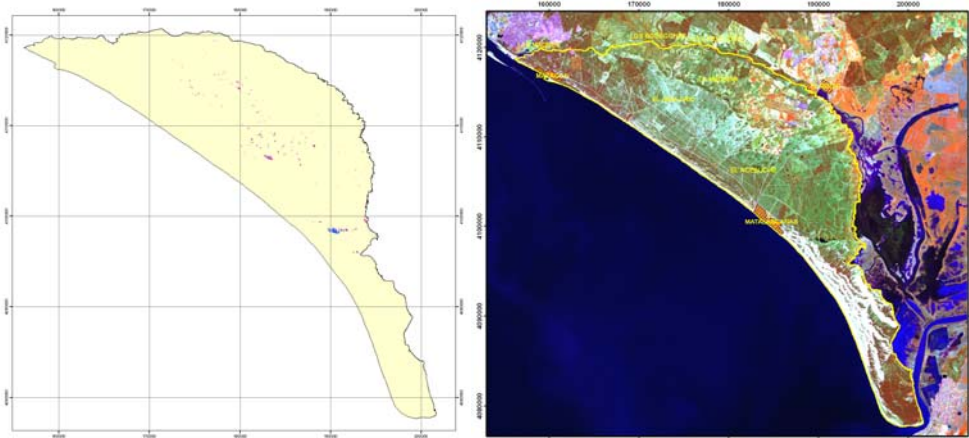


**10/04/2001**

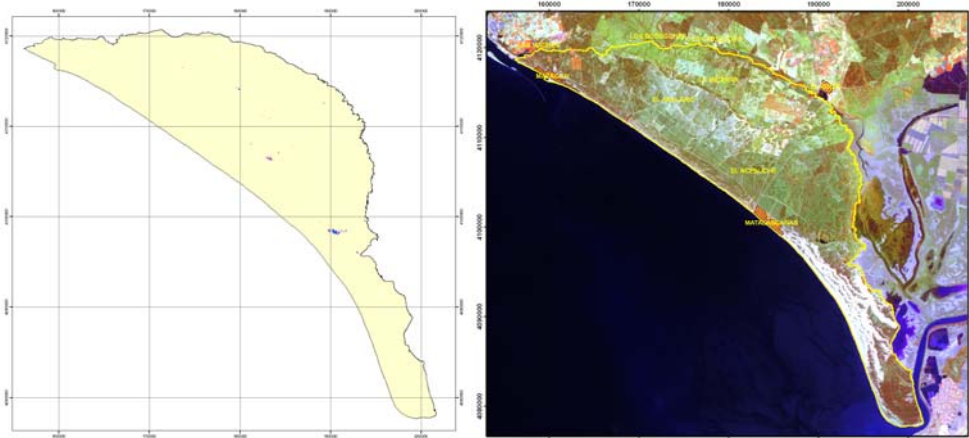
■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas



**01/09/2001**

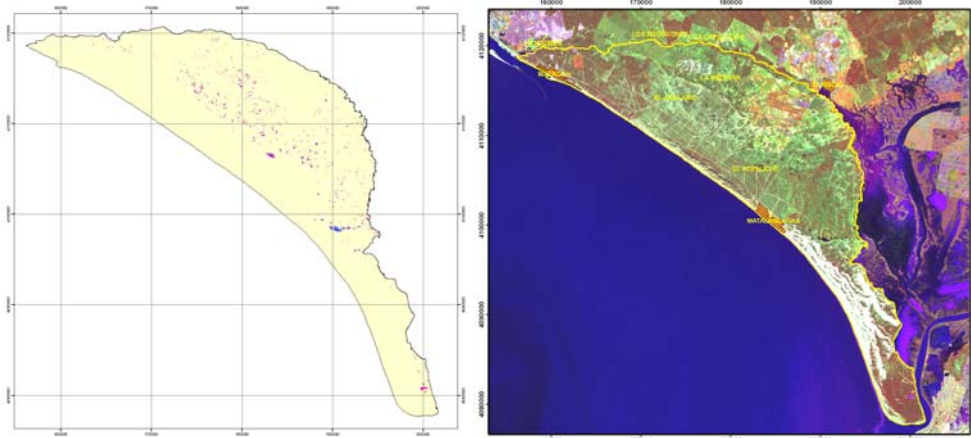


**24/02/2002**

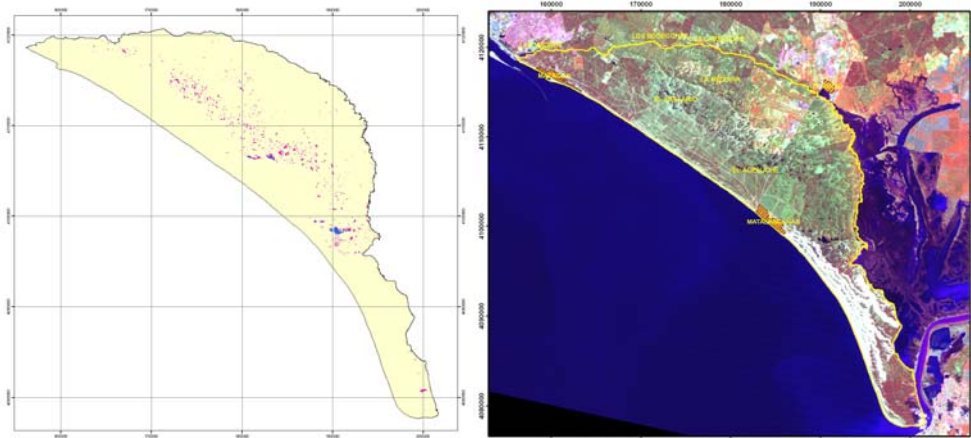


**16/06/2002**

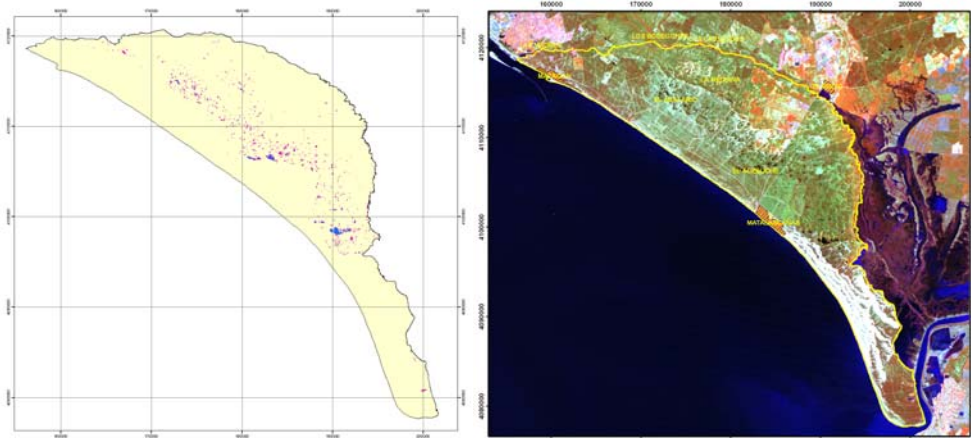
**■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas**



**10/01/2003**

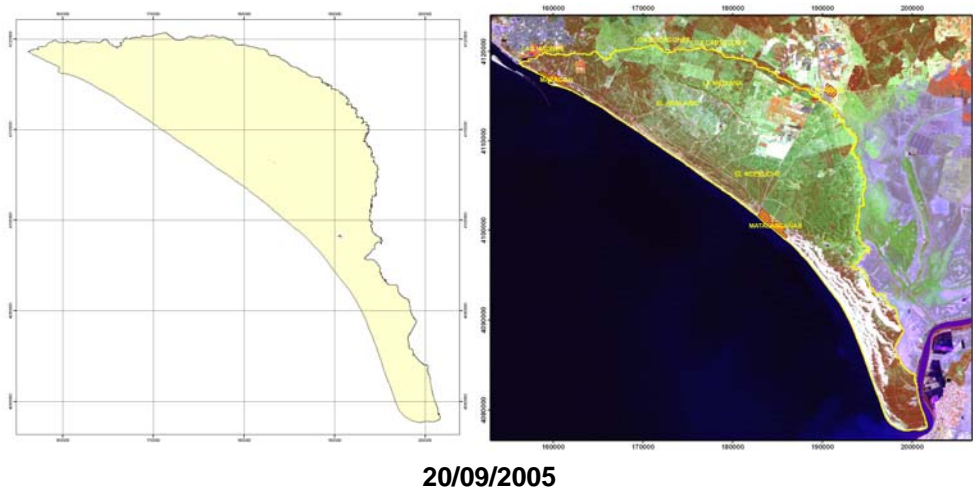
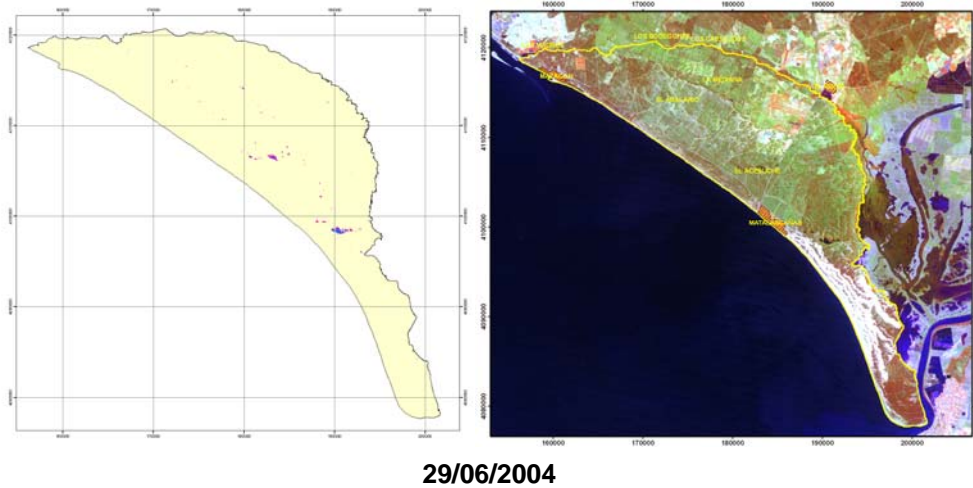


**25/03/2004**



**26/04/2004**

■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas



■ Cuerpo de agua    ■ Zonas encharcadas

Figura 24. Clasificación digital de la serie de imágenes Landsat

#### ***4.4 Cartografía de las formaciones palustres y zonas encharcadas a partir de la serie temporal Landsat***

Los resultados de la clasificación supervisada de la serie temporal de imágenes Landsat ha permitido estimar la superficie de lámina de agua de las lagunas y zonas de encharcamiento del MELAD a lo largo del periodo 1985–2005 (tabla 6) (figura 25).



<b>Fecha</b>	<b>Superficie lámina de agua (ha)</b>	<b>Superficie zonas encharcadas (ha)</b>	<b>TOTAL</b>
01/02/1985	62,82	289,89	352,71
03/01/1986	47,97	71,19	119,16
07/02/1987	63,27	129,6	192,87
05/09/1988	24,12	45,36	69,48
17/04/1989	39,78	108,09	147,87
15/02/1990	313,74	458,1	771,84
16/08/1990	46,8	48,06	94,86
04/01/1992	51,57	56,97	108,54
07/02/1993	50,4	34,2	84,6
08/12/1993	40,41	55,71	96,12
14/03/1994	33,57	56,7	90,27
06/09/1994	14,4	4,95	19,35
12/01/1995	14,85	70,38	85,23
09/07/1996	64,89	86,67	151,56
18/02/1997	178,38	538,47	716,85
09/03/1998	81,99	556,56	638,55
07/01/1999	29,16	54,45	83,61
18/07/1999	23,58	25,2	48,78
19/02/2000	38,97	67,59	106,56
20/01/2001	82,53	498,69	581,04
10/04/2001	48,06	298,71	346,77
01/09/2001	24,84	63,9	88,74
24/02/2002	34,56	136,89	171,45
16/06/2002	31,59	39,15	70,74
10/01/2003	67,23	493,02	560,25
25/03/2004	73,8	642,24	716,04
26/04/2004	134,82	624,78	759,6
29/06/2004	45,18	129,06	174,24
20/09/2005	3,6	5,4	9

Tabla 6. Superficies correspondientes a la lámina de agua y zonas encharcadas del MELAD durante el periodo 1985-2005

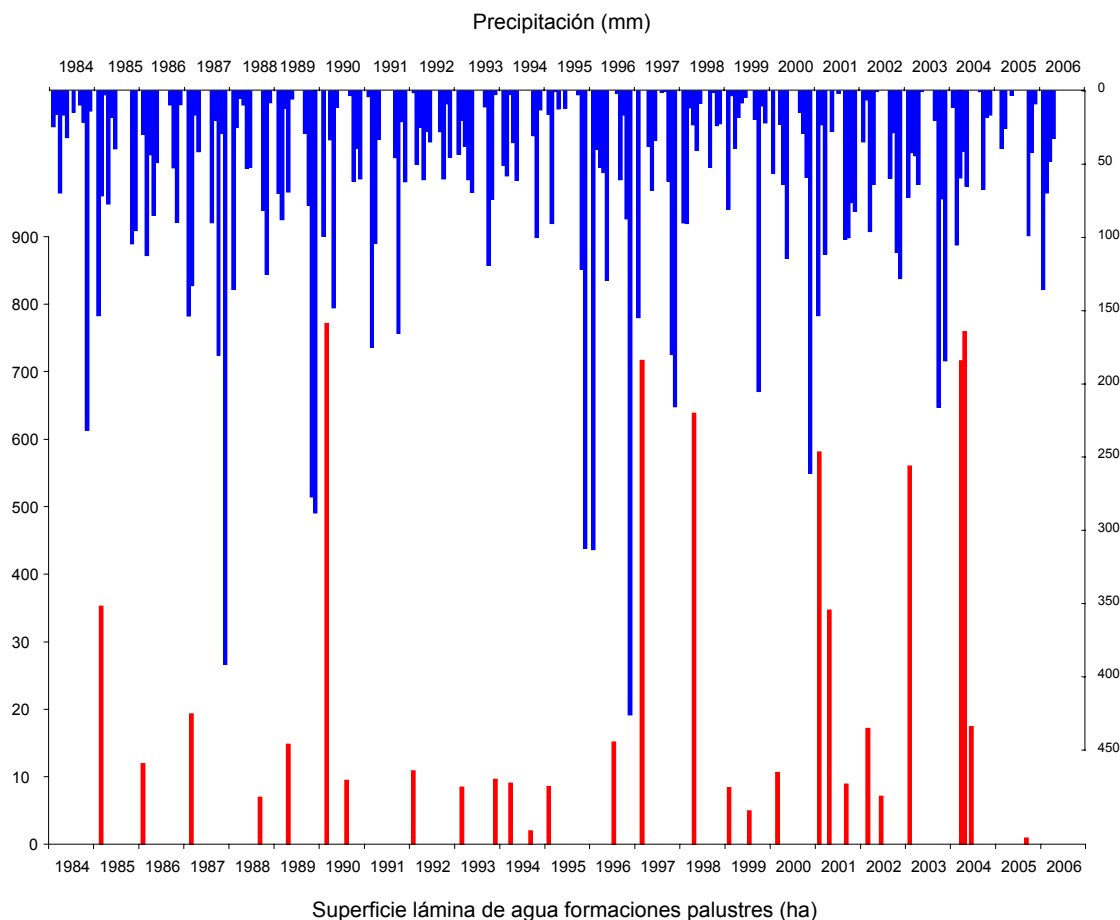


Figura 25. Precipitación y superficie de lámina de agua de las formaciones palustres derivada de la serie Landsat para el periodo 1985–2005

#### 4.5 Características del Sensor Hiperespectral AHS

La teledetección hiperespectral puede definirse como la adquisición simultánea de imágenes en numerosas bandas espectrales estrechas (del orden de pocos nanómetros) y contiguas desde una plataforma de avión o satélite. La información hiperespectral, una vez corregida y calibrada de los efectos atmosféricos, permite reconstruir la curva espectral de los materiales observados con una resolución suficiente para detectar sus rasgos espectrales diagnósticos (figura 26). Cuanto menor es la anchura de las bandas, mejor es la capacidad del sensor para medir los rasgos de absorción que permiten identificar parámetros críticos de la vegetación y los suelos que no son perceptibles en la información registrada por los sensores convencionales.

Los sistemas avanzados de tipo hiperespectral o espectrómetros de imagen (IS) permiten caracterizar de forma más precisa los materiales superficiales en base a los

patrones de reflectividad resultantes de la interacción de la energía solar con la estructura de dichos materiales. Los primeros estudios de espectroscopia de imagen desde plataformas aeroportadas se iniciaron a principios de los años ochenta del pasado siglo. La instalación de este tipo de instrumentos de alta resolución espectral en misiones espaciales, como Hyperion y Chris\_Proba y Mars Global Surveyor ha supuesto un importante avance tanto en la electrónica de los instrumentos como en el sistema de almacenamiento de datos.

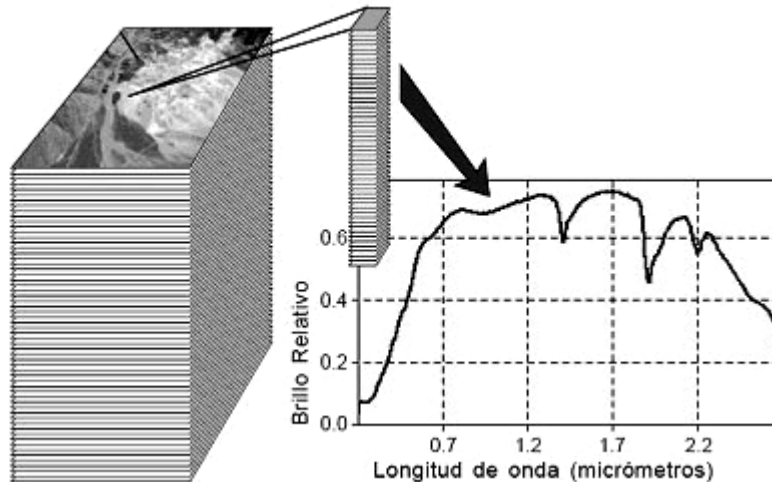


Figura 26. Imagen hiperespectral. En <http://www.microimages.com>

El desarrollo en los últimos años de métodos de calibración y validación de los datos, y de modelos de simulación de variables naturales ha ampliado notablemente el campo de investigación en la determinación de los parámetros biogeofísicos de los cuerpos de agua, de la vegetación y de los suelos. Estos avances han permitido el desarrollo de numerosas aplicaciones medioambientales.

En el ámbito de este estudio, la utilización de datos hiperespectrales ha dado buenos resultados en el estudio de suelos contaminados por metales pesados a partir de datos HyMap en áreas próximas a Doñana (Antón-Pacheco, C. *et al.*, 2002) y en el estudio del grado trófico del embalse de Ribarroja a partir de datos CASI-2 (Ruiz-Verdú, A. *et al.*, 2001).

El AHS (Airborne Hyperspectral Scanner) es un espectrómetro de imagen tipo “whiskbroom” opto-electrónico aeroportado de barrido mecánico con 80 bandas espectrales, desarrollado por SenSytech (actualmente *Group Argon ST*) (<http://www.argonst.com/>) y adquirido por el INTA en el año 2003. Las características técnicas del sensor se definen por su resolución espacial, radiométrica, espectral y

temporal, así como por el tipo de geometría de adquisición (G. Rejas et al., 2004; Fernández-Renau et al, 2005). El AHS registra datos de una línea del terreno (across-track) perpendicular a la dirección de avance del avión (along-track). El diseño óptico está compuesto por un espejo giratorio cuya rotación produce el barrido de la superficie observada en dirección perpendicular a la trayectoria del avión. Cada giro del espejo adquiere una línea de imagen del terreno, de manera que el avance del avión a una velocidad acoplada a la del espejo del sensor, permite la adquisición de la imagen mediante líneas consecutivas en la dirección del vuelo.

La energía reflejada y/o emitida por la superficie del suelo que se registra en el espejo, se fracciona mediante un sistema de filtros dicróicos en diferentes longitudes de onda en las ventanas atmosféricas del visible al infrarrojo térmico, en 5 espectrómetros o “puertos” individuales (Tabla 7). Estos espectrómetros constan de distintos detectores: una matriz lineal de fotodiodos de silicio para el puerto 1, de InGaAs en el puerto 2A, de InSb en los puertos 2 y 3, y MCT en el puerto 4, estos últimos refrigerados con nitrógeno líquido a 77K. Las diferentes bandas del sensor se forman separando la energía mediante rejillas de difracción según su longitud de onda. Cada banda tiene una curva de responsividad espectral, que típicamente es de forma gaussiana, y se caracteriza por su centro espectral de máxima respuesta y un ancho de banda o Full Width Half Maximum (FWHM). Tanto el número de bandas como su FWHM condicionan la resolución espectral del sensor y el muestreo de la signatura espectral.

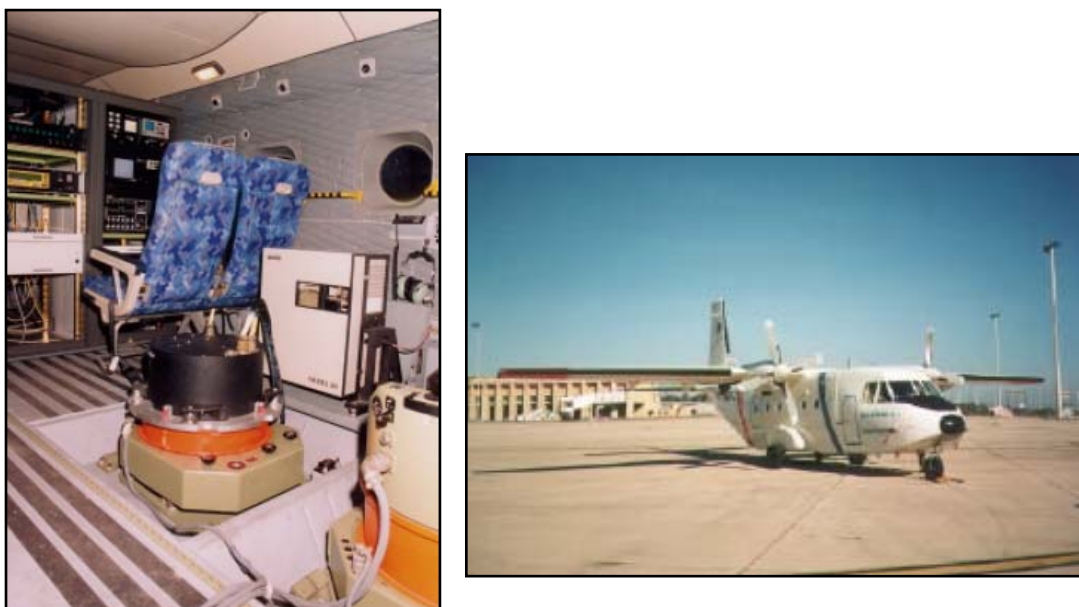


Figura 27. El sensor AHS instalado en un avión CASA 212-200 del INTA

La geometría interna del AHS está determinada por el FOV (Field of View), que es de 1,5708 rad (90°) y el IFOV (*Instantaneous FOV*) de 2.5 mrad. El IFOV del sensor junto a la velocidad de barrido determina la cobertura y resoluciones espaciales a las que se pueden registrar los datos. Las velocidades de barrido del espejo son de 6,25; 8,3; 12,5; 16,7; 25; 40 rps y permiten obtener resoluciones espaciales que van de 2,4 a 13,7 m en diversas alturas de vuelo. Normalmente los sensores aeroportados barren ángulos de 90° a 120°, mientras los satélites debido a su mayor altura necesitan ángulos mucho menores, del orden de 10° a 20° para cubrir regiones mucho mas extensas. Debido a que la distancia del sensor al terreno aumenta hacia los bordes de la línea de barrido, la resolución espacial y las distorsiones geométricas de la imagen se incrementan también en estas áreas. La anchura de la línea varía con la altura de vuelo al variar el campo de visión. Cada línea se registra en 750 píxeles.

	<b>Puerto 1 VIS / NIR</b>	<b>Puerto 2A SWIR</b>	<b>Puerto 2 SWIR</b>	<b>Puerto 3 MIR</b>	<b>Puerto 4 TIR</b>
<b>Rango espectral (micrómetros)</b>	0,442 - 1,019	1,491 – 1,650	2,024 – 2,498	3,03 – 5,41	7,95 – 13,17
<b>Ancho espectral (FWHM nm.)</b>	28	160	13	30 - 40	400 - 550
<b><math>\lambda/\Delta\lambda</math> (mínimo)</b>	~16	~9	~156	~9	~17
<b>Nº de bandas</b>	20	1	42	7	10

Tabla 7. Configuración espectral del sensor AHS

La señal analógica de salida es amplificada por un sistema electrónico y digitalizada en 16 bits. Las fuentes de referencia interna son dos cuerpos negros cuya temperatura es seleccionable y son observados y registrados en cada línea de imagen, proporcionando un valor de "radiancia cero" en los canales reflectivos (1, 2 y 2A) y niveles de referencia para la calibración de los canales "emisivos" de los puertos 3 y 4.

#### **4.6 Campañas de Vuelos AHS**

Se han realizado tres campañas de vuelos en abril y septiembre de 2004, y en septiembre de 2005 cubriendo parte de la Marisma y la totalidad del MELAD. Se planificaron 6 líneas de vuelos (figura 28) con una resolución espacial preferencial de 6,5 m. En la planificación se tuvo en cuenta la relación entre la superficie de terreno y el número de pasadas, cobertura lateral, solape transversal y rumbo de vuelo respecto al azimut solar.

Las campañas de 2004 se realizaron el 27 de abril y el 21 de septiembre de 2004, adaptando para cada fecha la hora local de vuelo a la posición solar requerida. Se registraron 5 líneas en abril y 6 líneas en septiembre. Para ambas campañas se repitieron dos líneas de vuelo sobre el sector de Santa Olalla en pasadas a 4,5 m de resolución. Debido a problemas técnicos del puerto 2 del sensor AHS no se registraron datos en el segmento SWIR en ninguna de las dos campañas. La tercera campaña se realizó el 27 de septiembre de 2005, coincidiendo con el máximo estiaje. La planificación de las pasadas fue similar a las realizadas en el 2004 en lo referente a la cobertura del MELAD aunque se realizó un recubrimiento completo de la Marisma por interés de la Estación Biológica de Doñana.

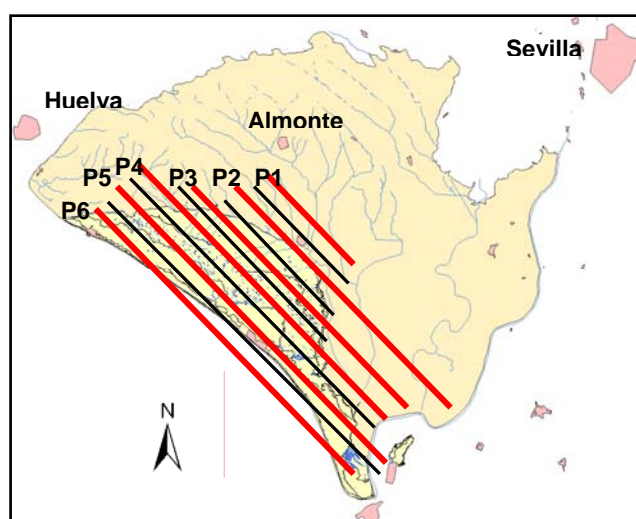


Figura 28. Esquema de las pasadas AHS (— 2004 — 2005)

#### **4.7 Procesado de los datos AHS**

Los valores originales de la imagen hiperespectral deben ser convertidos a reflectividad con objeto de que esta información sea comparable con los datos de la espectrorradiometría de campo o con los espectros de laboratorio. Las medidas registradas por el sensor dependen de las características de los detectores, de la geometría de iluminación de la superficie del terreno y de las condiciones atmosféricas. La conversión de estos registros a reflectividad requiere un proceso previo de calibración a radiancia en el sensor.

#### 4.7.1 Calibración a radiancia en el sensor

La radiación registrada en cada canal es convertida en una señal eléctrica que es escalada y cuantificada en valores digitales. Estos valores digitales son convertidos a valores de radiancia a partir de los coeficientes de calibración del sensor. Los niveles digitales originales se han calibrado mediante coeficientes de calibración de las bandas reflectivas VIS, NIR y SWIR (puertos 1 y 2 y 2A) obtenidos en el Laboratorio de Teledetección del INTA utilizando una “esfera integradora” de calibración USS 400 (*Labsphere*) (<http://www.labsphere.com/>) cubierta con Spectraflex (*Labsphere*). Las bandas térmicas (puertos 3 y 4) se calibran de manera continua durante la adquisición de las imágenes, tomando como fuentes de referencia los dos cuerpos negros integrados en el módulo detector. Para ello se ha aplicado una interpolación lineal utilizando el nivel digital registrado y la temperatura asignada a los cuerpos negros (10 y 50 °C en las campañas) antes y después de cada línea escaneada (figura 29).

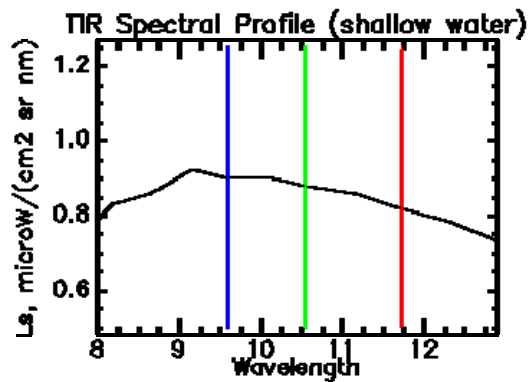


Figura 29. Radiancias en el sensor de las bandas térmicas

#### 4.7.2 Calibración a reflectividad

La corrección de los efectos atmosféricos en los valores de radiancia se puede realizar mediante métodos basados en la imagen y métodos basados en modelos de transferencia radiativa. Entre los métodos basados en modelos atmosféricos de transferencia radiativa se pueden citar: *Atrem* (Gao, B. C. *et al.*, 1993; Clark, R.N. *et al.*, 1993, Goetz, A.F.H. *et al.*, 1997, Goetz, A.F.H. *et al.*, 1997), *6S* (Vermote, E.F. *et al.*, 1997), *ATCOR4* (Berk, A. *et al.*, 1999), *Flaash* (Spectral Sciences, Inc; U.S. Air Force Research Laboratory y Spectral Information Technology Application Centre, 2004). Estos modelos calculan los efectos de radiancia de la elevación solar en la escena, así como la dispersión y absorción atmosférica. Otros procedimientos para convertir los datos de radiancia en reflectividad absoluta utilizan la espectrorradiometría registrada

“in situ” en el momento del vuelo. El *Método Lineal Empírico (Empirical Line)* (Conel, J.E. *et al.*, 1987) utiliza los valores de reflectividad de varias áreas de la imagen con respuestas diferentes (áreas claras y oscuras). Esta técnica utiliza la radiancia de la imagen y los valores de reflectividad medidos “in situ” de las áreas seleccionadas para calcular la ecuación lineal que relaciona ambos valores para cada banda de la imagen y permite convertir los valores de radiancia en reflectividad.

De los datos registrados en todas las campañas, se han corregido las bandas reflectivas del visible e infrarrojo próximo utilizando la herramienta de corrección radiométrica ATCOR4 para convertir las radiancias en el sensor en valores de reflectividad lambertiana del terreno. Posteriormente se ha aplicado el algoritmo “Empirical Line” (Smith, G. M. y Milton, E. J., 1999) mediante firmas espectrales de superficies “brillantes” y “oscuras” de la zona de estudio, adquiridas en las campañas de espectrorradiometría de campo de forma simultánea a cada vuelo. Como resultado se han eliminado los efectos atmosféricos y de iluminación diferencial entre pasadas y campañas. Las medidas radiométricas para calibrar los datos se han registrado sobre varias áreas correspondientes a superficies de agua de las lagunas de Santa Olalla y La Dulce, y en varios puntos de las arenas de los mantos eólicos (figura 30).

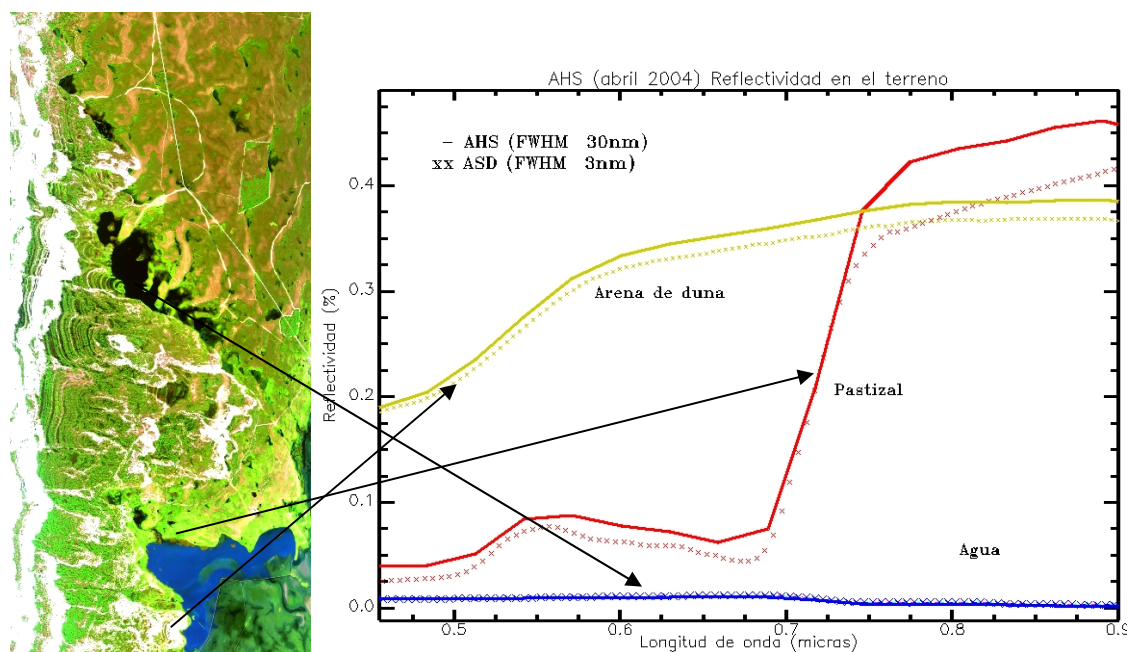


Figura 30. Signaturas espectrales seleccionadas para la corrección de los datos de radiancia AHS a reflectividad



### 4.7.3 Georreferenciación y generación de mosaicos

El sistema inercial de navegación (modulo GPS/INS) instalado en la plataforma aérea es un *Applanix POS/AV 410* (<http://www.applanix.com/>) que proporciona parámetros de posición y actitud del sensor durante el registro de las imágenes. Esto hace posible la georreferenciación de una manera directa sin necesidad de tomar puntos de control de la zona sobrevolada.

La corrección de las distorsiones sufridas por las imágenes AHS durante su adquisición debido a los movimientos de la plataforma y del sensor (figura 31), se han abordado mediante una corrección paramétrica utilizando el software de geocodificación directa PARGE (<http://www.rese.ch/products.html>). 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 volada. Los datos de posición (X, Y, Z) y de alabeo, cabeceo y azimut son registrados por el sistema inercial. Los datos GPS adquiridos han sido procesados por el INTA para el cálculo de la trayectoria aplicando correcciones diferenciales en post-proceso, utilizando para ello dos estaciones de referencia GPS permanentes enmarcadas dentro del Proyecto IBEREF ([www.iberef-gps.com](http://www.iberef-gps.com)). El MDT utilizado en el proceso de georreferenciación ha sido generado 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 6,5 m y 4 metros para las pasadas de 4,5 m.

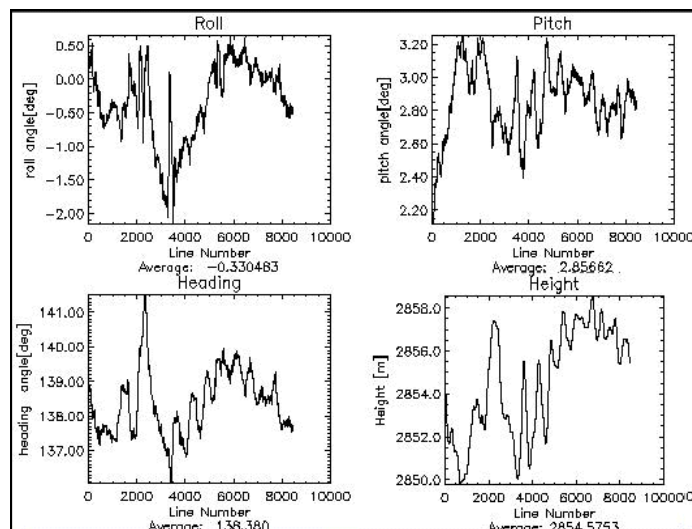


Figura 31. Parámetros de movimiento de la plataforma aérea medidos con el GPS/IN SPOS/AV 410 para la pasada 3 a 6,8 m

Una vez realizadas las correcciones radiométricas y geométricas, se han generado imágenes georreferenciadas en proyección UTM, Datum ED50 con un error medio cuadrático (RMS) estimado de 1 a 2 píxeles. Se ha efectuado la composición de los mosaicos correspondientes a partir de las pasadas registradas en cada campaña.

#### 4.8 Espectrorradiometría de campo

Las campañas de espectrorradiometría de campo se han efectuado de manera simultánea a la realización de los vuelos. Se ha utilizado el espectrorradiómetro *ASD FieldSpec* del Laboratorio de Teledetección de Estudios Hídricos del Centro de Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) en las campañas de abril de 2004 y septiembre de 2005 y el *GER 1500* del Servicio de Teledetección del INTA en la campaña de septiembre de 2004.

Las medidas radiométricas para calibrar los datos AHS se han registrado en varias áreas correspondientes a superficies de agua de las lagunas de Santa Olalla y La Dulce y en diversos sectores correspondientes a las arenas de los mantos eólicos (figuras 32 y 33). Las medidas de las cubiertas vegetales se han basado en la distribución horizontal de la vegetación: desde los pastizales y helófitos del borde de la laguna de Santa Olalla al matorral higrofito y al xerofítico en las zonas de topografía más elevada. Se han tomado medidas (figura 34) sobre helófitos (*Juncus maritimus*, *Scirpus holoschoenus*) y pastizales (*Panicum repens*, *Agrostis stolonifera*, *Cynodon dactylon*) en las zonas de borde de las lagunas, en áreas de monte negro (*Erica scoparia*, *Ulex minor*, *Pteridium aquilinum*, *Pistacia lentiscus*, *Rubus ulmifolius*, *Smilax aspera*, *Ulex australis*) y en monte blanco (*Halimium halimifolium*, *Stauracanthus genistoides*, *Rosmarinus officinalis*).



Figura 32. Medidas radiométricas en laguna de Santa Olalla (a) y arenas de mantos eólicos (b) (espectrorradiómetro GER 1500 del Servicio de Teledetección del INTA)



Figura 33. Medidas radiométricas en laguna de Santa Olalla (a) y arenas de mantos eólicos (b) (espectrorradiómetro ASD FieldSpec del Laboratorio de Teledetección del CEDEX)

Además de la propia lectura radiométrica, se ha tomado en cada punto de medida la identificación de la especie, estado fisiológico y fenológico, fracción de cabida cubierta, comunidad vegetal a la que pertenece, así como lectura GPS y fotografía digital. En el Anexo 5 se adjuntan los ficheros con los puntos de medidas espectrorradiométricas y los espectros derivados de las mismas.



Figura 34. Medidas radiométricas en vegetación de monte blanco (a), monte negro (b), herbáceas (c). Detalle de medida radiométrica sobre *Ulex minor* (d)

#### 4.9 Cartografía de las formaciones palustres del MELAD durante al ciclo hidrológico 2004-2005

El registro de dos series completas del MELAD con imágenes AHS en las etapas de máxima variación interanual del año 2004 ha permitido cartografiar detalladamente las fluctuaciones de la lámina de agua para este periodo. El ciclo hidrológico 2003 - 2004 se caracterizó por una gran abundancia de precipitaciones. En la estación meteorológica del Palacio de Doñana (Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la EBD, <http://www-rbd.ebd.csic.es/Seguimiento/mediofisico.htm>), el valor de la precipitación acumulada durante el periodo octubre de 2003 - 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 adquirió durante la primavera de 2004 una cota excepcionalmente alta, alcanzándose el máximo de superficie inundada entre marzo y abril.

A partir de los mosaicos compuestos con las imágenes AHS georeferenciadas (figura 35) (mapa AHS1), se han generado los mapas correspondientes a las superficies de lámina de agua de los sistemas lagunares y zonas de encharcamiento del MELAD durante las tres fechas en que se realizaron los vuelos.

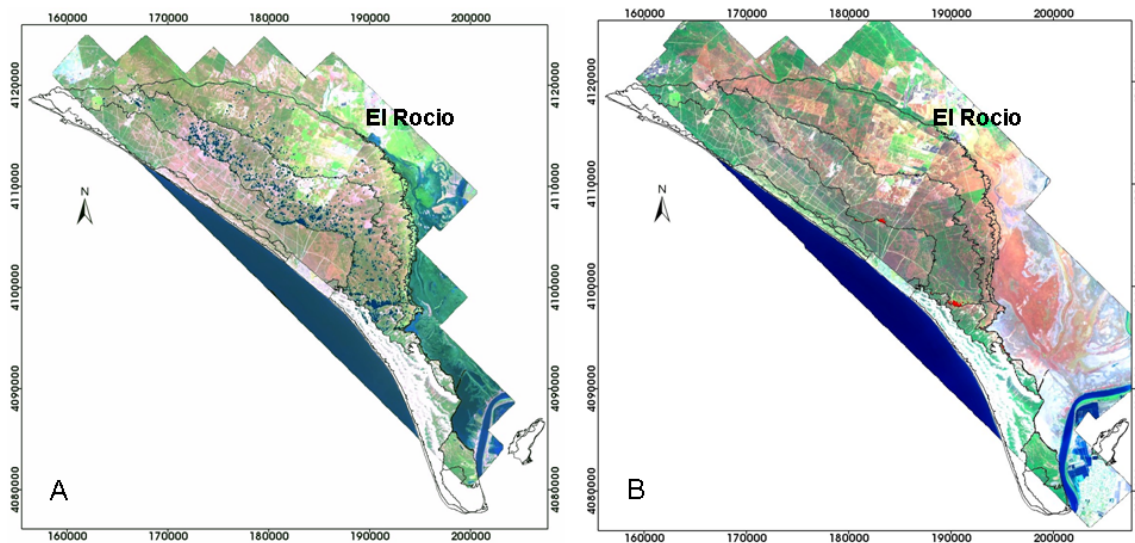


Figura 35. Mosaicos AHS del Manto Eólico Litoral de El Abalarío - Doñana. Datos AHS registrados en las etapas de máxima variación interanual del año 2004 (A: 27/04/2004, B: 21/09/2004)

Los resultados muestran que el nivel de la lámina de agua en abril de 2004 fue excepcionalmente alto, tanto en el sector oriental, correspondiente al Parque Nacional, como en el área central y occidental, correspondiente al Parque Natural. Sin embargo,

en la cartografía de las formaciones palustres realizada para esta fecha se pone de manifiesto el estado de desecación de un conjunto de lagunas situadas en el sector occidental (laguna del Río Oro, Carrizosa, Jiménez, La Vaca...). Asimismo, y a pesar del alto nivel de inundación en esta fecha, se han identificado niveles particularmente bajos en las lagunas del extremo occidental del cordón de lagunas peridunares de Santa Olalla, en áreas próximas a Matalascañas. Aunque el nivel se mantuvo hasta bien entrado el verano, en septiembre de 2004 la lámina de agua quedó limitada al cordón de lagunas de Santa Olalla, y a las alimentadas artificialmente del sector de El Acebuche.

La imagen AHS registrada el 27 de septiembre de 2005 (figura 36), al final del ciclo hidrológico seco 2004-2005, muestra una situación muy diferente a las registradas en el año 2004.

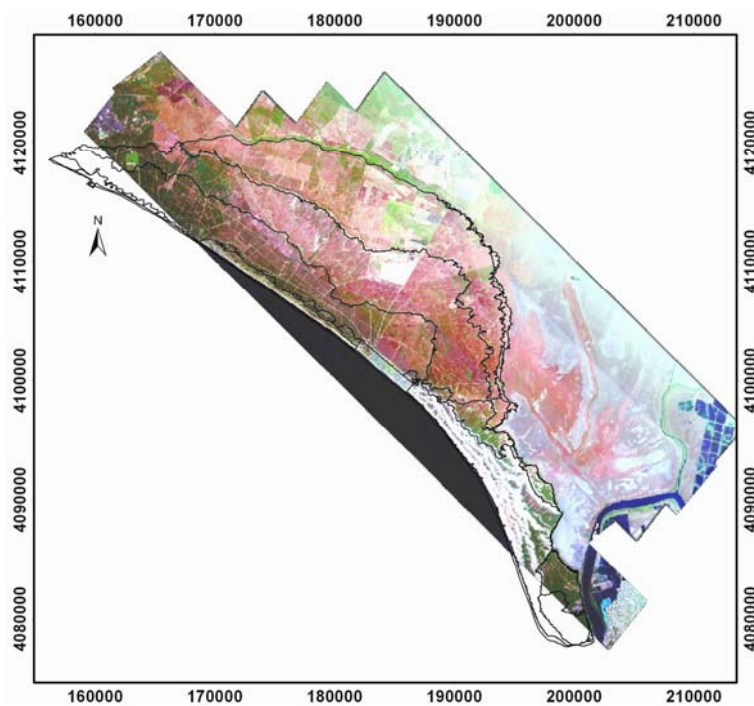


Figura 36. Mosaico AHS del Manto Eólico Litoral de El Abalarío - Doñana. Datos AHS registrados el 27/09/2005

El cálculo realizado a partir de estas cartografías (mapa AHS2) (figura 37) ha permitido determinar una extensión de lámina de agua de 747,68 ha en abril de 2004, de 63,82 ha en septiembre de 2004 y de 7,17 ha en septiembre de 2005 (tabla 8).

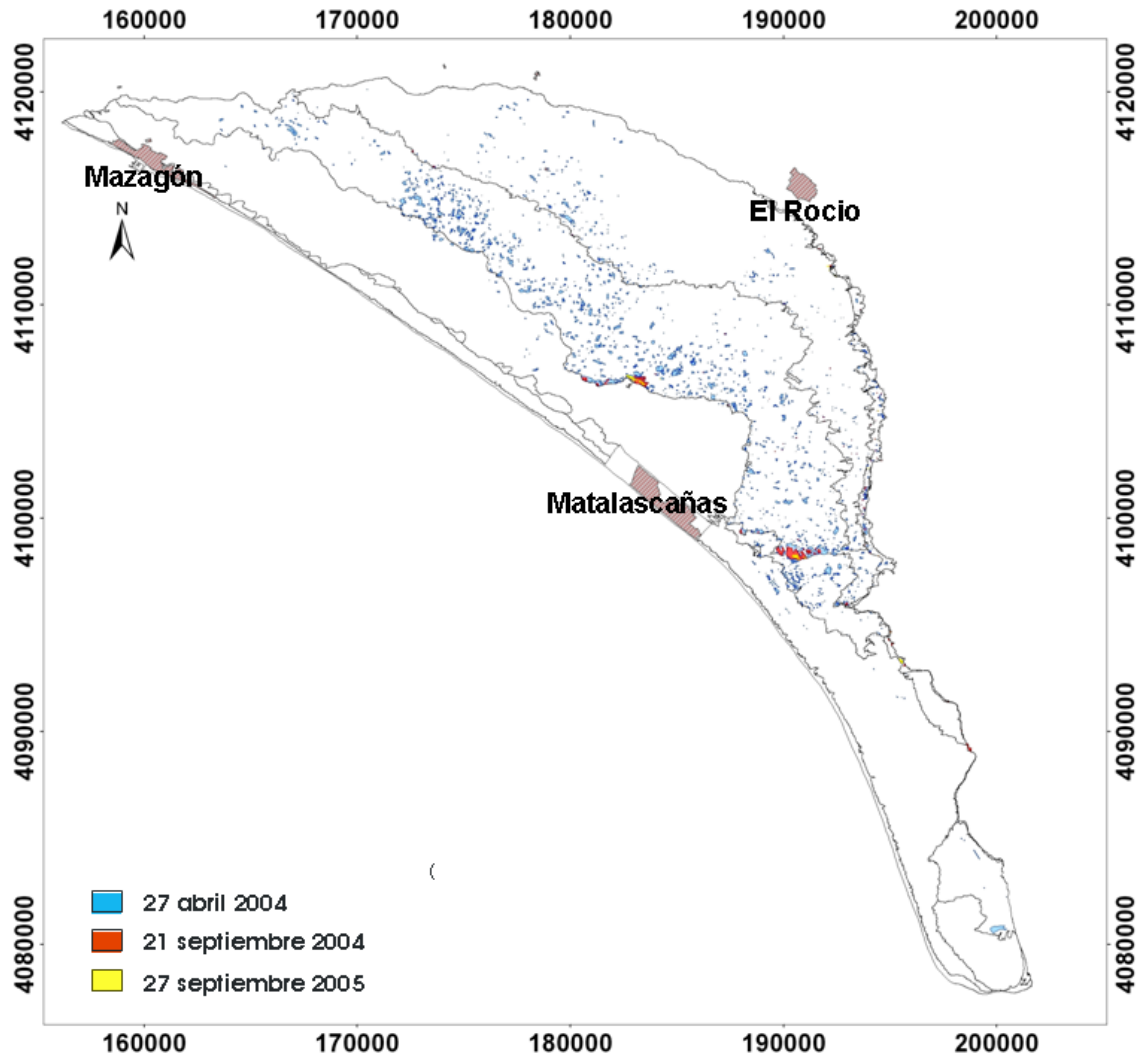


Figura 37. Cartografía de formaciones palustres y zonas de encharcamiento a partir de datos AHS durante el ciclo hidrológico 2004-2005

Fecha	Superficie de la lámina de agua (ha)
Abril 2004	747,68
Septiembre 2004	63,82
Septiembre 2005	7,17

Tabla 8. Extensión de de la lámina de agua en 2004 y 2005 calculada a partir de datos AHS

#### **4.10 Estudio piezométrico del sector de Santa Olalla**

El control de la evolución de los niveles piezométricos del acuífero Almonte-Marismas se realiza mediante una red general de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, en la que también participan otros organismos de la administración estatal y regional. Actualmente el IGME dispone de una red de piezómetros (algunos multitubo) en las inmediaciones del Complejo Lagunar Charco del Toro - Santa Olalla. En la figura 38 se representa la localización de los piezómetros. Todos estos piezómetros son monorejilla, con el filtro a diferentes profundidades, para estudiar la evolución y el comportamiento de los diferentes niveles piezométricos y con diferente carga hidráulica.

En este entorno, el IGME tiene instalados 7 sensores de nivel con registro continuo en 4 emplazamientos: 2 Orphimedes (sensor con sistema de burbujeo, figura 39) con registro cada 2 horas, y 5 Thalimedes (sensor con sistema de flotador y contrapeso, figura 40) cada 6 horas, ambos modelos de la marca OTT-Hydrometrie. La descarga de datos se realiza semestralmente mediante una unidad multifuncional recolectora de datos (VOTA-OTT) que se comunica con el sensor mediante un lector de infrarrojos.

Los objetivos principales del monitoreo de estos piezómetros son el de observar el funcionamiento del agua subterránea en el entorno de este complejo lagunar, su interacción con las lagunas y la posible influencia de los bombeos cercanos de la urbanización de Matalascañas. La posible afección de estos bombeos a las lagunas o el efecto sobre la vegetación ha sido anteriormente mencionada por diversos autores (Llamas, M.R. *et al*, 1987; Vela, A. *et al.* (op. cit.); Custodio, E. y Palancar, M. (op. cit.); Serrano, L. y Serrano, L., 1996; De Castro, F. y Muñoz-Reinoso, J.C., 1997; Zunzunegui, M. *et al.* (op. cit.); Muñoz-Reinoso, J.C., 2001; Lozano, E. (op. cit.), Muñoz-Reinoso, J.C. y García-Novo, F., 2005).

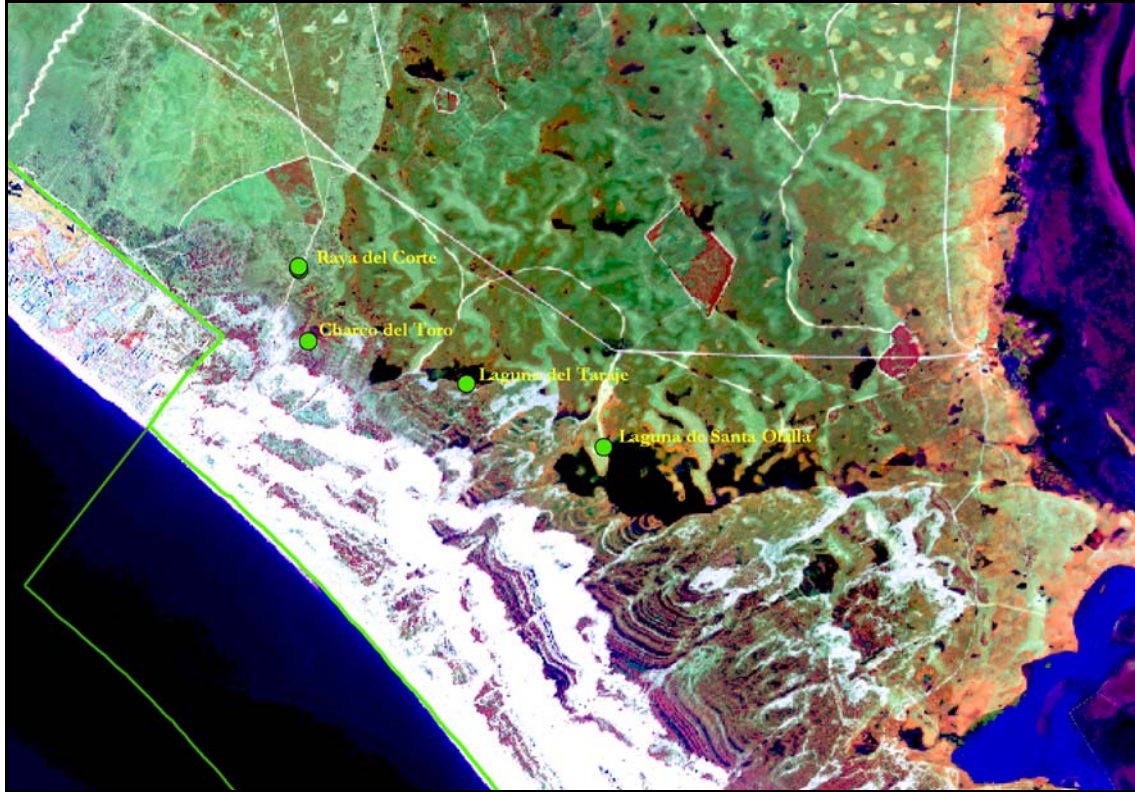


Figura 38. Situación de los piezómetros monorejilla en el Complejo Lagunar de Santa Olalla - Charco del Toro



Figura 39. Sensor Orphimed

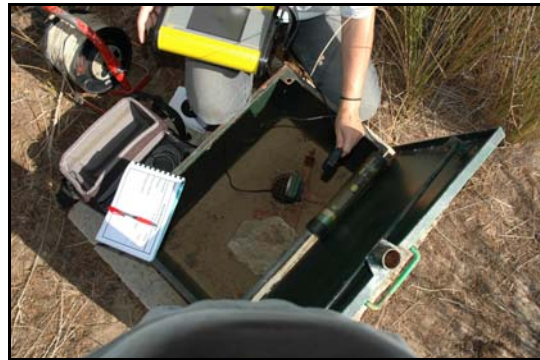


Figura 40. Sensor Thalimedes



La figura 41 muestra la evolución de los diferentes niveles piezométricos (que no freáticos) en cada uno de los piezómetros, confrontados con los datos de precipitación diaria de la estación meteorológica Palacio de Doñana (EM05; fuente: Datos del Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la Estación Biológica de Doñana, <http://www-rbd.ebd.csic.es/Seguimiento/mediofisico.htm>). También aparece representada la desviación acumulada de la precipitación con respecto a la media, para remarcar el carácter húmedo (tramo ascendente) o seco (tramo descendente) de la secuencia considerada.

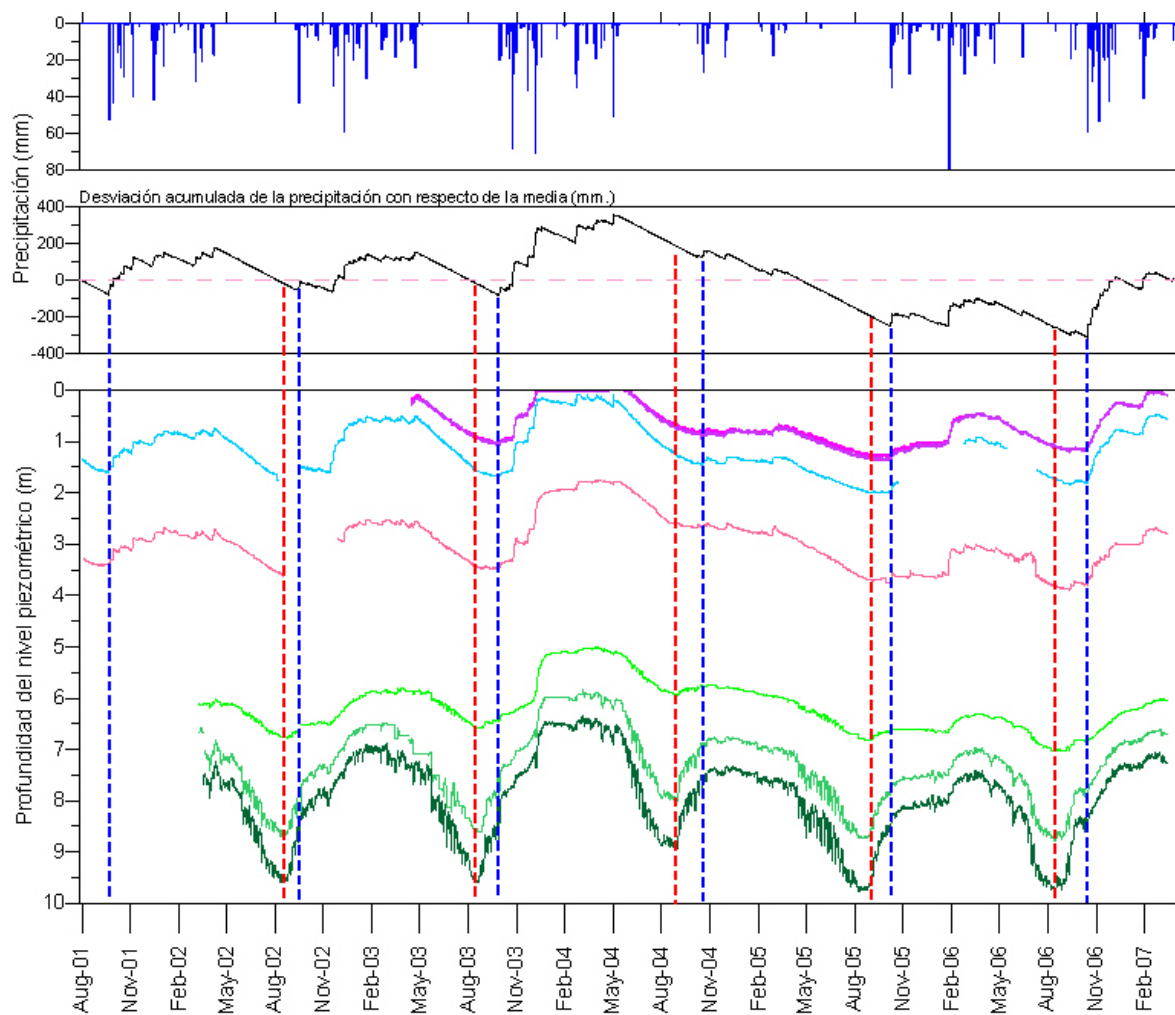


Figura 41. Evolución de los diferentes niveles piezométricos en el sector Laguna de Santa Olalla-Charco del Toro

- Santa Olalla 1; — Santa Olalla 2B; — Taraje; — Toro; — Raya del Corte 2;
- Raya del Corte 1; — Raya del Corte 3 (BG-8bis)
- Inicio de las precipitaciones después del verano
- Inicio de subida del nivel piezométrico después del verano

En estas gráficas se puede apreciar cómo los piezómetros que se localizan más alejados de la zona de bombeos de Matalascañas, mantienen una evolución semejante con respecto a la curva acumulada de la precipitación (efecto recarga), mientras que en los más cercanos a la zona de bombeo (Charco del Toro y sobre todo Raya del Corte) se ve distorsionada.

Se observa también cómo a finales de verano, en cada ciclo anual, se produce un significativo ascenso de los niveles piezométricos en el entorno del complejo lagunar, incluso en ausencia de lluvias, coincidiendo con el fin del periodo vacacional del mes de agosto, momento en el que disminuye drásticamente la población de Matalascañas y también el régimen de bombeos para su abastecimiento urbano.

Se aprecia cómo se produce un rápido ascenso en los piezómetros más profundos de Raya del Corte; en el somero de Raya del Corte y en el Charco del Toro estos ascensos son menores, mientras que en la laguna del Taraje y laguna de Santa Olalla no llegan a subir, si bien se ralentiza la bajada. En la figura 41 se resalta este hecho mediante unas líneas verticales.

La figura 42 es un detalle de los niveles piezométricos. Responde al régimen semanal de los bombeos para abastecimiento a Matalascañas, hasta tal punto que se detecta la mayor explotación del fin de semana (“efecto sierra”).

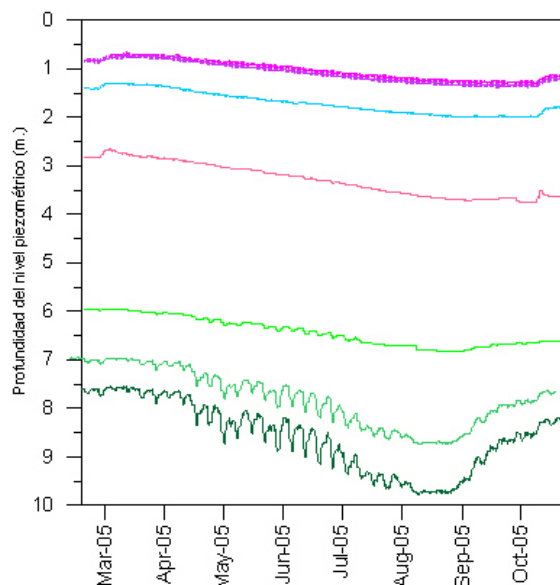


Figura 42. Detalle del efecto sierra observado en los en los piezómetros  
 — Santa Olalla 1; — Santa Olalla 2B; — Taraje; — Toro; — Raya del Corte 2  
 — Raya del Corte 1; — Raya del Corte 3 (BG-8bis)

En los piezómetros más profundos este efecto es mucho más acusado aunque también se refleja más atenuado en el piezómetro más somero de la Raya del Corte y en el del Charco del Toro (tabla 9).

En el sector de La Raya del Corte, se dispone de 3 piezómetros instalados con registro continuo a diferentes profundidades (tabla 9). Se observa la diferencia de la afección de los bombeos en la vertical de un mismo punto (figura 41).

<b>Toponimia IGME</b>	<b>NIPA</b>	<b>Posición_rejilla (cm.)</b>	<b>Organismo</b>
Laguna de Santa Olalla 1	114310037	67-72	IGME
Laguna de Santa Olalla 2B	114310038	44-46	IGME
Laguna del Taraje	114310034	11,4-14,2	CHG
Charco del Toro	114310036	11,4-14,2	CHG
Raya del Corte 1	114310039	37-45	IGME
Raya del Corte 2	114310040	18-22	IGME
Raya del Corte 3 (BG_8bis)	114310006	62-100	IGME

Tabla 9. Posición de las rejillas de los diferentes piezómetros  
NIPA = Número de Inventario de Punto de Agua

El nivel del piezómetro más profundo tiene unas oscilaciones mucho mayores que el más somero, lo que provoca una inversión del flujo natural en esta zona litoral; el flujo se va a producir de los niveles más someros hacia los más profundos (figura 43). Esto ocasiona un incremento de los gradientes hidráulicos entre las zonas superiores y profundas, provocando que el agua de recarga tienda a infiltrarse a mayor velocidad, y una vez en la zona saturada del acuífero, fluya hacia posiciones más profundas, por lo que en última instancia se ocasiona un descenso de los niveles freáticos. El resultado final es doble, por un lado el agua freática se aleja de las raíces de las plantas y por otro disminuye la frecuencia de inundación de las lagunas (Manzano, M., 1999).

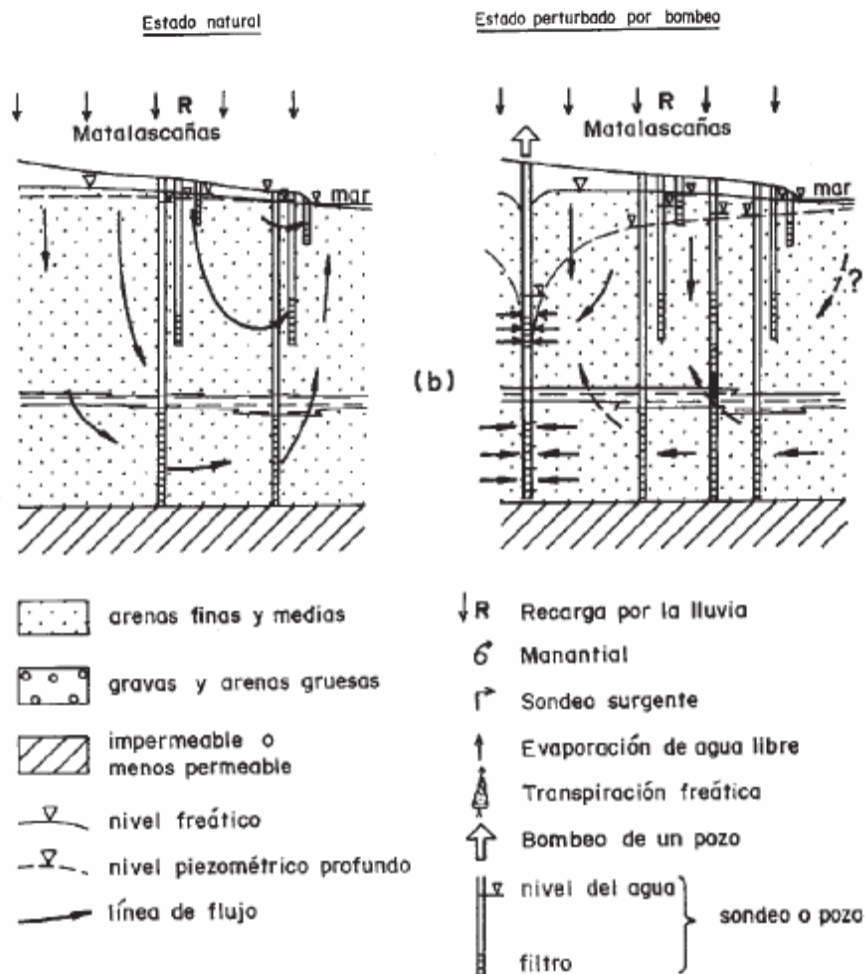


Figura 43. Efecto de los bombeos en el entorno de Matalascañas idealizado y simplificado (tomado de Custodio, E. y Palancar, M. 1995)

#### 4.10.1 Análisis detallado de los niveles piezométricos en las fechas coincidentes con los vuelos AHS

Se observa un descenso generalizado de los niveles en todo el sector de unos 2 m. desde mayo de 2004 (final interanual húmedo) hasta septiembre de 2005 (final interanual seco) debido a la escasez de lluvias (figura 44). En este período de 17 meses tan sólo se contabilizaron 173 mm (período más seco de los últimos 30 años).

Podemos observar cómo los niveles de inundación de las lagunas descienden a lo largo de este periodo (figuras 45 y 46). Se aprecia en el vuelo de septiembre de 2005 que todas las lagunas están secas a excepción de la laguna de Santa Olalla, que apenas tiene agua (figura 47).

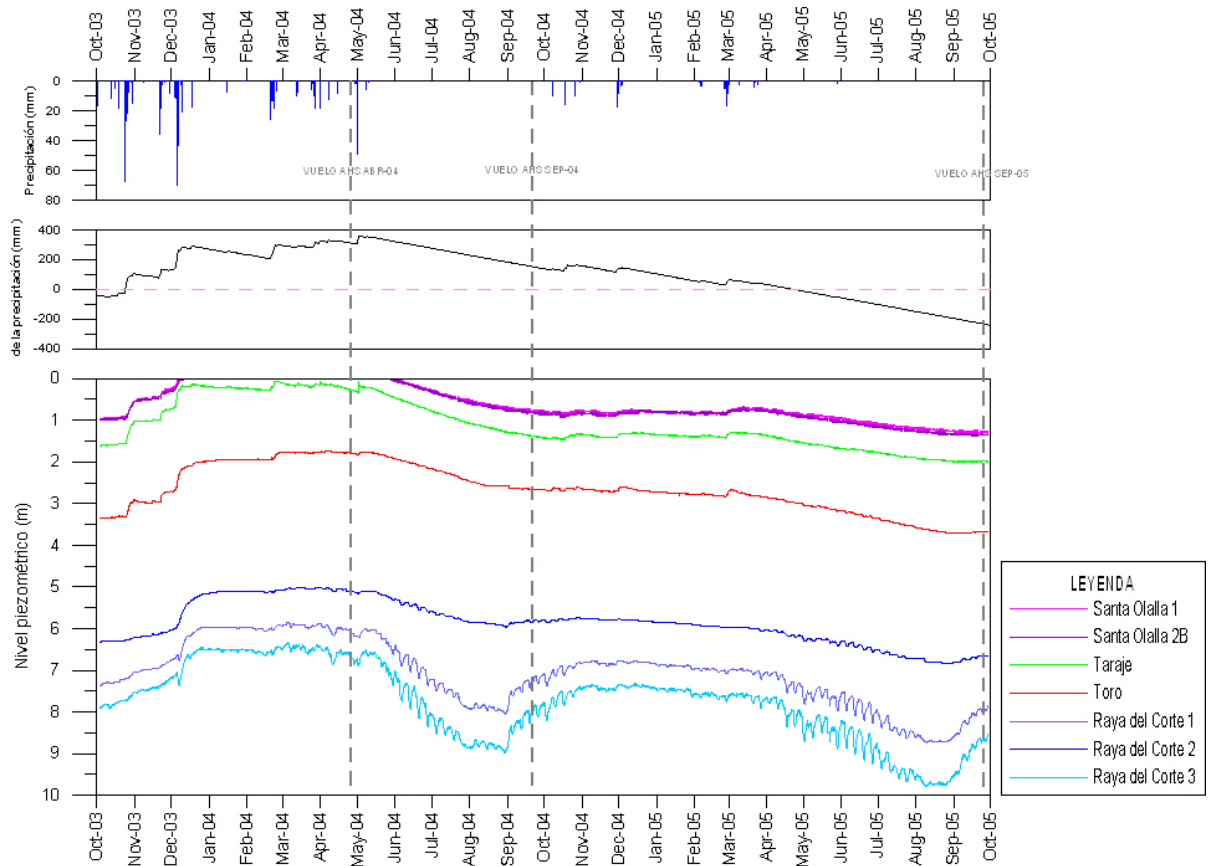


Figura 44. Precipitación y niveles del acuífero en 7 piezómetros del sector Santa Olalla durante 2004-2005

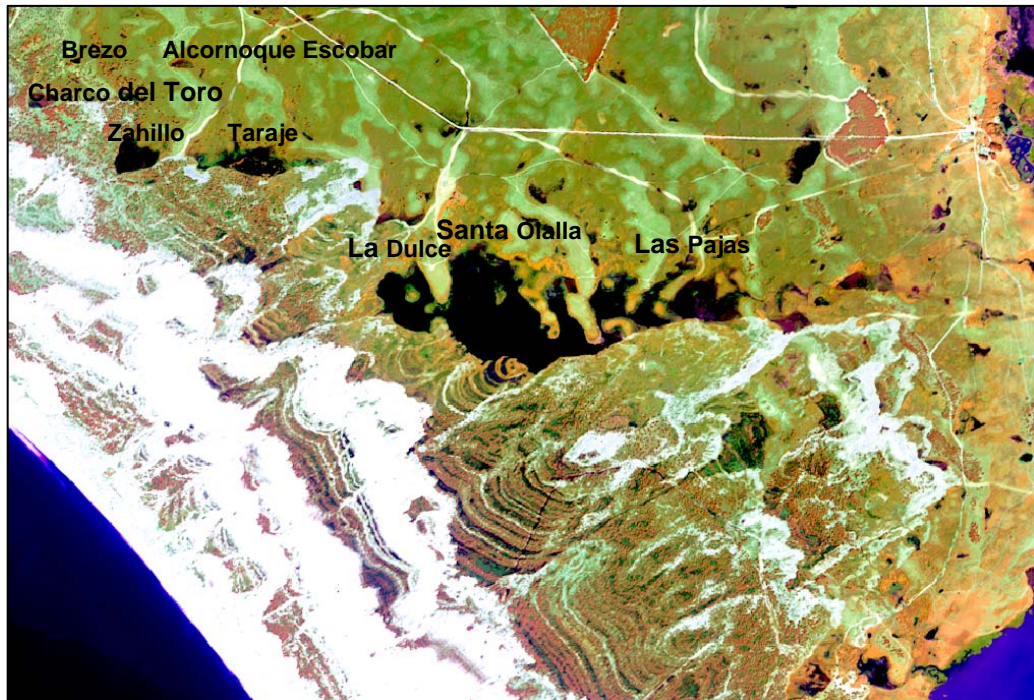


Figura 45. Sector de Santa Olalla (Imagen AHS, abril de 2004)

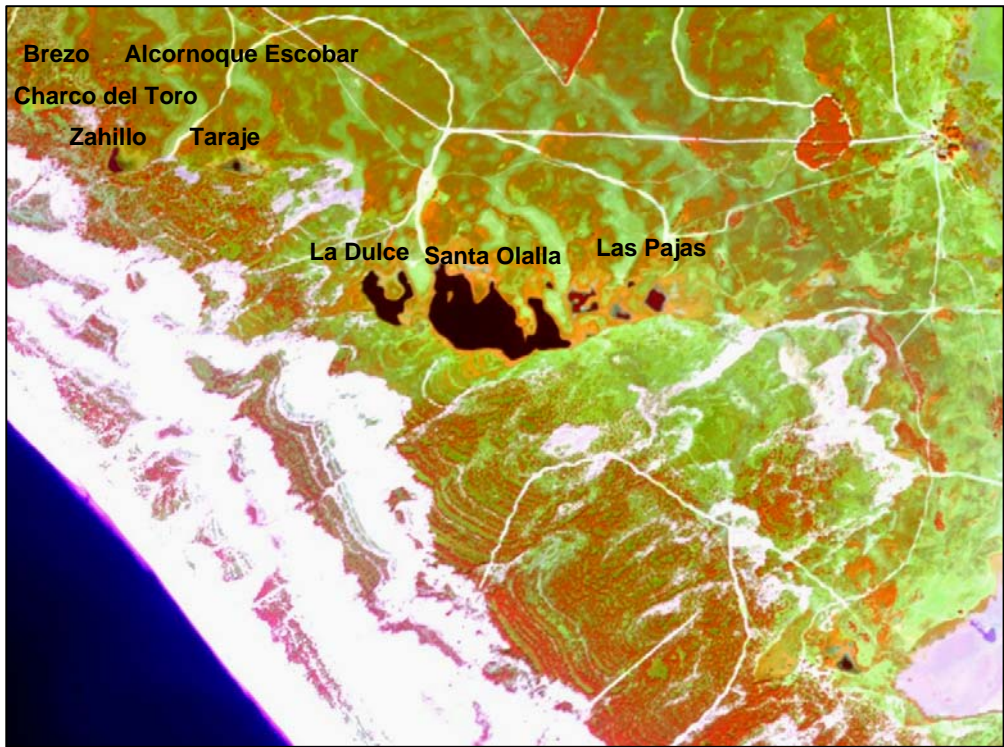


Figura 46. Sector de Santa Olalla (Imagen AHS, septiembre de 2004)

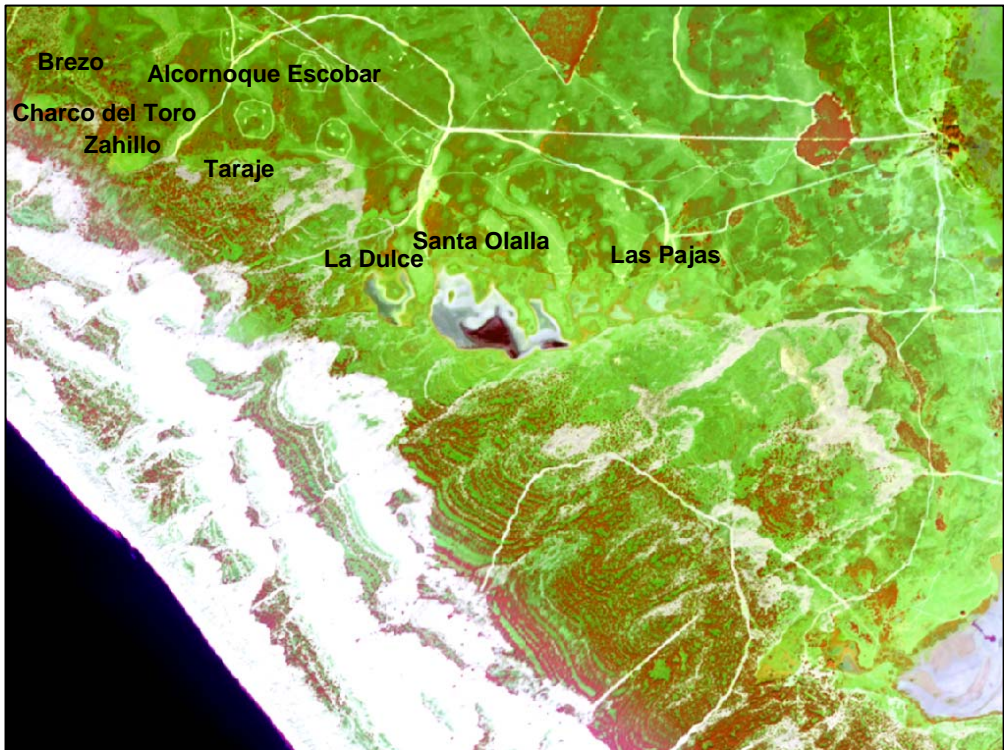


Figura 47. Sector de Santa Olalla (Imagen AHS, septiembre de 2005)

## 5 Dinámica de cambios de las formaciones palustres del MELAD durante el periodo 1985–2005

En el periodo 1985-2005 (figura 48), se observa una etapa desde 1985 hasta finales de 1990 con una tendencia media en las precipitaciones entre 480 – 600 mm/año. Los años 1987 y 1989 destacan por ser más húmedos respecto al resto de este período (1055 y 916 mm/año respectivamente). Desde finales de 1990 hasta 1995 se produce una fluctuación que corresponde a una etapa seca con precipitaciones entre 340 – 430 mm/año. Desde finales de 1995 se produce un ligero ascenso en las precipitaciones, con dos picos con valores elevados en 1996 y 1997 (1181 y 752 mm/año respectivamente). Entre 1998 y finales de 2000 se da un periodo seco, momento a partir del cual se recuperan las precipitaciones (de 530 a 716 mm/año) hasta diciembre de 2003, fecha en la que las precipitaciones descienden hasta alcanzar un mínimo de 217 mm/año en el año 2005.

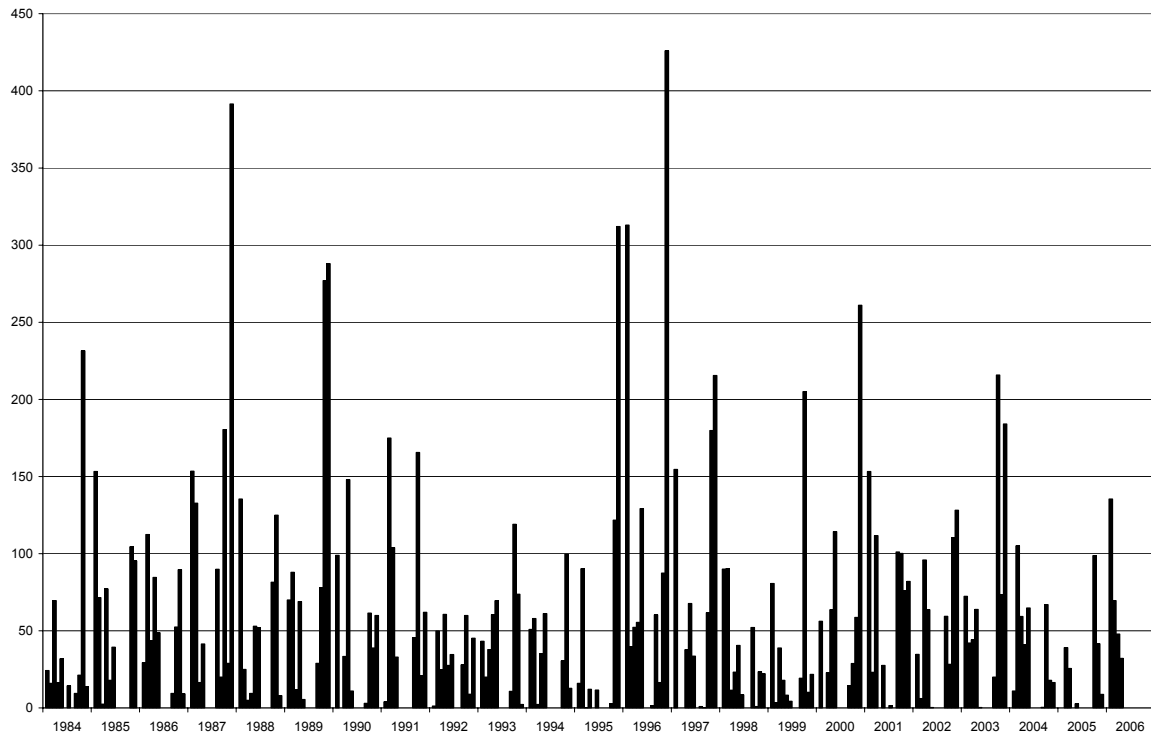


Figura 48. Pluviometría durante el periodo 1985 – 2006. Fuente: Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la Estación Biológica de Doñana, <http://www-rbd.ebd.csic.es/Seguimiento/mediofisico.htm>.

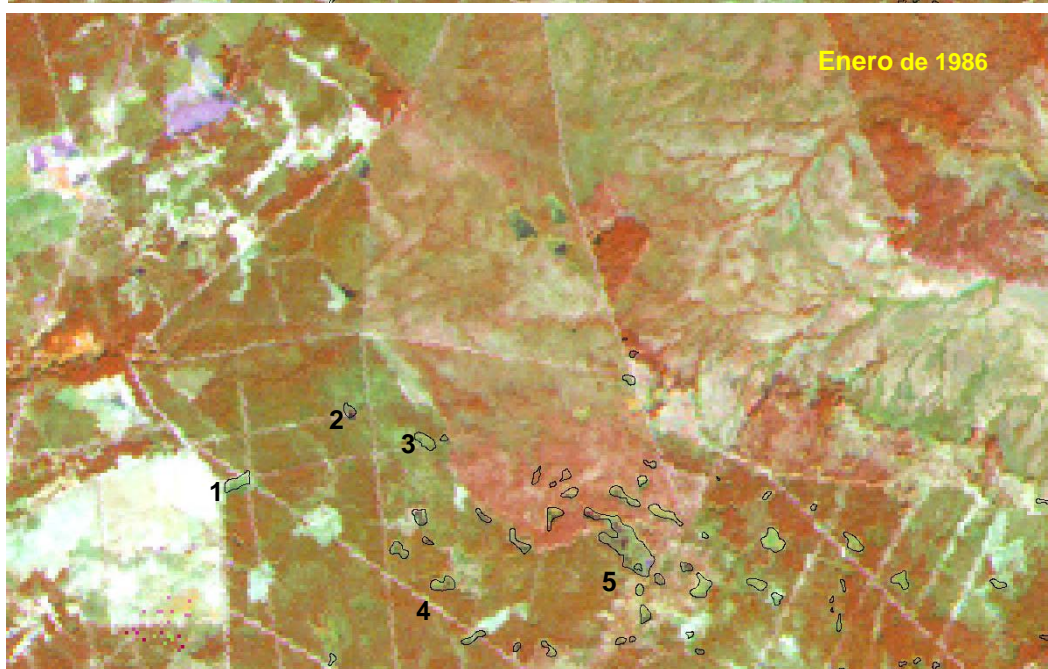
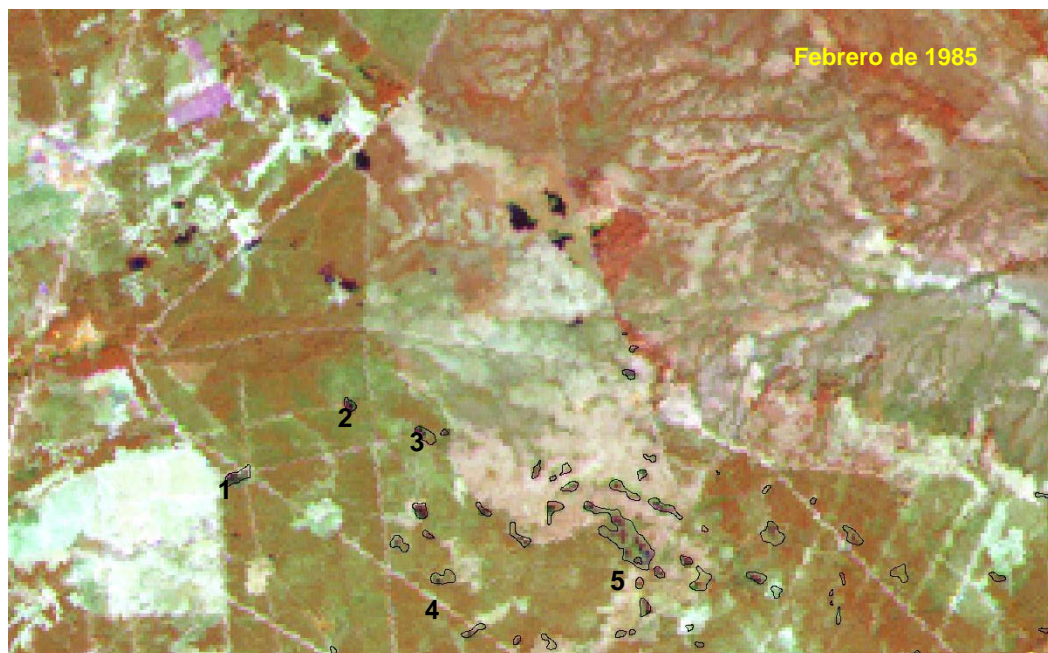
A partir de las cartografías generadas de la interpretación de las imágenes Landsat y AHS, se ha realizado un análisis de los cambios y evolución de la lámina de agua de las lagunas y zonas de encharcamiento del MELAD para cada una de las fechas seleccionadas del periodo 1985 - 2005.

Las precipitaciones elevadas en **febrero de 1985** (mapa 1) se reflejan en la imagen Landsat en el encharcamiento de las lagunas temporales situadas al suroeste de la cabecera de La Rocina y al oeste de la línea de Ribetehilos (lagunas de Corral Alto, de Moguer, Las Tinajas, del Paquino, del Conejo, de los Cinco Pinos) (figura 49). Estas lagunas se localizan en una zona en donde previamente se han llevado a cabo tratamientos selvícolas que han eliminado o aclarado la masa forestal arbolada (eucalipto) y la de matorral. En el sector central y este de El Abalarío también se han aplicado este tipo de tratamientos, pero no se observan en esta fecha encharcamientos o lámina de agua. En la zona situada entre el oeste de la finca de Los Mimbrales y noreste de la línea de Ribetehilos (figura 50) existen puntos de encharcamiento (Laguna Chica, Las Casillas, El Peladillo), al igual que en El Acebuche y en lagunas como Soriana y Sorianilla.

En el Parque Nacional de Doñana, las lagunas de Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, Taraje, Zahillo, Lucio del Bolín y del Palacio, del Sapo, de los Hermanillos, Sopotón, del Galápagó, Rincón del Guerrero y El Hondón presentan lámina de agua y zonas de encharcamiento (figura 51). Las lagunas situadas al oeste de Santa Olalla: Charco del Toro, Brezo, Alcornoque Escobar muestran un encharcamiento más reducido. Al norte de este sector, se localizan encharcamientos en las lagunas del Pajarito, del Contrabandista, Mata de los Domínguez, Navazo Aragón, de los Monteruelos, de la Espajosa, de la Ahumada, Navazo de la Sarna, del Camellero y Zalagana entre otras. En el sector sur del Parque Nacional las formaciones palustres que registran niveles de inundación son Llanos de Velásquez, El Lucio y Navazo de la Columna.

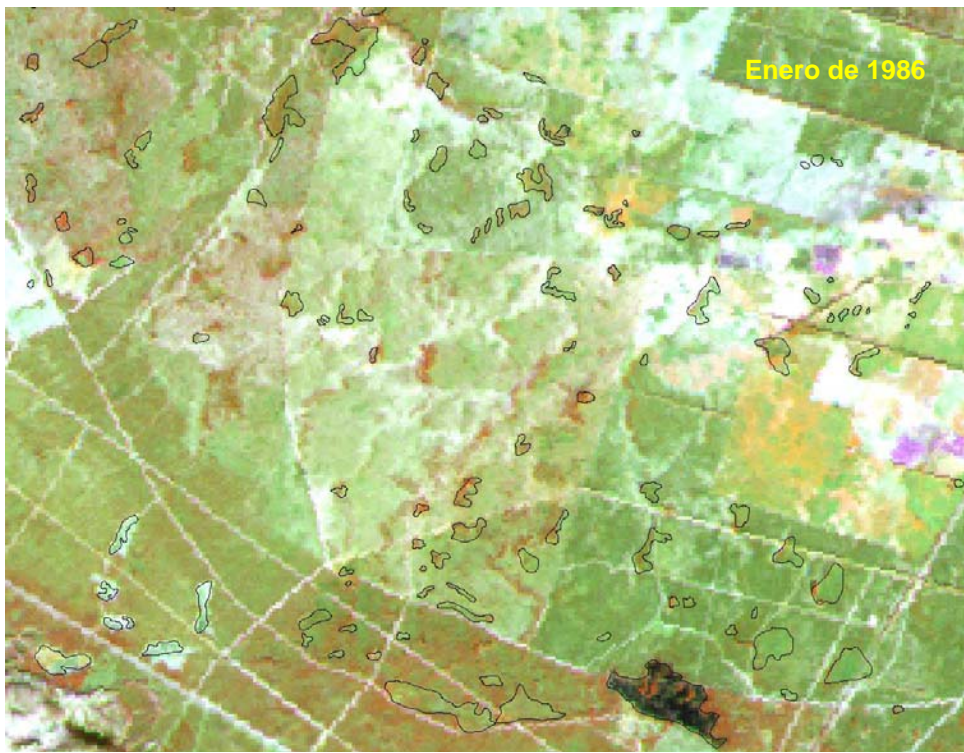
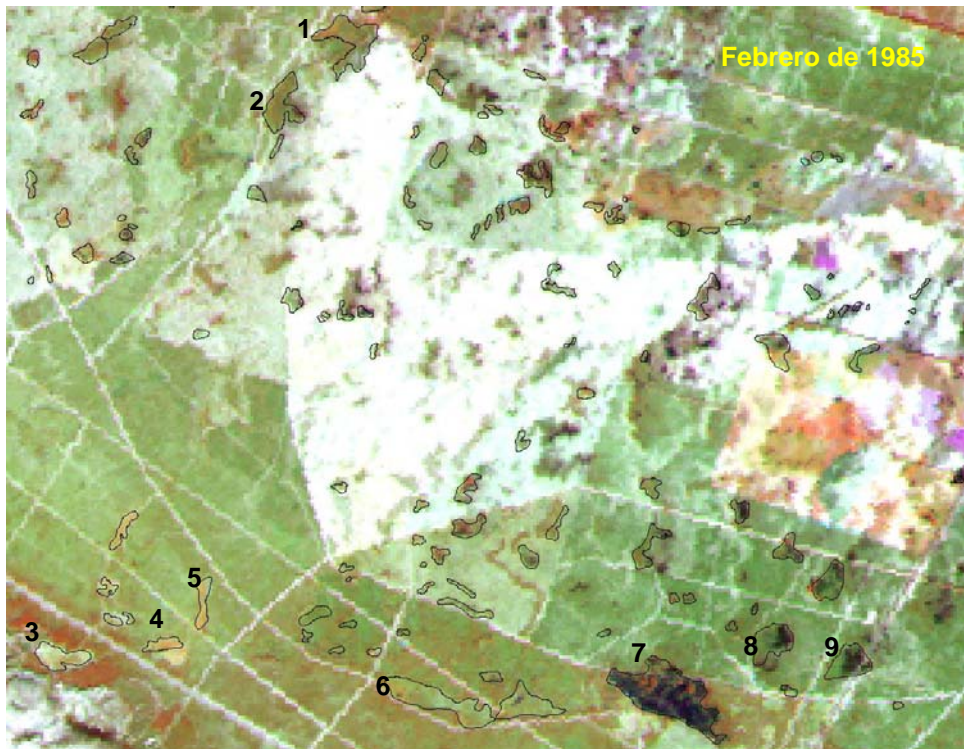
En **enero de 1986** (mapa 2), la lámina de agua y las zonas encharcadas quedan limitadas a las lagunas de El Acebuche, La Dulce, Santa Olalla, Las Pajas, Sopotón, Rincón del Guerrero, El Hóndón, El Galápagó, El Sapo, Los Hermanillos, Zahillo (figura 51) y algunos puntos al norte del Parque Nacional de Doñana (Navazo de la Sarna, laguna de la Mata de los Domínguez) (figura 52) y al sur (Llanos de Velásquez, El Lucio y Navazo de la Columna). Se observa en la mitad norte de la Reserva Biológica de Doñana que parte de la masa arbolada y de matorral ha sido eliminada. En El Abalarío sólo algunos puntos de lagunas como la de Moguer, del Conejo, de las Turnas, ..., presentan superficie encharcada, el resto de lagunas en el MELAD aparecen secas debido a las escasas precipitaciones registradas en esta fecha.





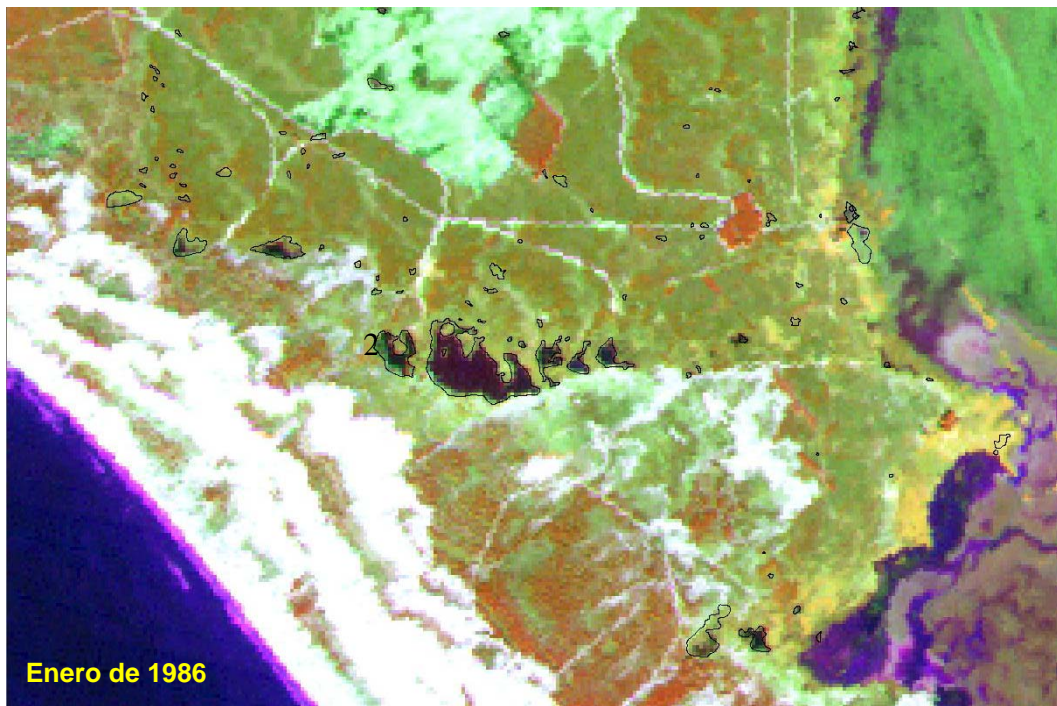
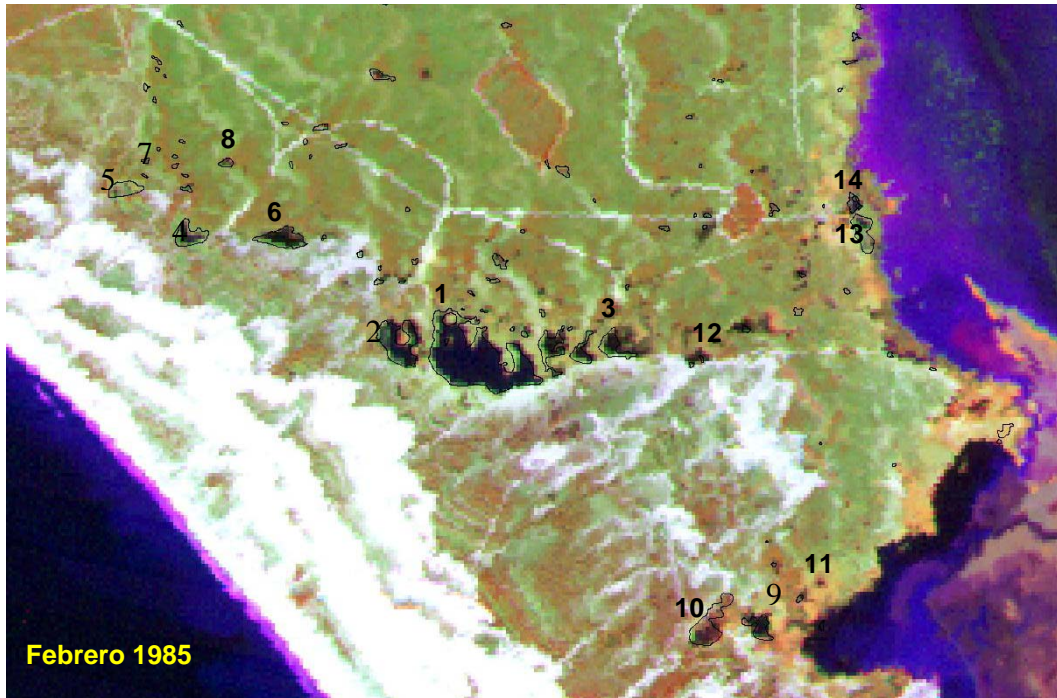
1 Los Cinco Pinos 2 Conejo 3 Paquino 4 Corral Alto 5 Moguer

Figura 49. Lagunas del sector de Moguer



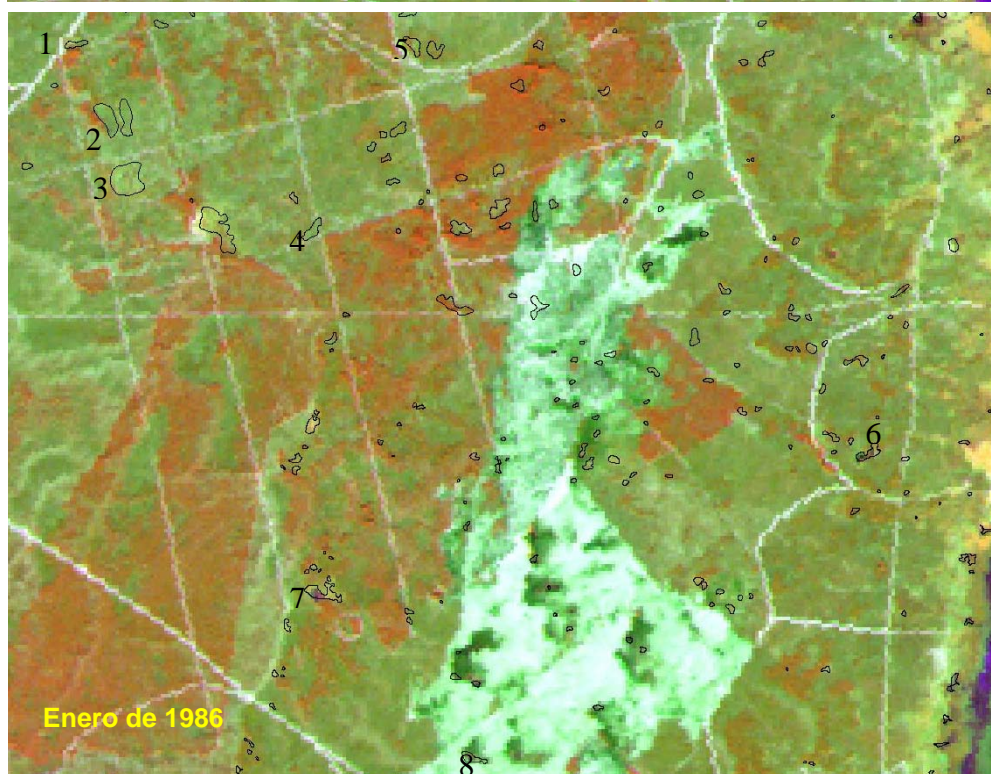
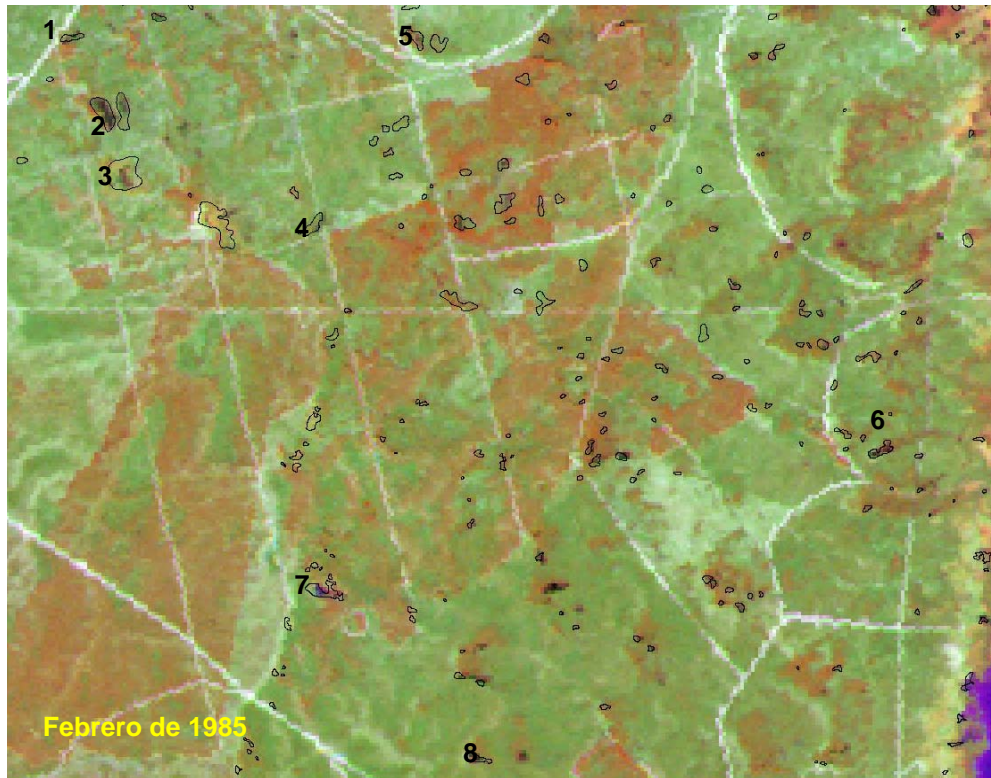
- 1 El Pino Torcido    2 El Peladillo    3 El Jaral    4 Chica    5 La Poleosa  
 6 El Huerto-Las Pajas    7 El Acebuche    8 Sorianilla    9 Soriana

Figura 50. Lagunas al sur de la finca de Los Mimbrales y noreste de la línea de Ribetehilos



- 1 Santa Olalla 2 La Dulce 3 Las Pajas 4 Zahillo 5 Charco del Toro 6 Taraje 7 Brezo 8 Alcornoque Escobar 9 El Sopotón 10 El Rincón del Guerrero 11 El Galápaico 12 El Sapo 13 Lucio del Palacio 14 Lucio del Bolín

Figura 51. Lagunas del Parque Nacional, sector de Santa Olalla



- 1 El Pajarito    2 El Contrabandista    3 Navazo Aragón    4 La Moga  
5 La Ahumada    6 Navazo de la Sarna    7 Navazo del Toro    8 El Camellero

Figura 52. Lagunas del Parque Nacional, al norte del sector de Santa Olalla

La situación de **febrero de 1987** (mapa 3) es similar a 1986. En el Parque Natural, en concreto en El Abalarío, se observa el resultado de los aprovechamientos forestales, cuyo objetivo es la eliminación de la masa de eucalipto. Estos tratamientos se hacen más evidentes al oeste de la línea de Ribetehilos, al sur de ésta, en la zona central del Parque Natural y al oeste de la finca Los Mimbrales (figura 53). Presentan puntos de encharcamiento la laguna de Moguer y algunas de las lagunas (laguna del Conejo) situadas entorno a ésta. Aparecen zonas encharcadas al este de la línea de Ribetehilos (laguna del Ojuelo, laguna del Sanguino,...), así como en algunos puntos al sur de Los Mimbrales (laguna Sorianilla, laguna de La Cencerra) y en el Acebuche. En el Parque Nacional se observa lámina de agua en las lagunas de Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, Zahillo, del Sapo, del Rincón del Guerrero, Sopetón, El Hóndón del Galápagó, Hermanillos, Navazo de la Columna y El Lucio. Las lagunas de Charco del Toro y Alcornoque Escobar registran un encharcamiento mínimo, la del Brezo aparece completamente seca. Al norte del complejo de Santa Olalla se localizan zonas de encharcamiento en distintas lagunas (del Camellero, Navazo del Toro, Navazo de la Sarna, Zalagana, Mancha del Marqués, del Contrabandista, Mata de los Domínguez).

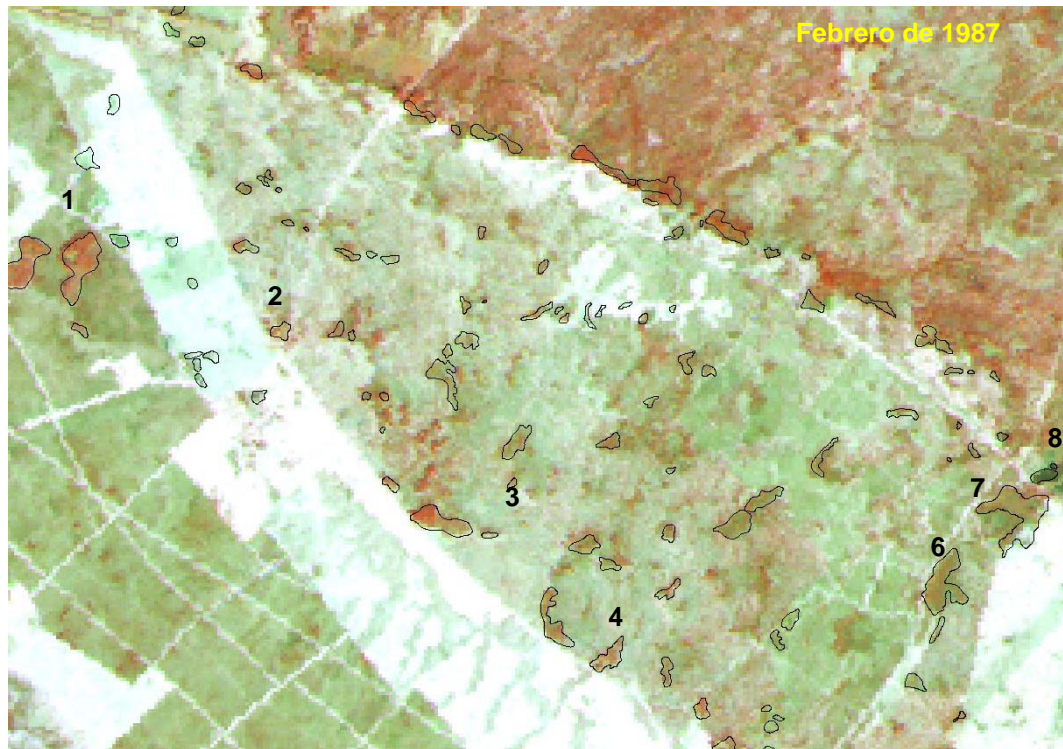
La imagen de **septiembre de 1988** (mapa 4) corresponde al final intraanual seco y presenta una reducción de la lámina de agua y de las superficies de encharcamiento, que se restringen a las lagunas de El Acebuche, Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, Taraje, Zahillo, El Hondón, Charco del Toro y Sopetón.

En **abril de 1989** (mapa 5), se localizan superficies encharcadas en las lagunas temporales al sur de Ribetehilos (Los Charquillos, del Coto Ibarra, Abalarío, Zacallón de los Americanos, del Vivero de Sancho Mingo) (figura 54), sector donde se ha eliminado masa forestal arbolada. Al oeste de Ribetehilos sólo la laguna de Moguer presenta una pequeña zona de encharcamiento.



1a Masa de eucalipto 1b Eliminación de masa de eucalipto 2 El Río Oro  
 3 El Abalarío 4 La Higuera 5 El Ojuelo 6 El Pino Torcido 7 El Peladillo

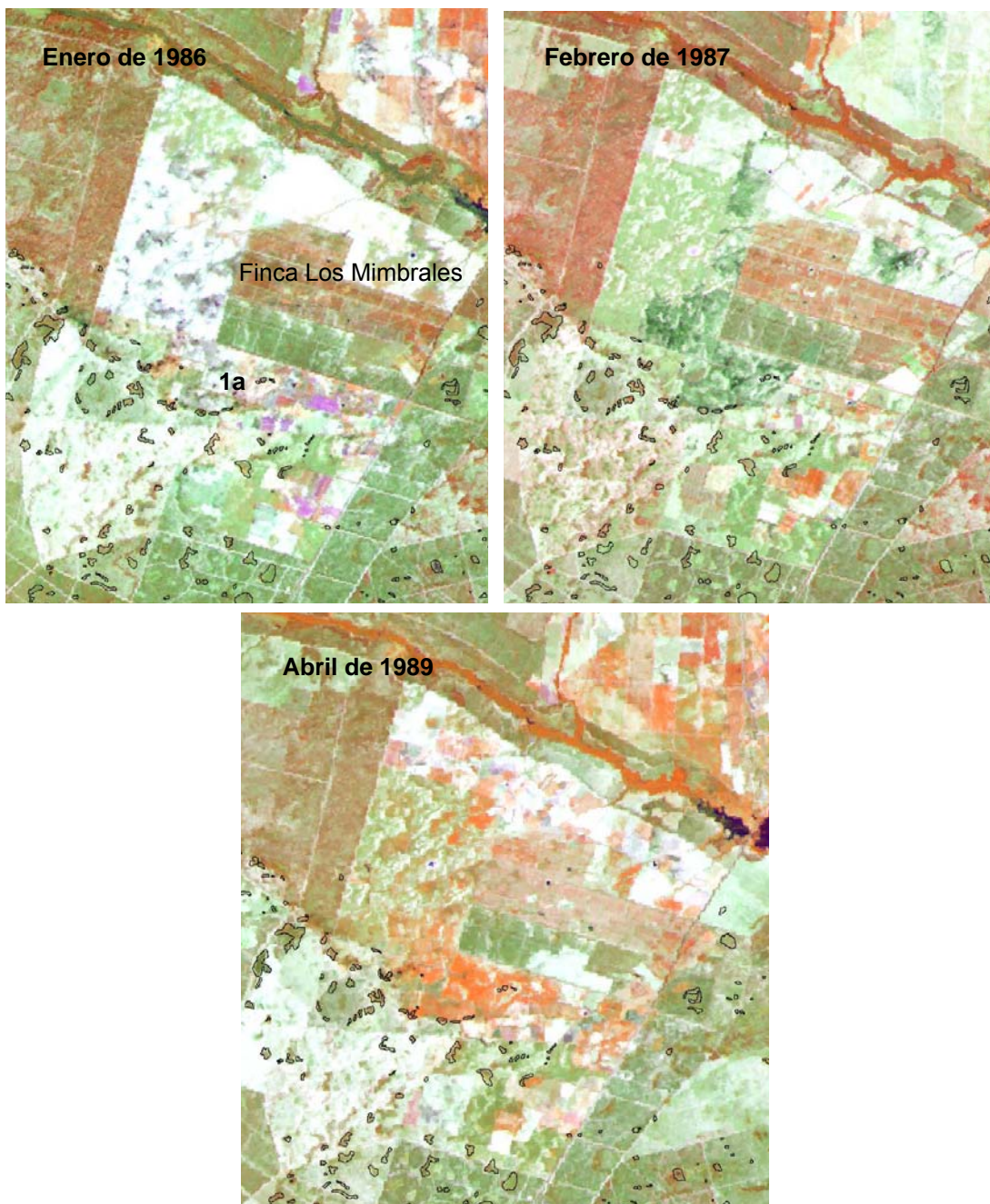
Figura 53. Lagunas del sector de El Abalarío



- 1 El Río Oro 2 El Abalarío 3 El Vivero de Sancho Mingo 4 El Porrón  
5 Zacallón de los Americanos 6 El Peladillo 7 El Pino Torcido 8 El Ojuelo

Figura 54. Lagunas al sur de Ribetehilos

Al sur del arroyo de la Rocina, destaca la explotación de la finca los Mimbrales (figura 55). Las formaciones palustres situadas en su entorno aparecen secas en estas fechas, debido a la posible afección de los pozos que extraen agua del acuífero para riego de uso agrícola. Se observa el desarrollo de las plantaciones de frutales y cítricos en las áreas que se habían limpiado de vegetación natural en años precedentes.



1a Preparación del terreno 1b Plantaciones agrícolas de frutales y cítricos

Figura 55. Explotación agrícola en la finca de los Mimbrales



En la imagen de abril del 1989, sólo se observa lámina de agua en Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, de los Hermanillos, Taraje, Zahillo, Charco del Toro, Lucio del Palacio y del Bolín, del Galápagó, Rincón del Guerrero, Sopotón y Hondón. La zona situada al norte del complejo de Santa Olalla muestra en esta fecha una reducción de las superficies encharcadas, observándose solamente zonas puntuales húmedas en las lagunas de la Mata de los Domínguez y Navazo de la Sarna.

La imagen de **febrero de 1990** (mapa 6) ofrece una situación distinta a las anteriores, apareciendo en la mayor parte de las formaciones palustres lámina de agua y encharcamiento debido a la mayor cuantía de las precipitaciones (figuras 56, 57, 58, 60, 61 y 62). Se observa un gran desarrollo de la masa de eucalipto al norte de Ribetehilos y en la cabecera del arroyo de La Rocina (figura 59).

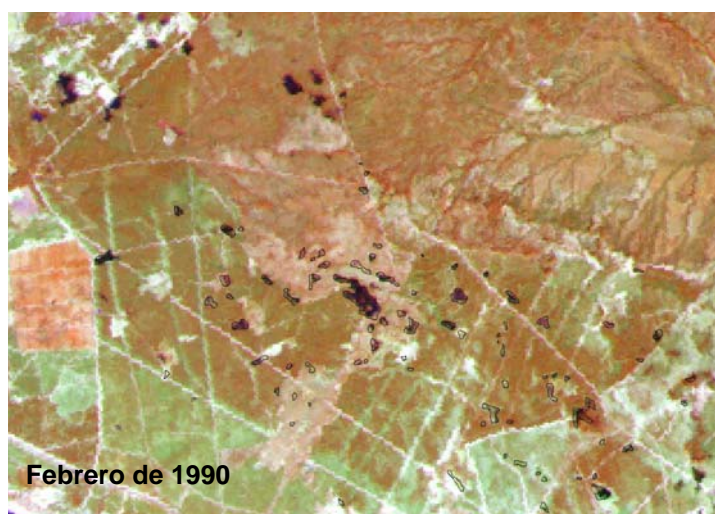


Figura 56. Cabecera de La Rocina - Laguna de Moguer

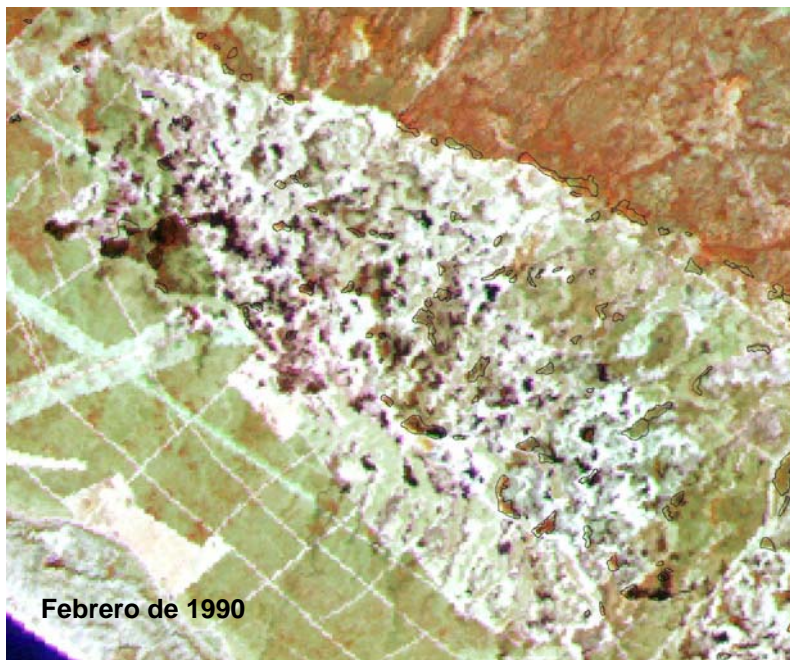


Figura 57. Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables.  
Sector de El Abalarío - Ribetehilos



Figura 58. Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables  
Laguna de El Acebuche (1) y El Huerto – Las Pajas (2)

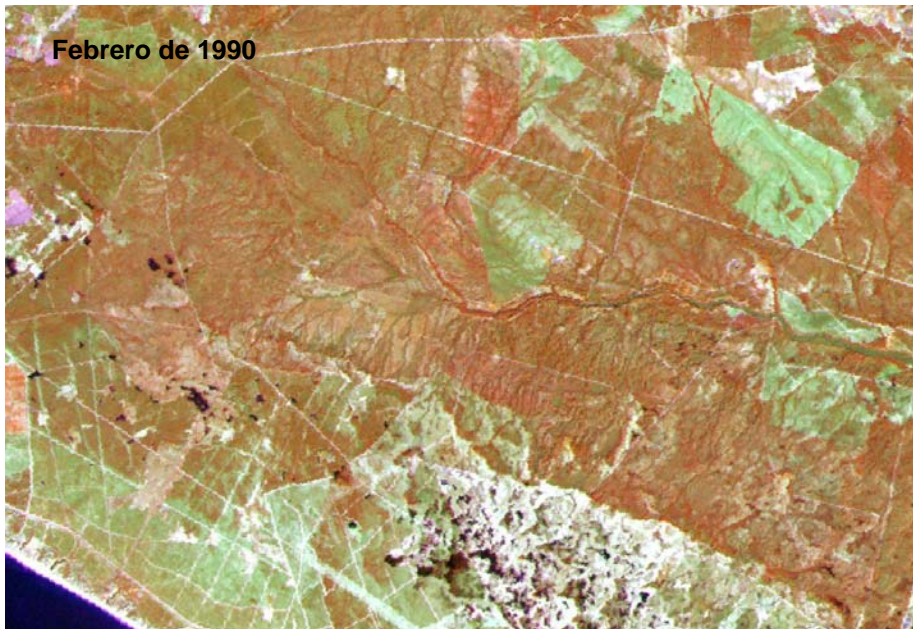


Figura 59. Desarrollo de la masa de eucalipto entre Ribetehilos y la cabecera del arroyo de La Rocina

En la imagen registrada en **agosto de 1990** (mapa 7), la lámina de agua y las zonas de encharcamiento quedan restringidas a las lagunas del Río Oro, El Acebuche, El Huerto-Las Pajas Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, Lucio del Bolín, El Hondón, Taraje, Zahillo, Charco del Toro y Sopotón (figuras 60 y 61).

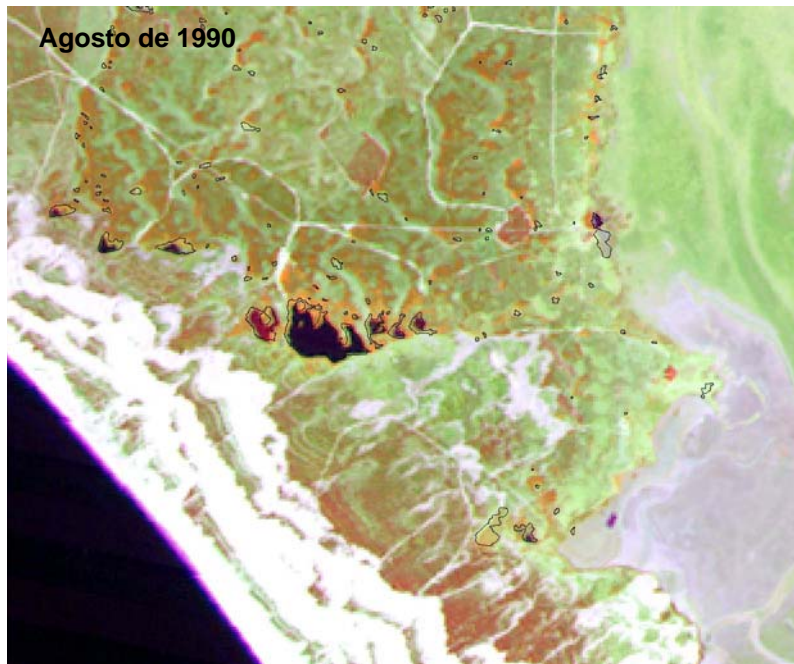


Figura 60. Sector de Santa Olalla

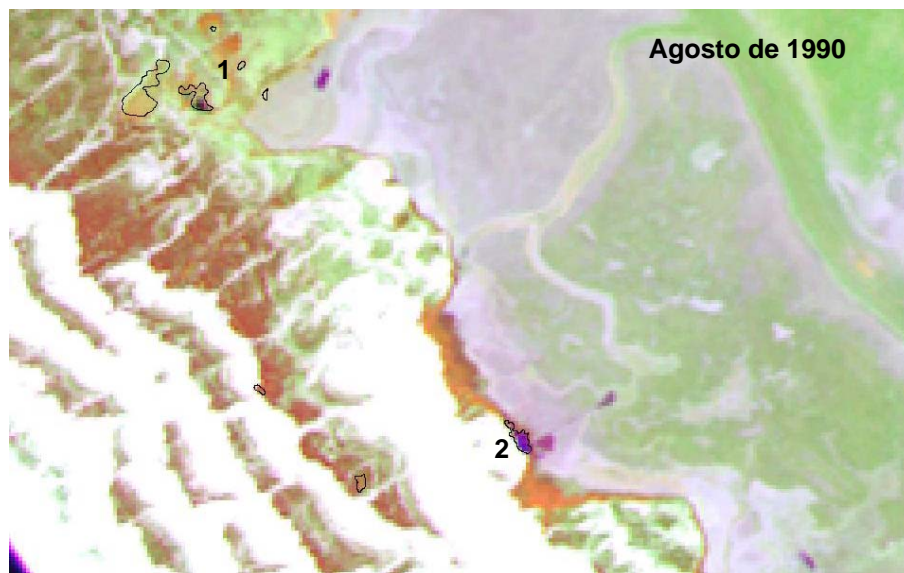
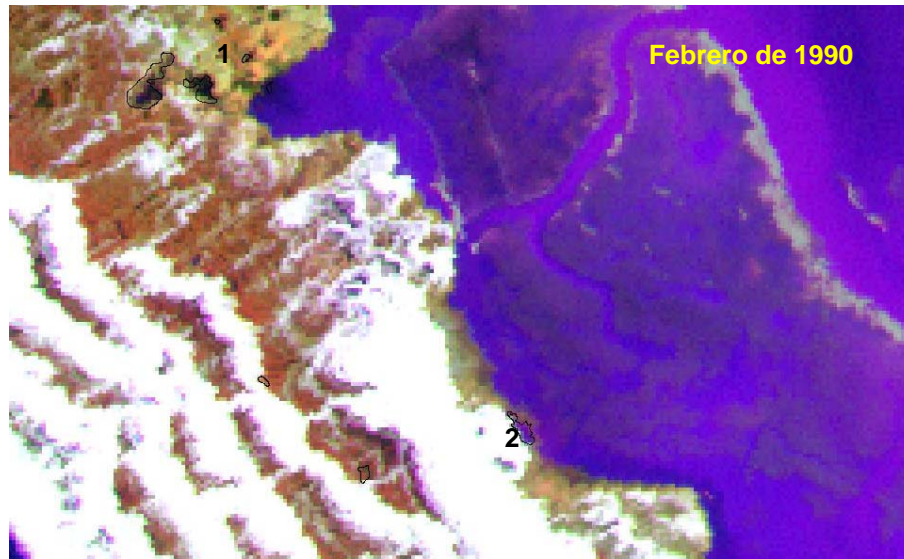


Figura 61. El Sopotón (1), El Hondón (2)

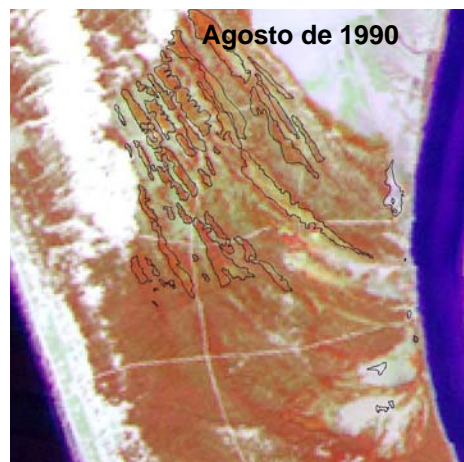


Figura 62. Navazos en la ecosección de playas antiguas del ecodistrito costero de Doñana

Desde finales de 1990 hasta 1995 se registra un periodo seco. En **enero de 1992** (mapa 8), la disminución de las precipitaciones se manifiesta en una reducción de las zonas de encharcamiento y de lámina de agua (figura 63 y 64); solamente las lagunas permanentes y algunas de las temporales permanecen con agua (El Acebuche, Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, Taraje, Zahillo, Los Hermanillos, Lucio del Bolín, Lucio del Palacio, Rincón del Guerrero, El Galápago, El Hondón, Sopotón y Navazo de la Columna).

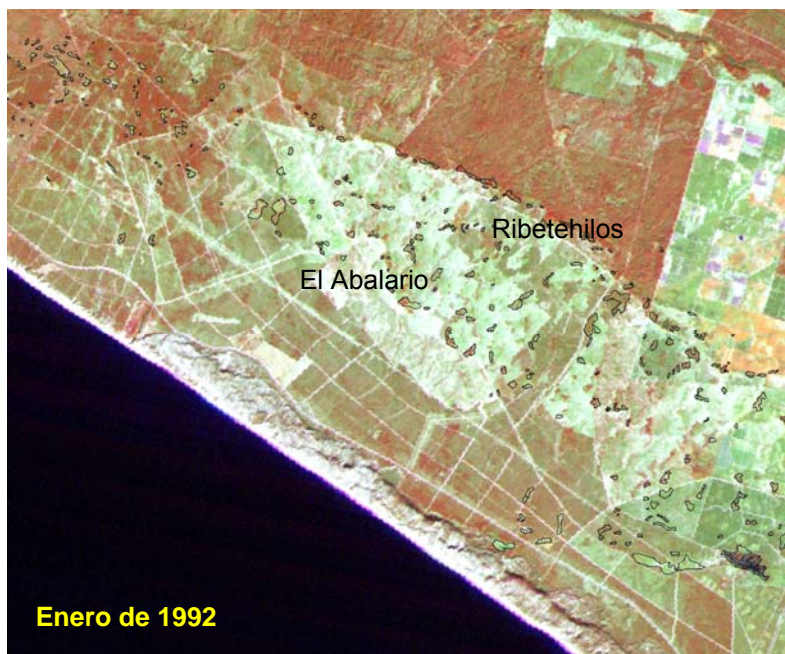


Figura 63. Lagunas del Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables en el sector de El Abalarío



Figura 64. Lagunas en el sector del Parque Nacional

La sequía se hace más evidente en la imagen de **febrero de 1993** (mapa 9). Sólo las lagunas de Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, el Sopotón (figura 65), Lucio del Bolín, el Hóndón, El Acebuche y Las Pajas-El Huerto (figura 66) tienen lámina de agua. La laguna del Taraje presenta una pequeña zona de encharcamiento en su zona central, mientras que Zahillo y Charco del Toro aparecen completamente secas. En **diciembre de 1993** (mapa 10) se observan cambios en las masas forestales del Parque Natural, se elimina parte de la repoblación de eucalipto al noreste de Ribeteuilos y también se abre un claro en la masa en la cabecera de La Rocina.

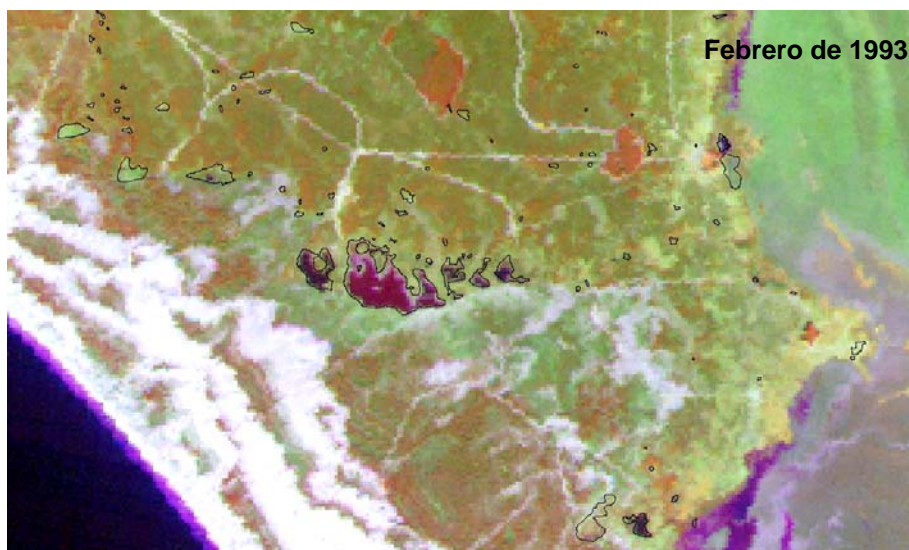


Figura 65. Sector de Santa Olalla.



Figura 66. Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables. Sector El Abalarío-Moguer

La situación de las lagunas en **marzo de 1994** (mapa 11) es similar a la de febrero de 1993, localizándose zonas encharcadas y lámina de agua en Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, El Taraje, Lucio del Bolín (régimen artificial), El Sopetón, El Hondón, Navazo de la Columna, El Acebuche y El Huerto-Las Pajas. En la imagen de **septiembre de 1994** (mapa 12), sólo el Lucio del Palacio (régimen artificial), el Acebuche (alimentada con agua subterránea mediante bombeo) (figura 67) y una superficie muy reducida de Santa Olalla y de la laguna del Hondón presentan lámina de agua o encharcamiento (figura 68).

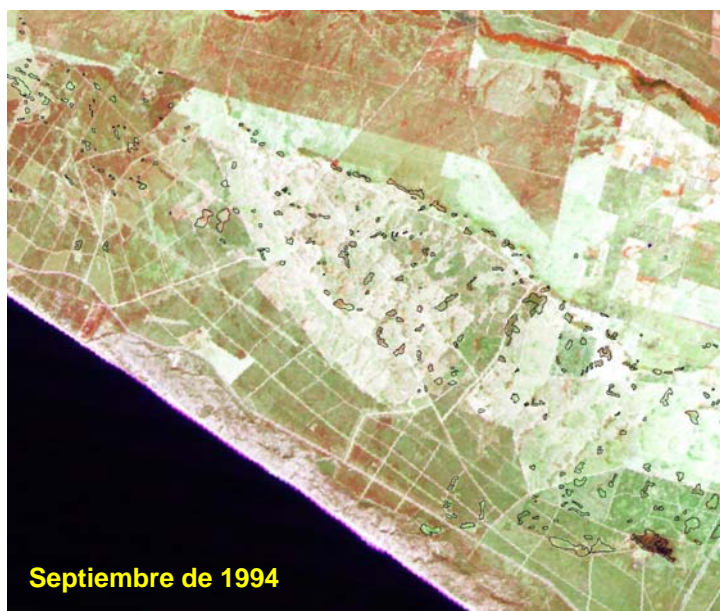


Figura 67. Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables. Sector El Abalarío-Moguer



Figura 68. Sector de Santa Olalla. Lucio del Palacio (1) y El Hondón (2)



Sólo las lagunas de El Huerto-Las Pajas, La Dulce, Santa Olalla, Las Pajas, El Hondón y el Sopotón tienen superficie con agua o zonas encharcadas en **enero de 1995** (mapa 13). El Acebuche presenta lámina de agua y zonas encharcadas como ocurre en otras fechas de períodos especialmente secos debido a que es alimentada con agua subterránea mediante bombeo, así como El Lucio del Bolín y el Lucio del Palacio, de régimen artificial.

El año 1996 corresponde a un período hidrológico más húmedo respecto al período 1990–1995. En la imagen de **julio de 1996** (mapa 14), se observa cómo las superficies encharcadas y la lámina de agua han aumentado considerablemente en las lagunas del complejo de Santa Olalla (exceptuando el Charco del Toro), así como en las lagunas del Hondón, Sopotón, del Camellero, Contrabandista, Navazo Aragón, del Moral, Navazo del Toro, Soriana, Sorianilla y El Acebuche (figura 69) y Lucios del Bolín y del Palacio (estas tres últimas de régimen artificial) (figura 70). En el Parque Natural sólo aparecen zonas húmedas en las lagunas del Río Oro, en el Zacallón de los Americanos, Las Casillas, Los Charquillos, El Sanguino. Se observa en esta fecha cómo gran parte de la masa de eucalipto situada en la cabecera de La Rocina y entre este arroyo y Ribetehilos ha sido cortada.



Figura 69. El Acebuche (1), El Huerto – Las Pajas (2), La Soriana (4) y La Sorianilla (3)



Figura 70. Sector de Santa Olalla. Lucio del Palacio (1) y El Hondón (2)

En **febrero de 1997** (mapa 15), el aumento considerable en las precipitaciones provoca el llenado de las cubetas y el encharcamiento de las formaciones palustres. En las lagunas del complejo de Santa Olalla, se observa la recuperación de las situadas en el sector occidental, con lámina de agua en la laguna del Charco del Toro y zonas encharcadas en el caso de Alcornoque Escobar y Brezo (figura 71). Otras formaciones palustres con altos niveles de inundación son las situadas al sur del Parque Nacional (Navazos de Las Pajas, de la Adelfa, Largo, del Masegar, de la Madroña, de la Higuera, de la Guitarra, de la Columna, Laguna Larga, Llanos de Velásquez, El Lucio); la mayor parte de estas lagunas no registraban lámina de agua o zonas encharcadas desde febrero de 1990 (figura 72). En el Parque Natural, las lagunas de La Verdeja, Pino Alto, Conchas, de La Vaca, Norte de la Vaca, Sopotón, del Cesto, Arenosillo, de los Huesos, del Coto Bayón, Quemada, Mata del Moro, Carrizosa, Pequeña de las Turnas y de la Res, situadas al este de la laguna de Moguer, aparecen sin lámina de agua.



Figura 71. Sector de Santa Olalla



Figura 72. Sur del Parque Nacional de Doñana

El nivel de inundación en **marzo de 1998** (mapa 16) sigue siendo elevado, aunque en menor medida que en 1997. Una disminución en las precipitaciones motiva que en la imagen de **enero de 1999** (mapa 17), se observe un descenso generalizado de las superficies de las superficies de agua y de encharcamiento en las formaciones palustres. Son de nuevo las lagunas de Santa Olalla, La Dulce y Las Pajas, Taraje, Zahillo, El Sopetón, El Hondón, así como El Acebuche y Lucio del Palacio y del Bolín (de régimen artificial) las que presentan niveles mayores. También muestran algunos

puntos de encharcamiento las lagunas del sector occidental de Santa Olalla (Charco del Toro, Alcornoque Escobar).

En la imagen de **julio de 1999** (mapa 18), se observa una disminución de la lámina de agua y zonas encharcadas. Sólo El Acebuche, La Dulce, Santa Olalla, El Hondón y Lucio del Palacio muestran lámina de agua. Al norte de Ribetehilos, en el Parque Natural, es patente la continuidad en los trabajos de eliminación del eucalipto, cuya distribución se va reduciendo en este sector a zonas puntuales y arroyos.

En la imagen registrada en **febrero de 2000** (mapa 19) se aprecia cómo la eliminación de la masa de eucalipto se traslada a la zona norte del Parque Nacional, a la altura de la desembocadura de La Rocina. Con respecto a la fecha anterior se observa una ligera recuperación de las lagunas peridunares; muestran lámina de agua o zonas encharcadas las lagunas de Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, Taraje, Zahillo, Sopetón, Hondón, Lucio del Palacio, Lucio del Bolín.

Las precipitaciones de diciembre de 2000 y enero de 2001 permiten la recuperación de gran parte de las lagunas del Parque Nacional (figura 73). En la imagen de **enero de 2001** (mapa 20), aparece lámina de agua y zonas encharcadas en el sector oeste del Parque Natural (lagunas de Moguer, Jiménez, del Paquino, del Conejo, Corral Alto, de las Turnas, de Pino Quemao, de los Cinco Pinos, del Río Oro, entre otras) (figura 74), así como entre el arroyo La Rocina y la línea de Ribetehilos y al sur de los Mimbrales (figura 75). No se observa recuperación de las lagunas de La Verdeja, Pino Alto, Conchas, La Vaca y de la Res. Sí se observa, sin embargo, un aumento de los niveles de inundación en el Parque Nacional, aunque lagunas como El Brezo y Charco del Toro muestran cubetas secas.

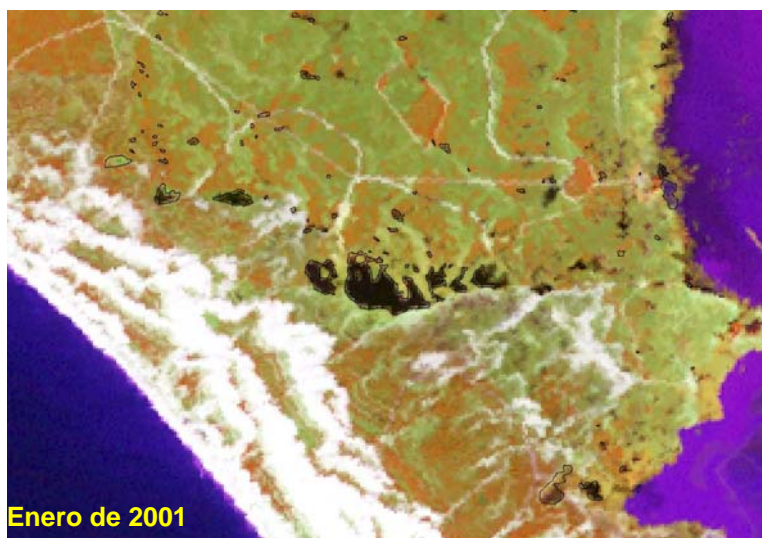


Figura 73. Sector de Santa Olalla

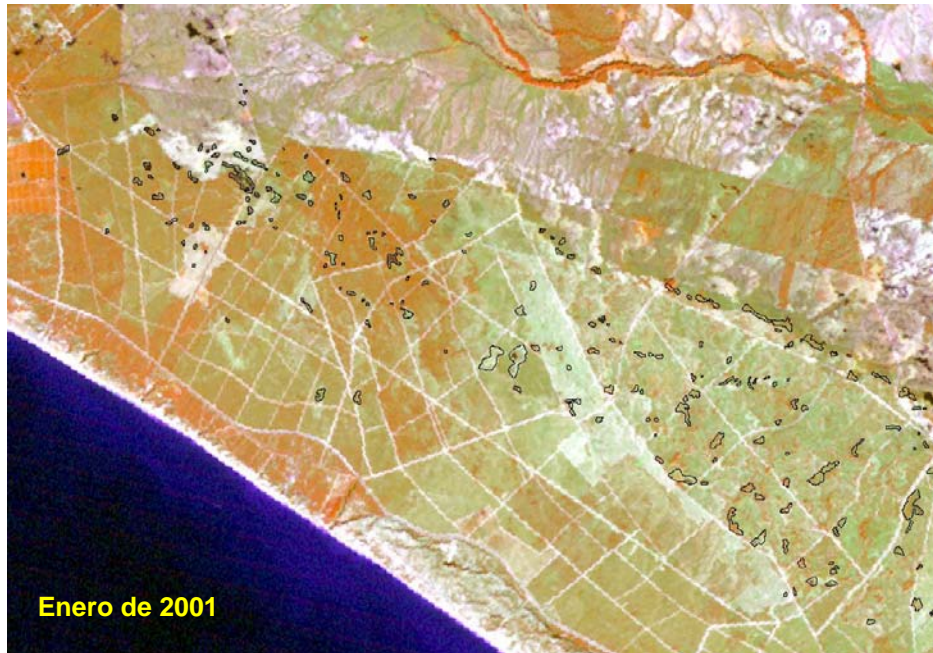


Figura 74. Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables. Sector El Abalarío-Moguer

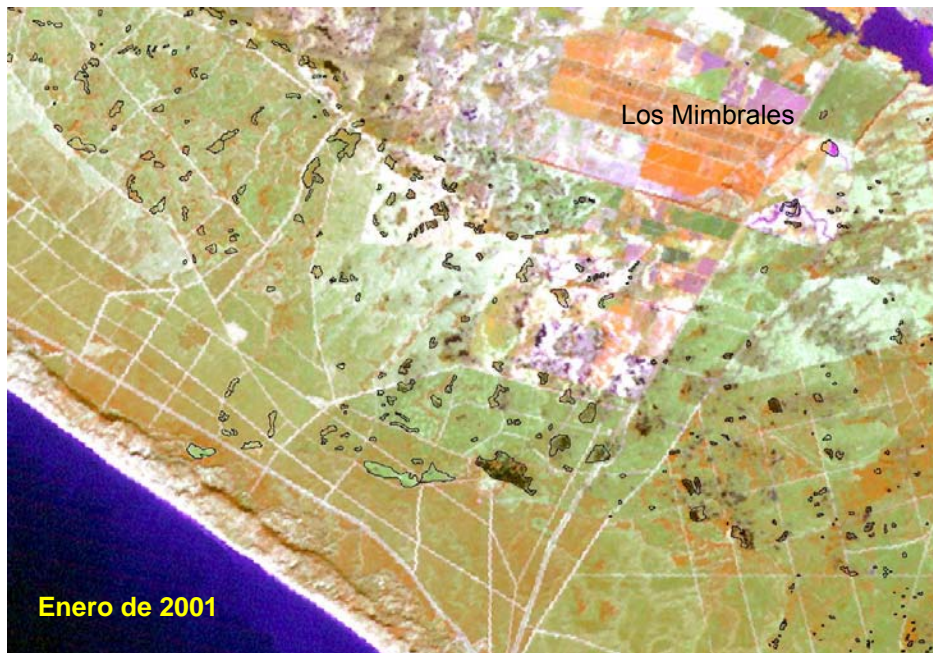


Figura 75. Sector de El Acebuche-Los Mimbrales

El mes de **abril de 2001** (mapa 21) muestra un descenso generalizado de las superficies encharcadas y en septiembre de ese mismo año, sólo El Acebuche, Santa Olalla, La Dulce y El Hondón permanecen con agua o zonas encharcadas. Al noroeste de Charco del Toro y Alcornoque Escobar se han iniciado cortas en la masa de pinar que tienen como objetivo su eliminación progresiva.

En **febrero de 2002** (mapa 23) se registra un ligero aumento de las superficies encharcadas; este aumento se hace más evidente en el sector de El Acebuche y en las lagunas peridunares. Las cubetas de las lagunas del sector oeste del Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables aparecen secas (lagunas de Moguer, Jiménez, La Res, Corral Alto) (figura 76).

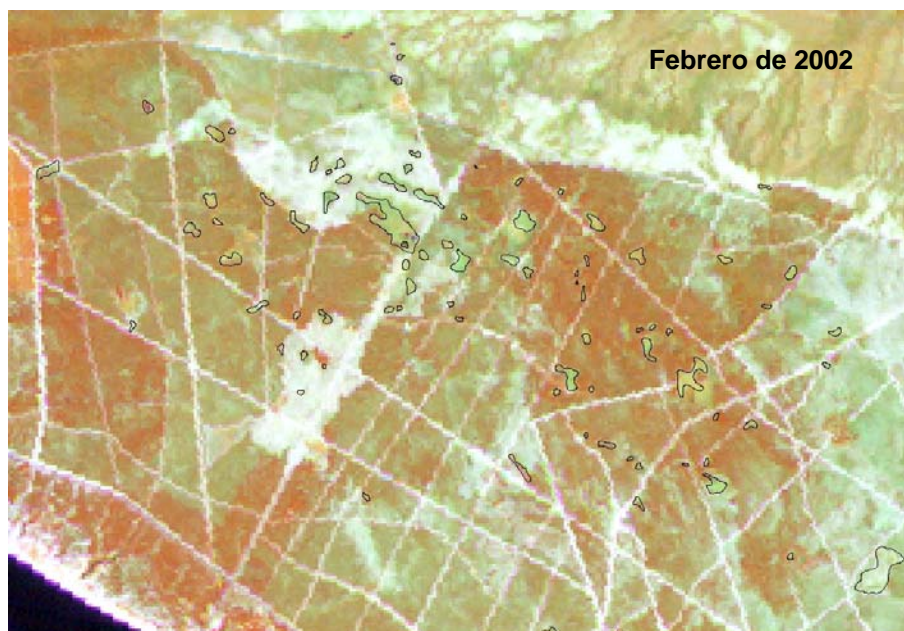


Figura 76. Zona de detalle del sector de la laguna de Moguer

En el Parque Nacional, El Brezo, El Charco del Toro y Alcornoque Escobar no presentan lámina de agua. Las formaciones palustres situadas en el sector de La Marismilla: Navazos de Las Pajas, de la Adelfa, Largo, del Masegar, de la Madroña, de la Higuera, de la Guitarra, de la Columna, del Taraje, Laguna Larga, Llanos de Velásquez, El Lucio, tampoco muestran lámina de agua o zonas de encharcamiento.

Al comienzo de la estación seca (imagen de **junio de 2002**) (mapa 24), se aprecia el descenso de la superficie encharcada de lagunas como Zahillo y Taraje. Permanecen con lámina de agua Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, una pequeña parte de El Taraje, El Hondón, El Sopotón, Sorianilla, Balsa de los Guayules, El Acebuche, El Lucio del Palacio y del Bolín (estas cuatro últimas con régimen artificial).

En el mes de **enero de 2003** (mapa 25), la mayor parte de las lagunas muestran lámina de agua. Es de destacar la recuperación de las formaciones palustres del Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables, especialmente en el sector de El Abalarío, al sur de la línea de Ribetehilos, en el Parque Natural. Esta recuperación no tiene lugar en las lagunas situadas en la masa de pinar en el sector oeste de El

Abalarío: lagunas de Río Oro, Mata del Moro, Pino Alto, de la Vaca, Jiménez, de la Res, del Coto Bayón, Corral Alto, Quemada, de las Turnas. En donde la fracción de cabida cubierta del pinar es menor, gran parte de las cubetas registran niveles de inundación (laguna de Moguer, de Paquino, de los Cinco Pinos, del Conejo, de las Tres Rayas).

En **marzo de 2004** (mapa 26), se produce una recuperación generalizada de las formaciones palustres en todo el manto eólico. Lagunas como Charco del Toro y Escobar presentan lámina de agua (figura 77). Sin embargo, algunas lagunas situadas al oeste de El Abalarío: La Verdeja, Pino Alto, Conchas, La Vaca, y de la Res no presentan lámina de agua. Las lagunas Chica, El Huerto y las Pajas situadas al oeste de El Acebuche (figura 78), exhiben lámina de agua y zonas de encharcamiento; en estas lagunas no se registraban zonas inundadas de entidad desde marzo de 1998. Otras lagunas aledañas a éstas, como la laguna de El Jaral, de La Poleosa, Las Pozas..., solo presentan pequeños encharcamientos.

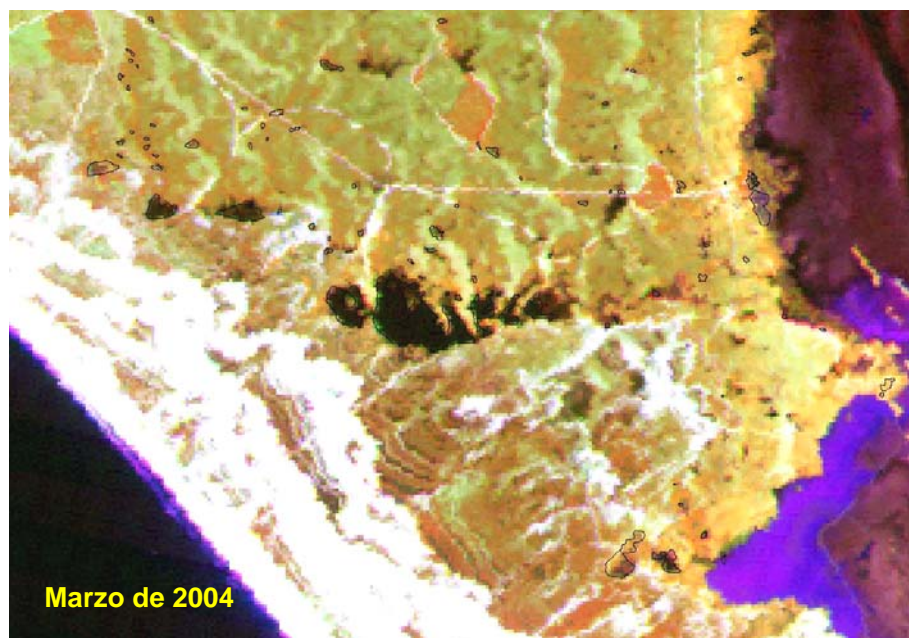


Figura 77. Sector de Santa Olalla

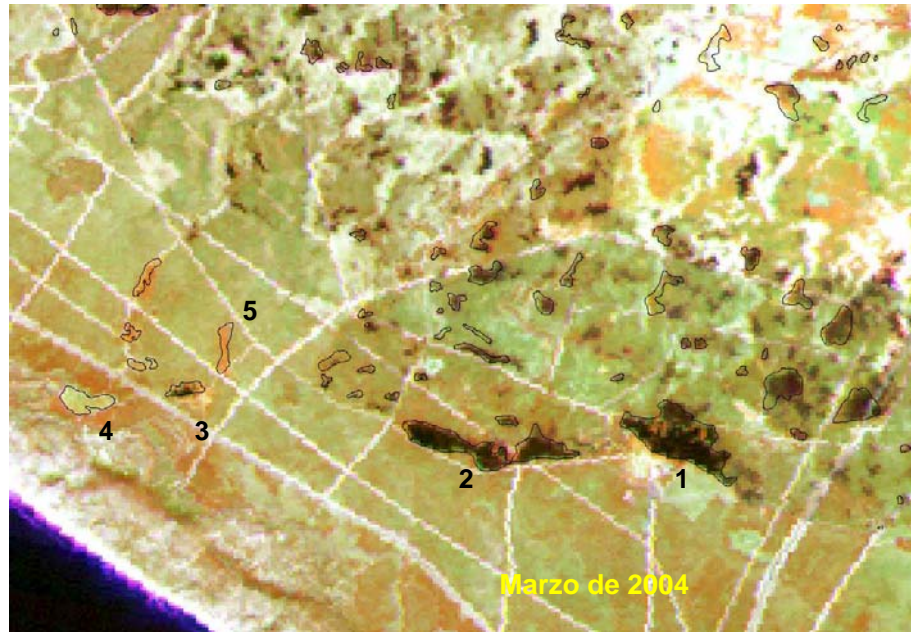


Figura 78. El Acebuche (1), El Huerto – Las Pajas (2), Chica (3), El Jaral (4), La Poleosa (5)

En abril de 2004 se mantienen altos los niveles de encharcamiento, aunque algunas lagunas han descendido notablemente (El Huerto-Las Pajas) (figura 79).

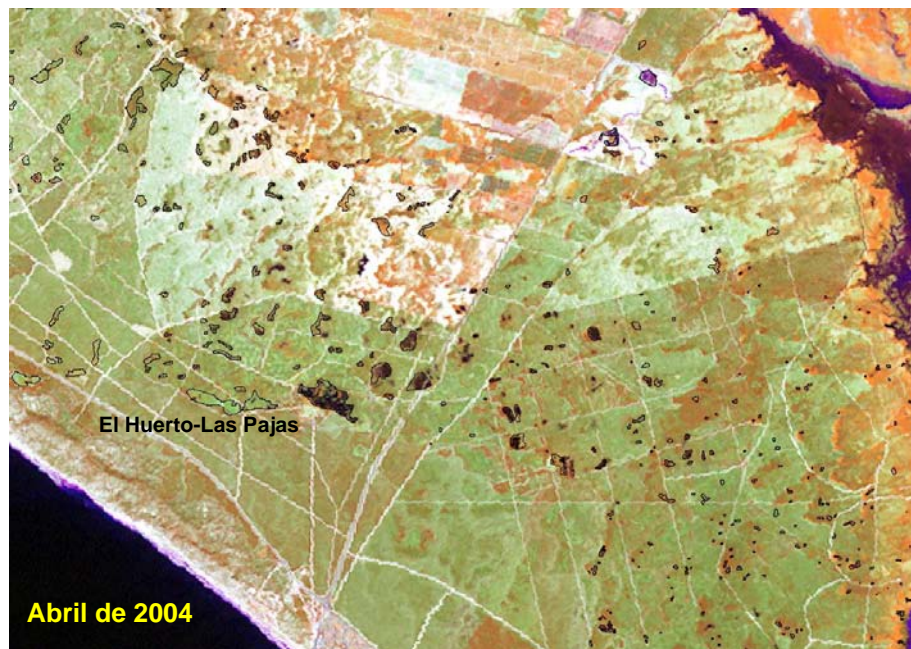


Figura 79. Sector central del Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables

En la imagen de **junio de 2004** (mapa 27), las lagunas con lámina de agua y zonas de encharcamiento se limitan a Santa Olalla, La Dulce, Las Pajas, Sopotón, El Hóndón, Los Hermanillos, Taraje, Zahillo, Navazo del Toro, del Moral, del Contrabandista, Lucio



del Palacio, Balsa de los Guayules (ambas de régimen artificial), El Huerto, Soriana y Sorianilla, Zacallón de los Americanos, Las Casillas y El Acebuche (régimen artificial), Río Oro, Abalarío y Los Charquillos. Las escasas precipitaciones del año 2005 provocan una reducción drástica de la lámina de agua. En la imagen de **septiembre de 2005** (mapa 28), correspondiente al final interanual seco, la lámina de agua se reduce a una pequeña zona de la laguna de Santa Olalla y a la del Hondón (figuras 80, 81 y 82).



Figura 80. Sector de Santa Olalla y laguna del Hondón



Figura 81. Sector de El Abalarío-Moguer

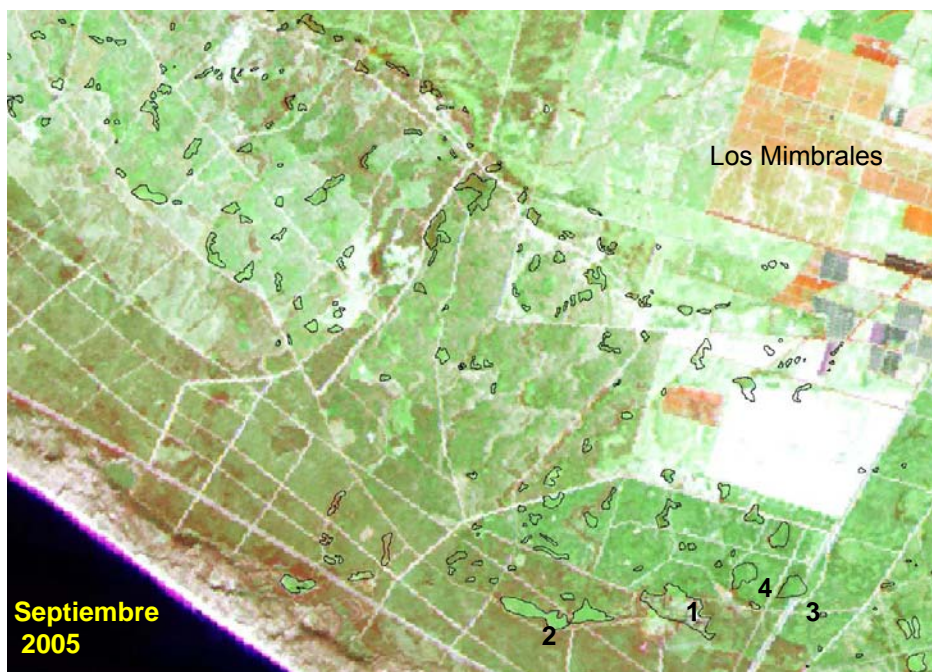


Figura 82. Sur de los Mimbrales, El Acebuche (1), El Huerto – Las Pajas (2), Soriana (3) y Soriana (4)

La cartografía de las formaciones palustres y zonas húmedas realizada a partir de las imágenes Landsat a lo largo del período 1985-2005 muestra las fluctuaciones de los niveles de lámina de agua en este período. Las imágenes de febrero de 1985, 1990 (figura 83a), 1997 (figura 83b) y enero de 2001 (figura 83c) y 2003 y marzo de 2004 (figura 83d), registradas después de intensas precipitaciones, ofrecen una visión óptima de las lagunas permanentes y de las zonas de encharcamiento temporal estacional. Las registradas en agosto y septiembre de esos años, tras las nulas o escasas precipitaciones del verano, exhiben una situación muy diferente en la que muy pocas lagunas mantienen agua.

La imagen de enero del 2001 pone de manifiesto el elevado nivel de agua de la mayor parte de las lagunas y las numerosas zonas encharcadas, como corresponde a un ciclo hidrológico húmedo. Sin embargo, en esta misma imagen (figura 83c) se detecta el estado de desecación de las lagunas de El Charco del Toro y El Brezo, situadas en el extremo occidental del cordón de lagunas peridunares. Hay que hacer notar que El Charco del Toro tenía lámina de agua en las imágenes registradas en febrero de 1990, año de pluviometría similar, e incluso en agosto de ese mismo año. En las imágenes de febrero de 1997 y marzo 2004, también se observa una reducción de la lámina de agua de esta laguna. Esta dinámica pone en evidencia la reducción, incluso en años húmedos, de la lámina de agua en algunas lagunas, como El Charco del Toro y El

Brezo, que podría deberse a las extracciones intensivas de agua subterránea que se han realizado durante los últimos años en Matalascañas.

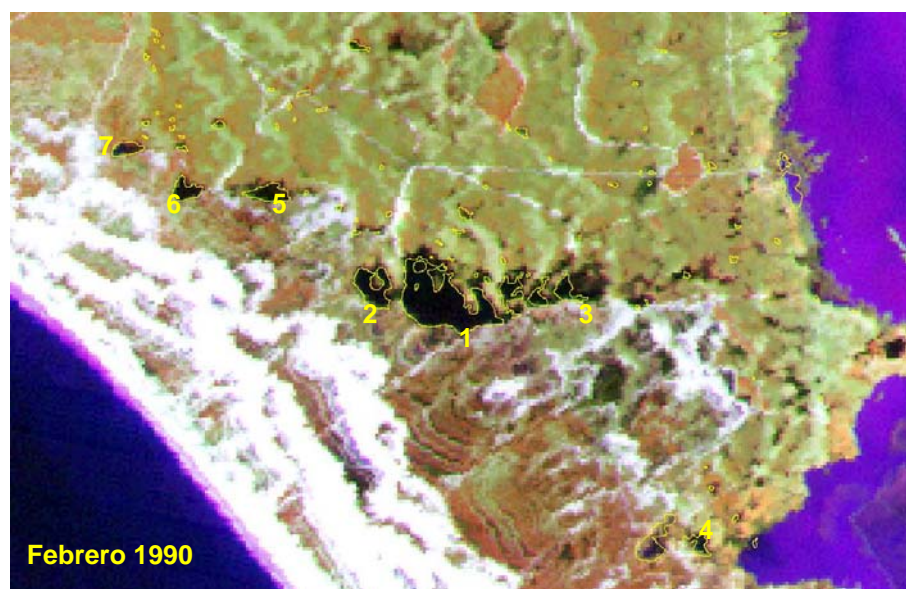


Figura 83a. Sector de Santa Olalla [Santa Olalla (1), La Dulce (2), Las Pajas (3), El Sopotón (4), Taraje (5), Zahillo (6), Charco del Toro (7)]

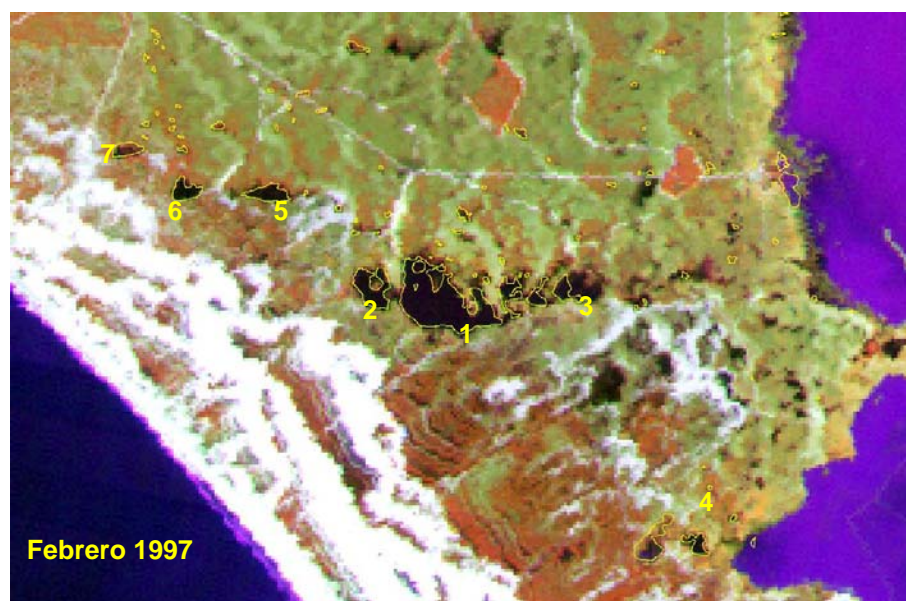


Figura 83b. Sector de Santa Olalla [Santa Olalla (1), La Dulce (2), Las Pajas (3), El Sopotón (4), Taraje (5), Zahillo (6), Charco del Toro (7)]

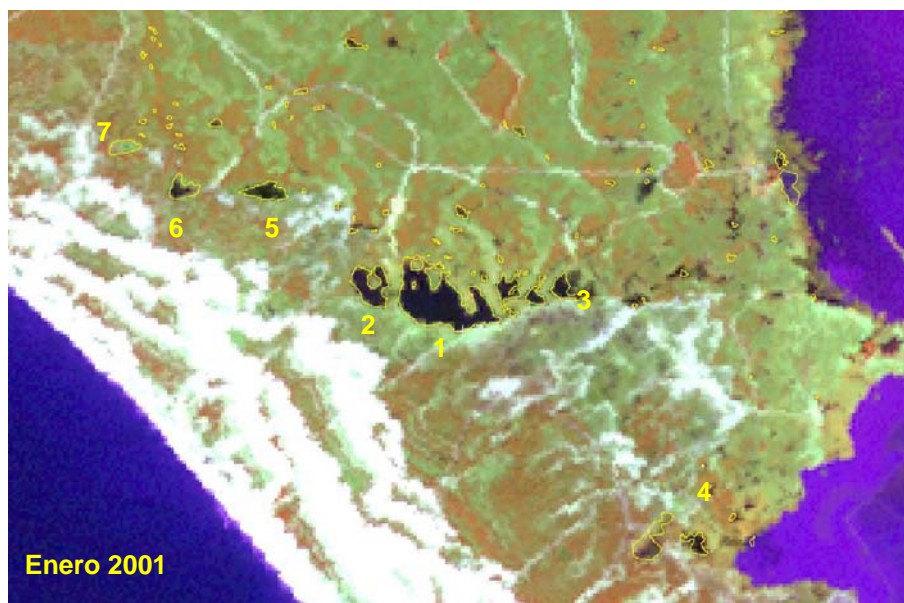


Figura 83c. Sector de Santa Olalla [Santa Olalla (1), La Dulce (2), Las Pajas (3), El Sopotón (4), Taraje (5), Zahillo (6), Charco del Toro (7)]

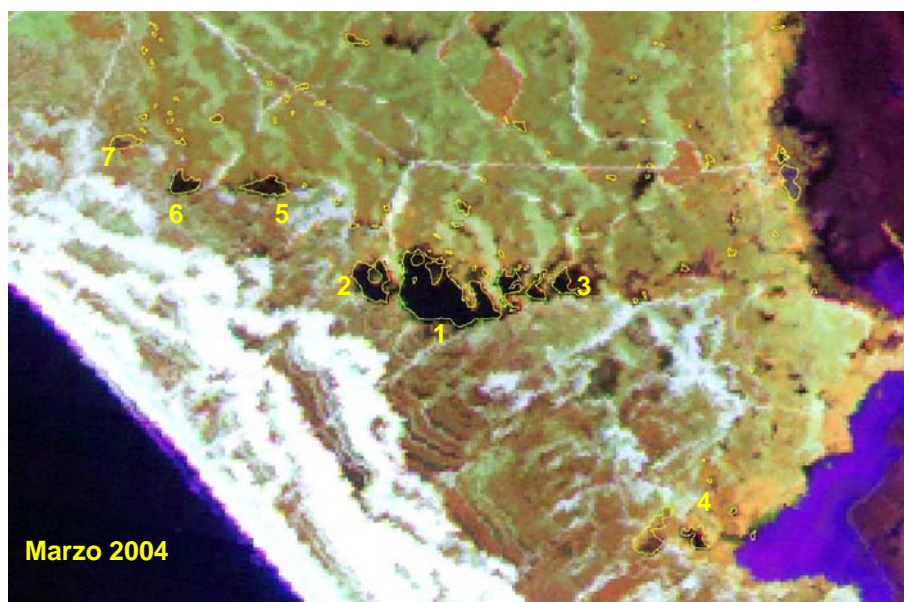


Figura 83d. Sector de Santa Olalla [Santa Olalla (1), La Dulce (2), Las Pajas (3), El Sopotón (4), Taraje (5), Zahillo (6), Charco del Toro (7)]

Por otra parte, el análisis de la serie de imágenes Landsat muestra una recuperación generalizada de las lagunas del MELAD en el sector de El Abalarío, en el Parque Natural, como consecuencia de los tratamientos selvícolas para la eliminación de las masas de eucalipto. Sin embargo, en el sector occidental del Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables, lagunas como La Verdeja, Pino Alto, Conchas, La Vaca, de La Res, Río Oro, Quemada, de Las Turnas permanecen sin agua incluso en años

hidrológicos húmedos posiblemente debido a su carácter epigénico temporal estacional o esporádico.

Las imágenes de 1994 y 2005, correspondientes a ciclos hidrológicos secos muestran una situación muy diferente a las registradas, con un descenso muy importante de la lámina de agua de las lagunas temporales y permanentes. En la imagen de septiembre de 2005, la laguna de Santa Olalla y El Hondón registran un nivel de inundación todavía menor que en septiembre de 2004. Las alimentadas de forma artificial, como El Acebuche, Lucio del Palacio y Lucio del Bolín, que tienen agua en septiembre de 2004, aparecen secas en septiembre de 2005.

## **6 Cartografía de Usos del Suelo en Almonte- Marismas**

Desde los años sesenta la superficie correspondiente al acuífero Almonte-Marismas ha estado sometido a importantes transformaciones para aprovechamientos agrícolas (cultivos de regadío) y forestales (replantaciones de eucaliptos y pinos). Los objetivos de este apartado del estudio han sido en primer lugar el cálculo de la superficie de los cultivos de regadío con el fin de obtener las demandas y volúmenes de riego durante el año 2004, y los retornos al acuífero. En una segunda fase, se ha realizado la cartografía de las superficies agrícolas y forestales durante distintas fechas entre 1985-2005 para identificar los cambios producidos por el uso agrícola y las replantaciones de pinos y eucaliptos en ese periodo.

### **6.1 Cartografía de superficies de regadío en 2004**

La utilización combinada de imágenes de satélite registradas en dos épocas del año (primavera y verano) se han utilizado tradicionalmente para caracterizar y cartografiar diferentes tipos de cultivos en función de su estado fenológico (Cuevas, J.M. *et al.*, 1992; Moreira, J.M. *et al.* (op. cit.); González, A. *et al.* (op. cit.), Gumiel, J.C. *et al.*, 1999). Con el fin de cuantificar la superficie correspondiente a los diferentes tipos de cultivo de regadío en el sector del acuífero durante 2004, se han seleccionado tres imágenes Landsat 5 TM registradas en abril, junio y septiembre de ese año. En el estudio de la evolución temporal entre los años 1985 y 2004 de la superficie ocupada por cultivos de regadío en el mismo sector, se han seleccionado diversas fechas de imágenes Landsat 5 TM y Landsat 7 ETM+ (tabla 5).

El método consiste en la realización de clasificaciones digitales de imágenes para la discriminación y cuantificación de dichas superficies. Los resultados se han ajustado mediante regresión lineal con los obtenidos por estimación directa a partir del muestreo aleatorio de una serie de segmentos de campo repartidos en el área de estudio (González-Alonso, F. *et al.*, 1994; González-Alonso, F. *et al.*, 1995). Para ello, se ha realizado la cartografía sistemática de segmentos muestrales distribuidos aleatoriamente en el área de estudio para realizar el cálculo de la superficie de los principales tipos de cultivo de regadío mediante estimación directa (figura 84).

Dada la heterogeneidad que presenta la zona y con el fin de disminuir la variabilidad de la muestra, se han definido 20 estratos homogéneos mediante fotointerpretación de la imagen y la fotografía aérea, en función del uso del suelo, tipo de cultivo, geometría y tamaño de las parcelas. Durante varias campañas de campo efectuadas entre abril y julio de 2004, se han cartografiado 60 segmentos de 100 ha cada uno, que representan

una superficie aproximada del 2,5% de la correspondiente al Acuífero Almonte-Marisma y Aljarafe (tabla 10). La distribución de los segmentos se ha llevado a cabo mediante un muestreo aleatorio sobre doce de los estratos previamente definidos en la zona de estudio.

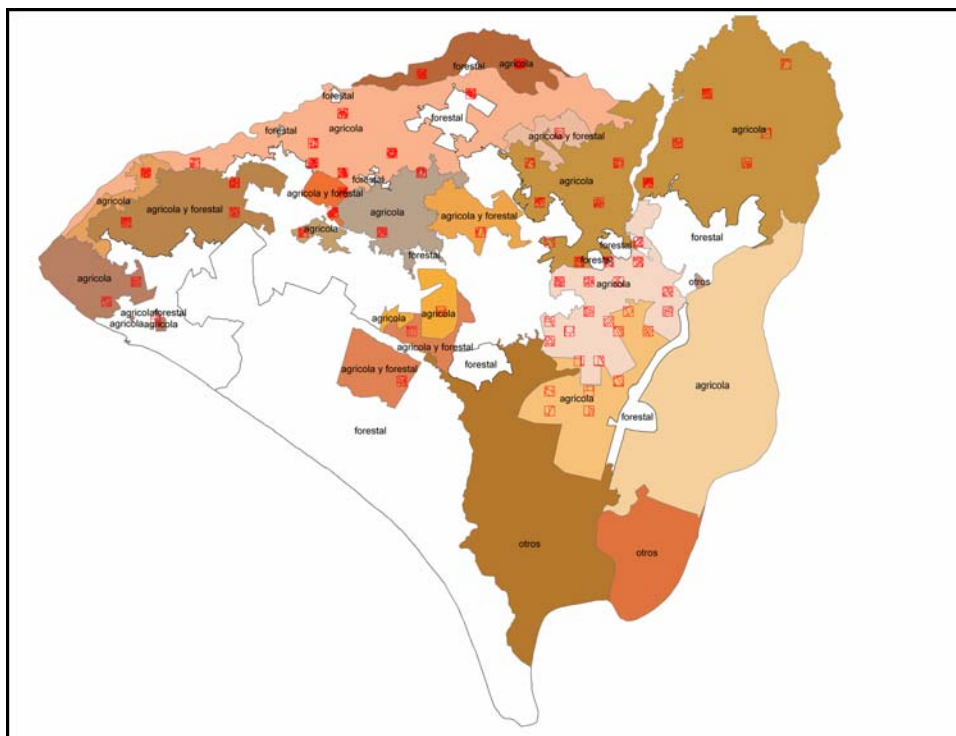


Figura 84. Área de estudio y situación de segmentos muestrales en los distintos estratos establecidos en el sector Almonte –Marismas – Aljarafe

Se han considerado los siguientes estratos:

- 9 estratos agrícolas, incluyendo la mayor parte de los distintos tipos de cultivos, a excepción del arroz
- 5 estratos con mezcla de cultivos y vegetación forestal, básicamente pinar y eucaliptal
- 1 estrato con matorral, pastizal y especies forestales de pinar y eucalipto
- 1 estrato correspondiente a marisma,
- 1 estrato de acuicultura que corresponde a una piscifactoría.

Para el cálculo por estimación directa sólo se han utilizado los segmentos estrictamente agrícolas, y los agrícolas y forestales. A estos últimos se les ha aplicado una máscara para evitar la mezcla de las especies forestales con las agrícolas. A cada uno de los segmentos se ha asociado un código identificativo del número de fotograma

y el número de segmento, así como el número de parcela, el uso del suelo y una clase correspondiente al tipo de cultivo (figura 85).

Zona	Código Estrato	Superficie (ha)	Nº de segmentos estimados de 1000x1000 m - tasa de 2,5%	Nº Segmentos Utilizados
agrícola	1	12071,74	3,02	13
agrícola	2	5707,89	1,43	3
agrícola	3	9850,27	2,46	9*
agrícola	4	6871,76	1,72	2
agrícola	5	24644,96	6,16	7
agrícola	6	42875,36	10,72	12
agrícola	7	2738,63	0,68	1
agrícola	8	5765,97	1,44	2
agrícola	9	926,96	0,23	1
agrícola	10	28460,68	7,12	-
agrícola	11	2244,92	0,56	1
agrícola y forestal	41	1286,54	0,32	2
agrícola y forestal	42	10509,16	2,63	3
agrícola y forestal	43	5953,89	1,49	2
agrícola y forestal	44	4032,94	1,01	1
agrícola y forestal	45	2434,66	0,61	1
forestal	0	103333,42	25,83	-
acuicultura	301	8835,89	2,21	-
embalse	302	106,10	0,03	-
marisma	320	28933,06	7,23	-
<b>Total Acuíferos</b>		<b>307584,78</b>	<b>76,90</b>	<b>60</b>
<b>Total Estratos</b>		<b>166376,31</b>		

Tabla 10. Estratos y tasa de muestreo en el Acuífero Almonte- Marisma y Aljarafe



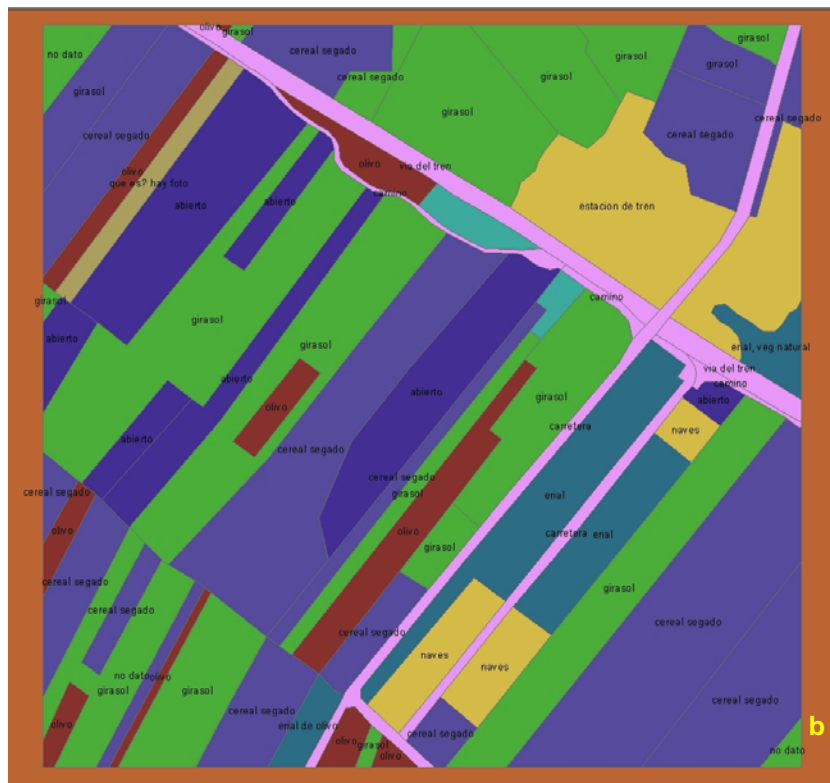
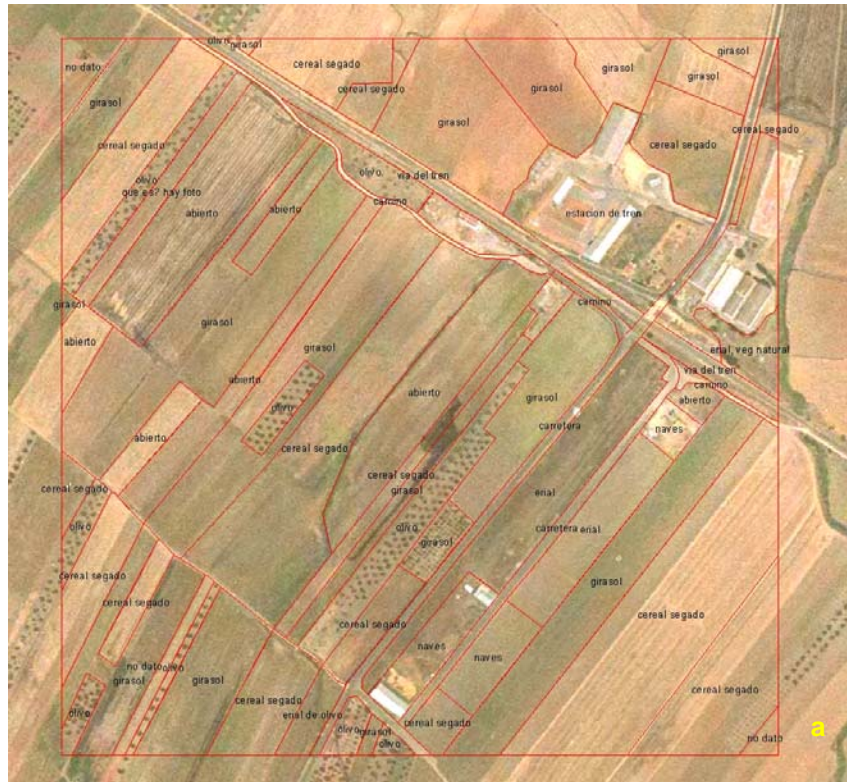


Figura 85. (a) Digitalización y asignación de parcelas en los segmentos muestrales  
 (b) Asignación de clases a los segmentos de muestreo

### 6.1.1 Cálculo de superficies de regadío mediante estimación directa

El método de *Expansión Directa* (ED) se basa en dividir el total de la superficie estudiada  $N_i$  en  $n_i$  segmentos, reconocidos en el campo y seleccionados aleatoriamente. Estos segmentos corresponden con los 60 cartografiados en los diferentes estratos. La superficie total de cada uno de los cultivos en los segmentos ( $x_i$ ) se multiplica por  $N_i/n_i$  y se obtiene la superficie total del cultivo en la superficie ( $y_i$ ).

$$y_i = x_i \times \frac{(N_i)}{n_i}$$

Los 60 segmentos se han digitalizado, incorporándose a la base de datos del S.I.G, y se calculado la superficie total ( $N_i$ ), la de los segmentos ( $n_i$ ), y la superficie para cada uno de los cultivos ( $x_i$ ). Mediante una hoja de cálculo se ha obtenido la superficie estimada para cada uno de ellos ( $y_i$ ). Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 11.

Cultivos	Hortícola	Herbáceos	Cítricos	Frutales de hueso	Olivar	Vid	Cultivos bajo plástico	Girasol	Transformación
<b>Estratos</b>									
est2			796,39	678,84			2867,39		52,16
est4	4,39	1101,92		22,68	3536,02	1947,27			
est5	488,95	3233,18	18,80	438,71	4085,71	5412,32		1546,34	173,29
est6	564,39	4315,62	4744,20	2918,88	18344,75	54,10		1210,11	819,28
est7			834,88	1,99			670,66		874,81
est8	74,20	1895,75			351,72			2280,61	
est9	21,72	37,27	133,89	6,51		78,22	440,11		3,33
est11	80,11	123,81		543,39	9,07	6,61	193,68		
est41	50,11	44,90	49,91	108,07		177,20	335,38		9,99
est42	26,93		17,17	498,09	106,35		3739,28		
est43		2978,27	2149,02						262,31
est44		1711,77			837,27	144,89		1073,95	
est45	4,41	343,37	94,97	239,21	1216,64				63,04
<b>Total</b>	<b>1315,22</b>	<b>15785,86</b>	<b>8839,22</b>	<b>5456,36</b>	<b>28487,53</b>	<b>7820,61</b>	<b>8246,50</b>	<b>6111,00</b>	<b>2258,21</b>

Tabla 11. Superficie para cada tipo de cultivo calculada por estimación directa en cada uno de los estratos

### 6.1.2 Cálculo de superficies de regadío mediante clasificación de imágenes

Para cuantificar las superficies de cultivo a partir de las imágenes Landsat, se ha realizado una clasificación supervisada multitemporal. Esta técnica permite controlar los resultados mediante la definición de diferentes clases espectrales. Sobre las imágenes se seleccionan parcelas de control homogéneas ("training areas") a las que se asigna una clase con el fin de discriminar el tipo de cultivo o uso del suelo. Con el fin de discriminar el máximo de la información espectral de las imágenes, se han definido 23 clases espectrales (tabla 12); así, en función de la fracción de cubierta (Fcc) se han diferenciado tres categorías para los cítricos: cítricos 1, con cubiertas superiores al 70%, cítricos 2, entre 40% y 70% y cítricos 3, menores del 40%. Se ha

establecido una categoría en la que están representadas distintas especies de frutales de hoja caduca, así como cultivos de huerta, cereal, maíz, algodón, cultivos bajo plástico arroz, vid de regadío, girasol, vid de secano y olivar.

Clases Espectrales	Abril	Junio	Clases Informativas
Huerta-1	↑	↑	Hortícolas
Huerta-2	↑	↓	
Huerta-3	↓	↑	
Huerta-4	↓	↓	
Transformación	↓	↓	
Maíz	↓	↑	
Cereal	↑↑	↑	Cereal
Girasol		↑	Girasol
Forrajero (Alfalfa)	↑	↑	
Frutales. Caducifolios	↑	↑	Frutales
Cítricos-1	↑	↑	Cítricos
Cítricos-2	↑	↑	
Cítricos-3	↑	↑	
Olivar	↑	↑	Olivar
Vid	↓	↑	Vid
Erial-1	↑	↑	Erial
Erial-2	↓	↑	
Erial-3	↑	↓	
Abierto	blanco	blanco	
Plástico-1	↑	↑	Plástico
Plástico-2	↑	↓	
Algodón	↓	↑	Algodón
Arroz	↓	↑	Arroz

Tabla 12. Clases espectrales e informativas utilizadas en la clasificación supervisada a partir de las parcelas de los segmentos muestrales

En cuanto a los cultivos hortícolas, se han diferenciado hasta 4 clases espectrales en función del estado de crecimiento de la planta en las dos épocas consideradas:

- cultivos con máximo desarrollo en primavera y preparados para la siembra o abiertos en verano,
- cultivos con máximo desarrollo en verano y preparados para la siembra o abiertos en primavera,
- cultivos con desarrollo en ambas fechas,
- barbecho en el año 2004.

Además de los cultivos de regadío, se han identificados campos abiertos y distintos tipos de erial con y sin vegetación natural, así como distintos tipos de superficies de agua y urbano para una mejor separación de las superficies regadas. Los cultivos de secano en verano presentan unas características espectrales similares a zonas de transformación agrícola debido al alto grado de exposición del suelo.

A partir de estas clases, se ha extraído la información espectral para cada una de las bandas en ambas imágenes (criterio de multitemporalidad). Se ha generado una clasificación supervisada a partir de las 6 bandas del visible e infrarrojo próximo de las dos imágenes utilizando un algoritmo de máxima probabilidad, en el que se han fijado diferentes umbrales de asignación para cada una de las clases con el fin de obtener el mapa de cultivos que más se asemeje a la realidad.

El análisis de los resultados muestra que la clase de cítricos es la que mejor se discrimina, aunque en el caso de los árboles más jóvenes, se puede confundir con frutales de hoja caduca que en primavera presentan poca masa foliar y dan una respuesta espectral muy similar. La vid de regadío, cereal de regadío, maíz y algodón se discriminan bien. Los hortícolas pueden mezclarse con áreas improductivas (eriales con y sin vegetación) y con áreas en transformación, si en ambas fechas no se encuentran cultivados. Los frutales se mezclan con cultivos hortícolas que no tienen desarrollo en primavera y con vid de secano y olivos si el porcentaje de Fcc es bajo.

Dada la dificultad de discriminación de algunas de las clases mencionadas, se ha procedido al reagrupamiento en 11 clases informacionales que van a representar la leyenda final del mapa (tabla 13, figura 86, mapa 29). Los tres tipos de cítricos se han reagrupado en una única clase denominada leñosos de hoja perenne. El resto de clases que no corresponden con ningún tipo de cultivo (eriales, abiertos, etc.), se han agrupado en una clase única denominada improductivo que se ha eliminado.

La clasificación resultante se ha suavizado, utilizando un filtro móvil de 3x3 que mantiene los valores enteros de los números digitales asignados a cada categoría. Se ha utilizado un filtro modal donde la celdilla situada en el centro de la matriz se asigna a la categoría más frecuente de entre las ocho restantes ocupadas por la ventana (Pinilla, 1995).

A estos resultados se ha aplicado una máscara correspondiente a las zonas de regadío, según la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHG), en el acuífero Almonte-Marismas. Finalmente, la clasificación resultante (tabla 13) se ha contrastado

con 100 muestras aleatorias repartidas en la zona de estudio. El porcentaje de fiabilidad obtenido es del 75%, con un índice de Kappa de 0,02.

Clasificación	Clasificación (Ha)	Porcentaje de Regadío
Algodón	843,09	3,16%
Arroz	1784,27	6,69%
Cereal	3353,37	12,57%
Cítricos	1124,64	4,22%
Frutales	211,93	0,79%
Girasol	652,28	2,45%
Hortícolas	916,94	3,44%
Maíz	25,41	0,10%
Olivar	3776,97	14,16%
Plástico	2170,08	8,14%
Vid	1552,25	5,82%
<b>Total</b>	<b>16411,22</b>	<b>61,53%</b>

Tabla 13. Superficies de cultivos de regadío en el Acuífero Almonte-Marismas

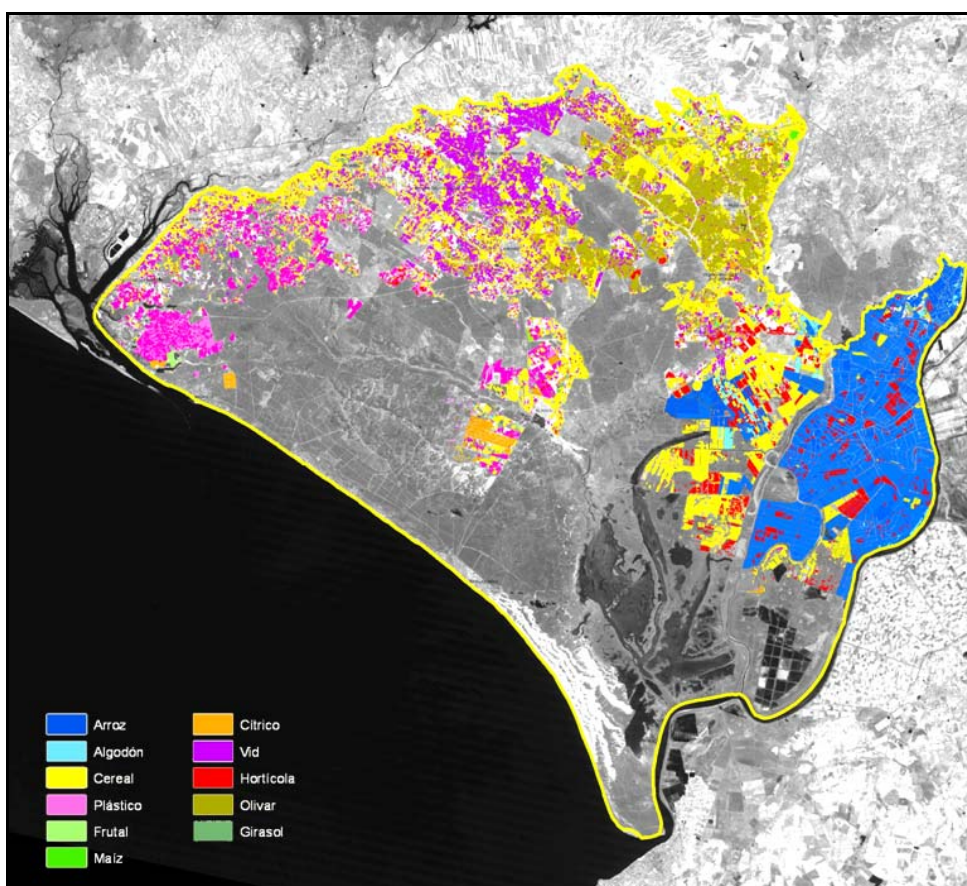


Figura 86. Cartografía de superficies agrícolas a partir de imágenes Landsat (abril-junio-septiembre 2004)

### 6.1.3 Resultados del cálculo de superficies mediante regresión simple

Una vez verificada la clasificación con muestreo de campo, se ha realizado el ajuste por regresión simple de las superficies de cultivo (tabla 14).

Para el cálculo mediante regresión simple se utiliza la expresión:

$$Y_{reg} = Y_{exp} + b + (X_{tot} - x_{seg})$$

donde  $Y_{reg}$  = superficie media del cultivo por Regresión  
 $Y_{exp}$  = superficie media del cultivo por Estimación Directa (ED)  
 $b$  = coeficiente de regresión simple  
 $X_{tot}$  = superficie media del cultivo en el total clasificado

Clasificación	Clasificación (ha)	ED (ha)	Regresión (ha)	ER
Algodón	843,09	–	–	1,00
Arroz	1784,27	4562,77	4992,40	2,83
Cereal	3353,37	2530,76	564,80	2,07
Cítricos	1124,64	1417,09	1468,44	16,36
Frutales	211,93	874,75	812,66	1,88
Girasol	652,28	979,71	964,79	1,39
Hortícolas	916,94	210,85	139,16	2,44
Maíz	25,41	–	–	1,00
Olivar	3776,97	4567,07	4988,41	5,65
Plástico	2170,08	1322,06	1430,72	5,54
Vid	1552,25	1253,79	609,87	3,23
<b>Total</b>	<b>16411,22</b>	<b>17718,87</b>	<b>15971,25</b>	

Tabla 14. Resultados de superficies de cultivos mediante regresión simple en el acuífero Almonte-Marismas

La precisión de la estimación por teledetección respecto a la ED, se mide mediante la eficiencia relativa (ER), que en el caso de la regresión simple viene dada por la expresión  $ER=1/(1-r^2)$ , donde 'r' es el coeficiente de determinación simple. Cuanto mayor sea el valor de ER, mayor es el interés de emplear este estimador. Al analizar los resultados, se observa que hay una mejora de las estimaciones en todas las clases informacionales ( $ER \geq 1,5$ ) a excepción de los frutales, cereal y girasol. El maíz, el viñedo de regadío y algodón son cultivos minoritarios durante este periodo, su coeficiente de correlación es nulo y, por tanto, ER es 1 debido al pequeño tamaño de la muestra. La superficie total de cultivos estimada mediante regresión para el acuífero Almonte-Marismas es de 15971,25 ha, lo que supone el 59,88% de la superficie estudiada. El resto corresponde en su mayor parte a zonas urbanas, campos improductivos y zonas con vegetación natural.

#### 6.1.4 Superficies de cultivos por celdas en el dominio del modelo de flujo

Los resultados anteriores se han utilizado para el cálculo, mediante regresión simple, de las superficies de cultivo para una malla de celdas de  $0,25 \text{ km}^2$  en el dominio relacionado con el modelo de flujo subterráneo del acuífero Almonte-Marismas (figura 87). De esta manera se ha dispuesto de los valores en las celdas como paso previo a la estimación zonificada de los volúmenes de agua aplicados para riego y la recarga por retornos de riego asociada.

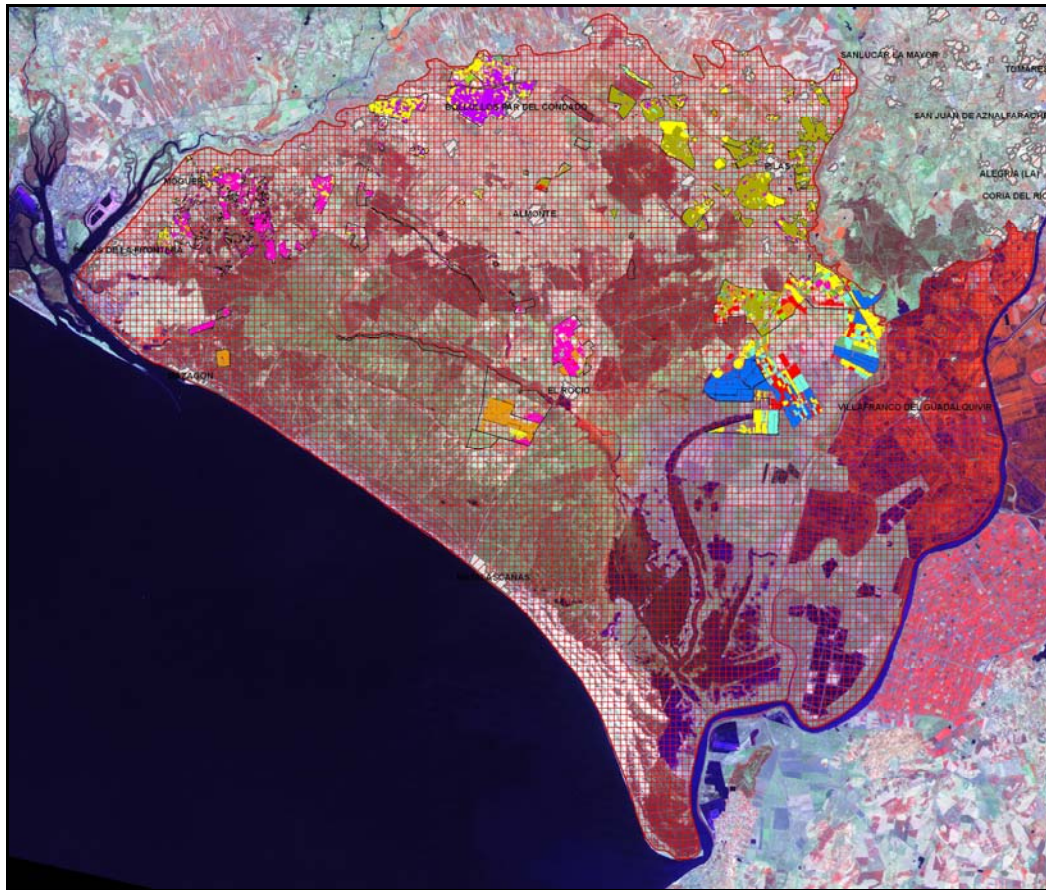


Figura 87. Dominio del modelo de flujo subterráneo en el Acuífero Almonte-Marismas sobre superficies agrícolas regadas con agua subterránea

Se ha aplicado la máscara correspondiente a las zonas regadas con agua subterránea según la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir para esta cuenca. La máscara correspondiente a las zonas regadas con agua subterránea de la Cuenca del Guadiana se ha tomado del Inventario de Regadíos de Andalucía (ICRA, actualización de 2002). En la tabla 15 se indican las superficies regadas con agua subterránea, considerando el límite del modelo de flujo a partir de la suma de los valores correspondientes a las celdas de  $0,25 \text{ km}^2$ . La superficie de cultivos de regadío obtenida por teledetección,

asciende a 10881,61 ha, lo que corresponde al 86,92% de la superficie que según la CHG es regada con agua subterránea.

En la tabla 16 se muestran los consumos de agua en  $\text{hm}^3/\text{a}$  obtenidos a partir de las dotaciones establecidas por la Oficina de Planificación hidrológica (OPH) para cada uno de los cultivos, divididas por 0,88. Estas cifras corresponden a los cálculos de las dotaciones en una situación ideal, sin límite de agua y sin plagas. Dividiendo por un factor de 0,88 se obtienen valores más próximos a las necesidades netas en un año hidrológico normal. Los resultados obtenidos a partir de las dotaciones de riego son los que se utilizan en la ejecución de balances hídricos y en planificación.

Cultivos	Superficie (ha)	Porcentaje regado con agua subterránea
Algodón	255,04	2,04%
Arroz	313,13	2,50%
Cereal	2404,70	19,21%
Cítricos-20% Fcc	8,45	0,07%
Cítricos-20-50% Fcc	376,95	3,01%
Cítricos-50% Fcc	610,65	4,88%
Cultivos bajo plástico	2164,90	17,29%
Frutales de hueso	191,51	1,53%
Girasol	391,81	3,13%
Hortícolas	363,59	2,90%
Maíz	25,41	0,20%
Olivar	3775,47	30,16%
<b>Total</b>	<b>10881,610</b>	<b>86,92%</b>

Tabla 15. Superficies de cultivo del acuífero Almonte-Marismas considerados para el modelo por suma de valores obtenidos en celdas de  $0,25 \text{ km}^2$ .

Cultivo	$\text{m}^3/\text{ha}/\text{a}$	Consumo total ( $\text{hm}^3/\text{a}$ )
Algodón	5080	1,47
Arroz	14000	4,98
Cereal	1500	4,10
Cítricos	5021	6,18
Plástico	4300	10,58
Frutales	4441	0,97
Girasol	1500	0,67
Hortícolas	4890	2,02
Maíz	5285	0,15
Olivar	1690	7,25

Tabla 16. Dotaciones y consumo total para cada uno de los cultivos en el acuífero Almonte-Marismas



Aplicadas las dotaciones correspondientes, se observa que los cultivos bajo plástico (fresa) son los que presentan un mayor consumo de agua en el acuífero seguido del olivar y los cítricos.

## 6.2 Cartografía de superficies agrícolas entre 1985-2005

En 1985 se ha realizado el estudio a partir la única imagen disponible, registrada en el mes de febrero. Esta imagen ha permitido la discriminación de diferentes cultivos de regadío (cultivos bajo plástico, cítricos, arroz y cultivos herbáceos de invierno) (figura 88, mapa 30)). Se ha generado una clasificación supervisada a partir de áreas de entrenamiento de los diferentes cultivos mediante fotointerpretación.

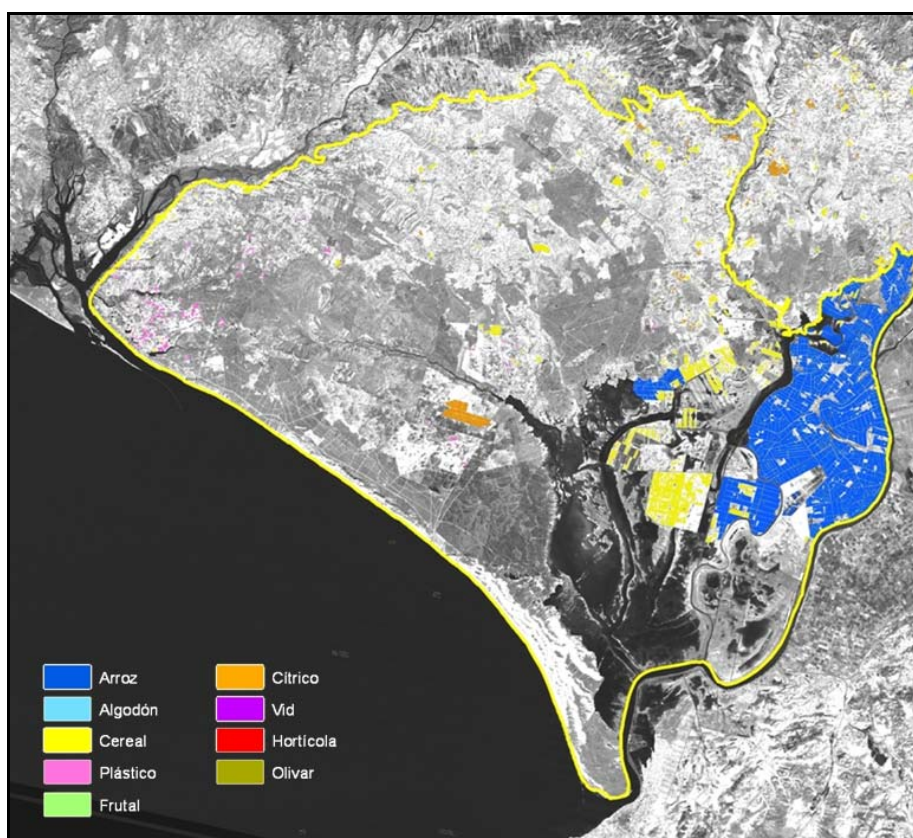


Figura 88. Cartografía de superficies agrícolas a partir de imagen Landsat (febrero 1985)

Los resultados obtenidos en la clasificación han sido limitados (figura 89) debido al estado fenológico de los cultivos en esta época del año. Sin embargo, aunque el arroz no está en desarrollo, puede discriminarse por la signatura espectral característica de los campos donde se cultiva. En el caso de los herbáceos, no se han podido diferenciar los herbáceos de secano y regadío en esta fecha, ni tampoco la vegetación natural. Sí

ha sido posible la cartografía de los cultivos leñosos de regadío (cítricos) y los cultivos bajo plástico.

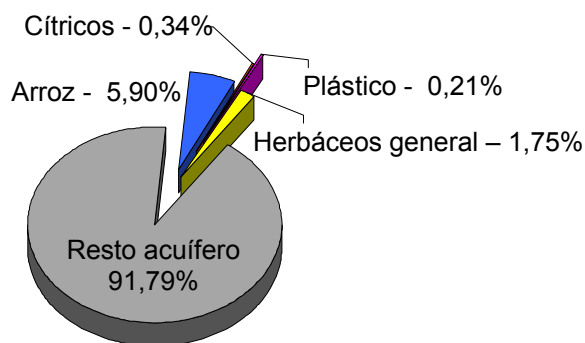


Figura 89. Porcentaje de cultivos en febrero de 1985 acuífero Almonte-Marismas

En el año 1990, se han analizado dos imágenes Landsat 5 TM (febrero y agosto). Estas imágenes se han integrado en un fichero multitemporal a partir del que se ha realizado una clasificación supervisada (figura 90, mapa 31).

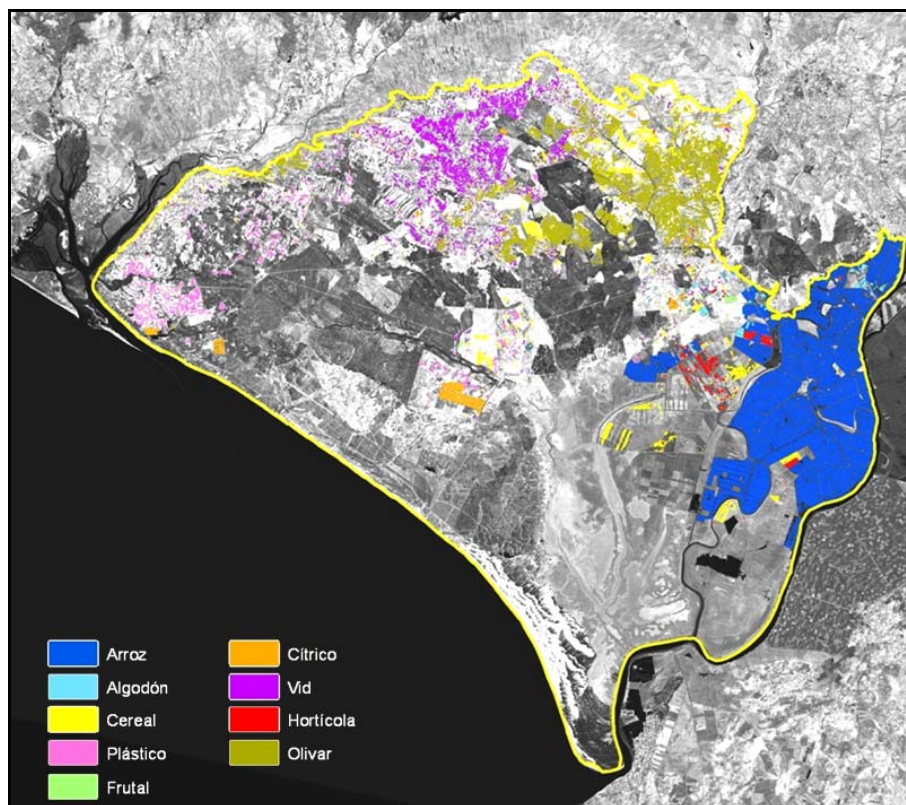


Figura 90. Cartografía de superficies agrícolas a partir de imágenes Landsat (febrero-agosto 1990)

Se han obtenido 9 clases en función del estado fenológico de los cultivos en este periodo, diferenciándose: arroz, algodón, cereal, cítricos, cultivos herbáceos de regadío

(hortícolas), frutales de hoja caduca, cultivos bajo plástico, olivar y vid (figura 91). Los resultados de la clasificación se han verificado a partir del mapa de usos del suelo "Corine Land Cover" (1990).

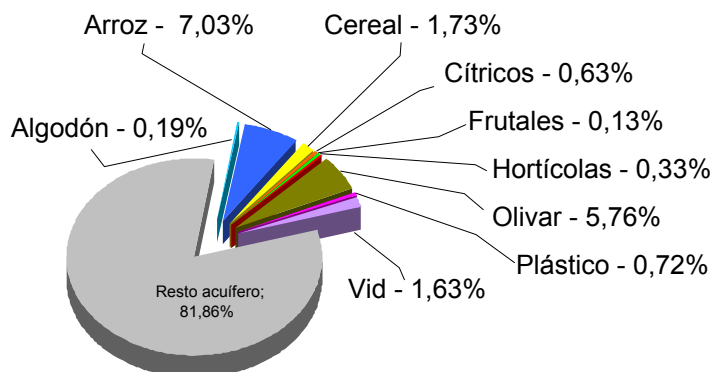


Figura 91. Porcentaje de cultivos en el año 1990 para el acuífero Almonte-Marismas

El año 1994 fue especialmente seco, de ahí el descenso de la superficie de la mayoría de los cultivos en este periodo. Se han analizado dos imágenes Landsat 5 TM registradas en marzo y septiembre. El tratamiento se ha realizado de manera similar a las anteriores fechas, discriminándose las mismas clases que en 1990 (figura 92, mapa 32).

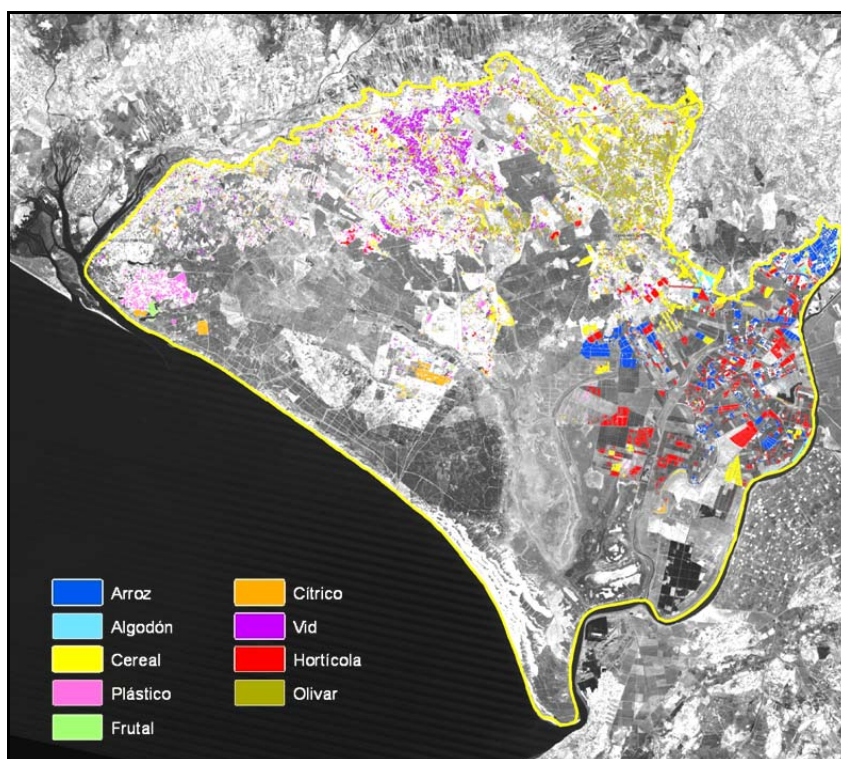


Figura 92. Cartografía de superficies agrícolas a partir de imágenes Landsat (marzo/sept. 1994)

El arroz sufre un descenso considerable debido a la sequía. Asimismo, se observa una disminución de la superficie en el resto de los cultivos, salvo en los herbáceos de regadío (figura 93).

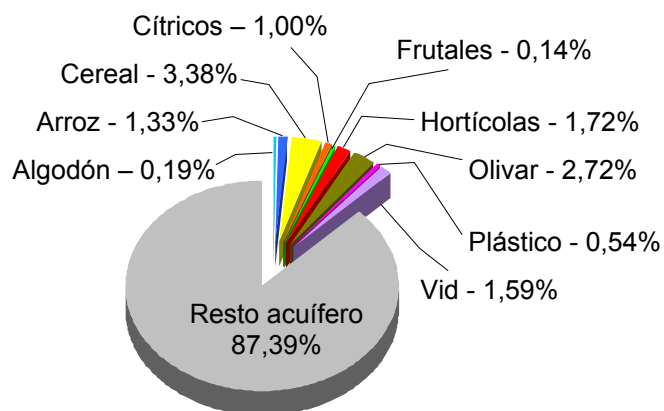


Figura 93. Porcentaje de cultivos en el año 1994 para el acuífero Almonte-Marismas

De la misma forma, para el 2001 se han utilizado dos imágenes Landsat 5 TM de abril y septiembre, donde se han discriminado las mismas 9 clases que en fechas anteriores (figura 94 y 95, mapa 33). Los resultados se han verificado con el inventario de regadíos de Andalucía (actualización de 2002).

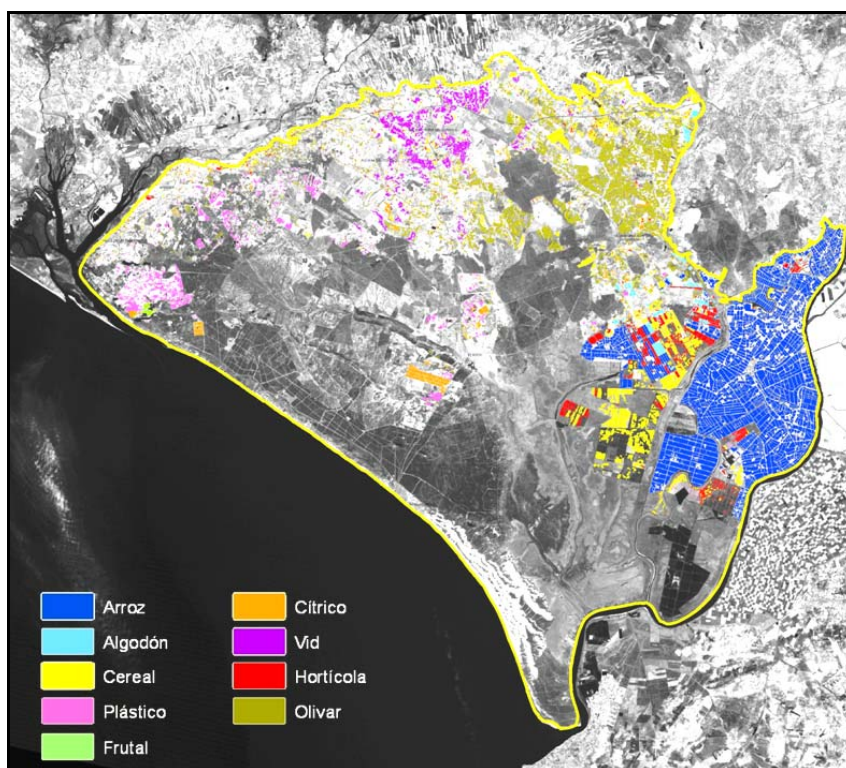


Figura 94. Cartografía de superficies agrícolas a partir de imágenes Landsat (abril/sept. 2001)

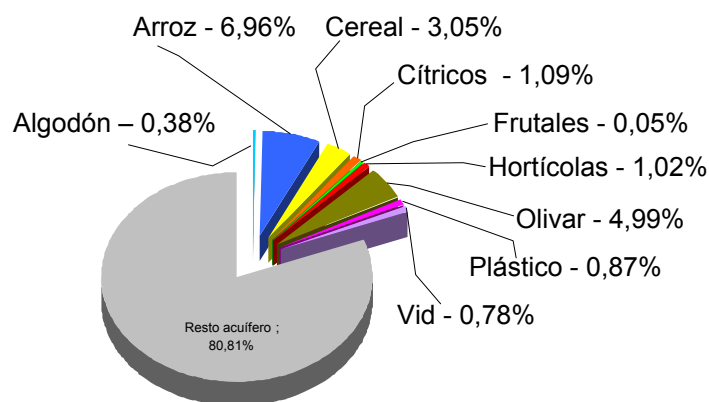


Figura 95. Porcentaje de cultivos en el año 2001 para el acuífero Almonte-Marismas

### 6.3 Cartografía de superficies forestales

En Doñana existen diversos estudios orientados a la evaluación y reconocimiento de las superficies forestales a partir de imágenes Landsat [Cuevas et al. (op. cit.); Cuevas, J.M. y González Alonso, F., 1993.; Moreira et al. (op. cit.)].

A partir de la imagen Landsat de junio de 2004, se han establecido varias categorías representativas de las masas de pinar de piñonero y las de eucalipto según diferentes fracciones de cabida cubierta. Estas categorías se han agrupado en dos: pinar de piñonero y eucaliptal. Se ha realizado una clasificación supervisada por el método de máxima probabilidad de esta imagen con control de campo para estimar la superficie forestal. Utilizando los mismos criterios, se han clasificado las imágenes registradas en febrero de 1985, agosto de 1990, septiembre de 1994, septiembre de 2001 para cartografiar los cambios de las masas de eucalipto y pino piñonero en el sector del acuífero Almonte-Marismas (tabla 17). Las figuras 96 a, b, c, d y e representan las clasificaciones correspondientes a cada fecha, que aparecen en detalle en los mapas 34, 35, 36, 37 y 38.

Fecha	Superficie masas de eucalipto (ha)	Superficie masas de pinar de piñonero (ha)
01/02/1985	11435,22	23944,77
16/08/1990	13508,82	27147,15
06/09/1994	13995,54	23070,96
01/09/2001	4541,58	25852,32
29/06/2004	5660,55	25652,88

Tabla 17. Superficies forestales (masas de pino piñonero y eucalipto) calculadas por el método de clasificación supervisada

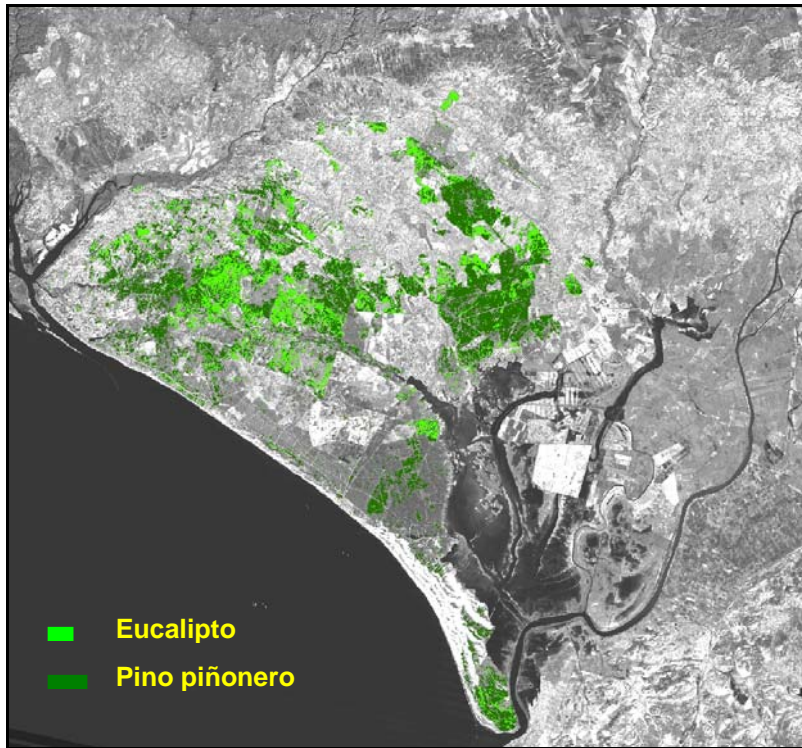


Figura 96 (a). Clasificación de superficies forestales (Landsat Febrero 1985)

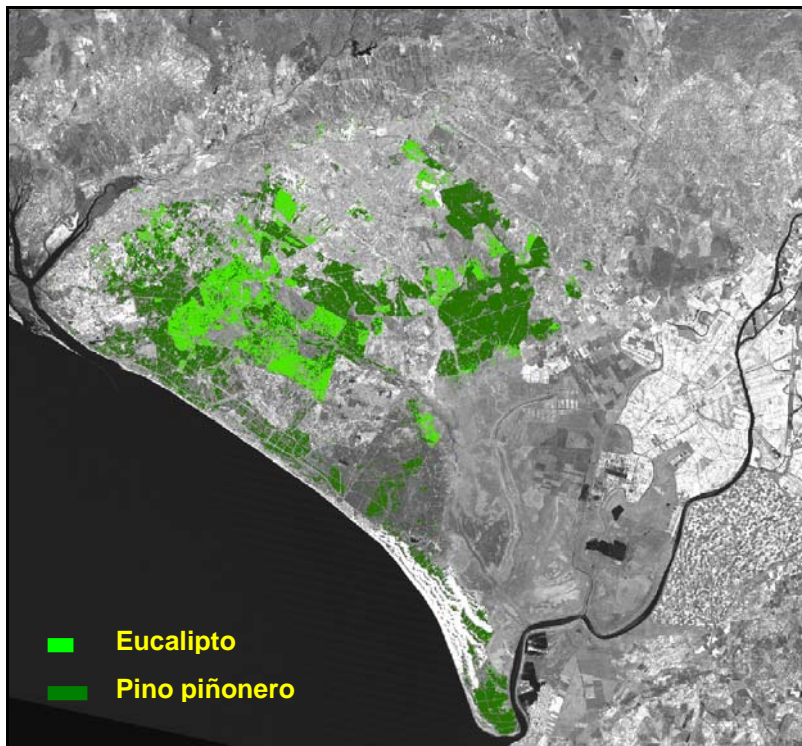


Figura 96 (b). Clasificación de superficies forestales (Landsat Agosto 1990)

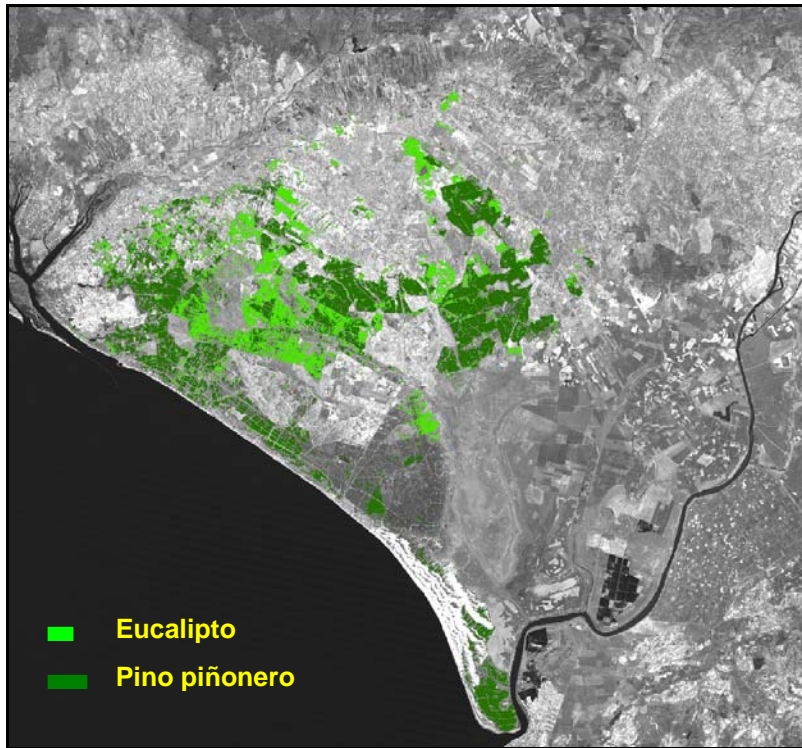


Figura 96 (c). Clasificación de superficies forestales (Landsat Sept. 1994)

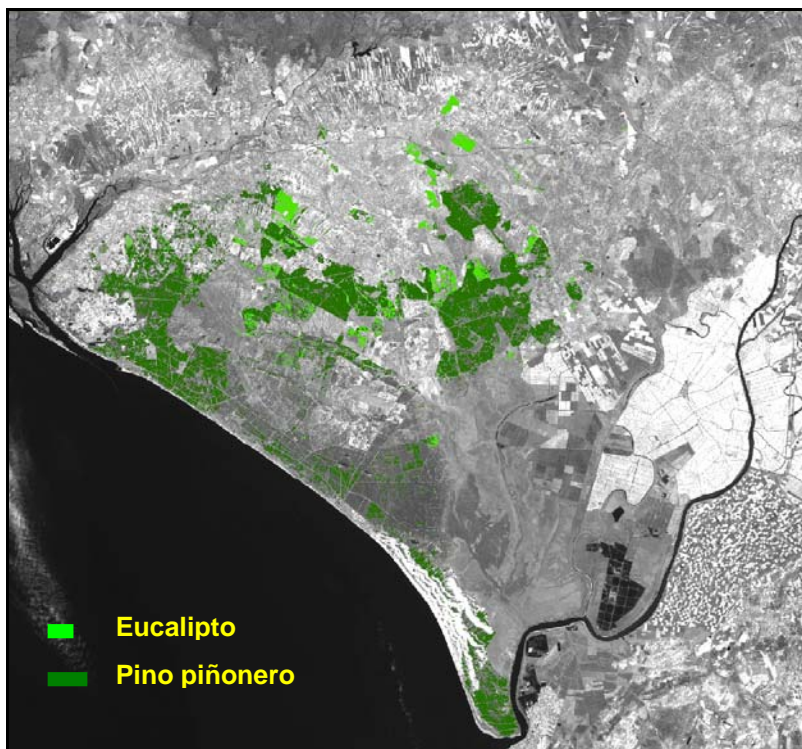


Figura 96 (d). Clasificación de superficies forestales (Landsat Sept. 2001)

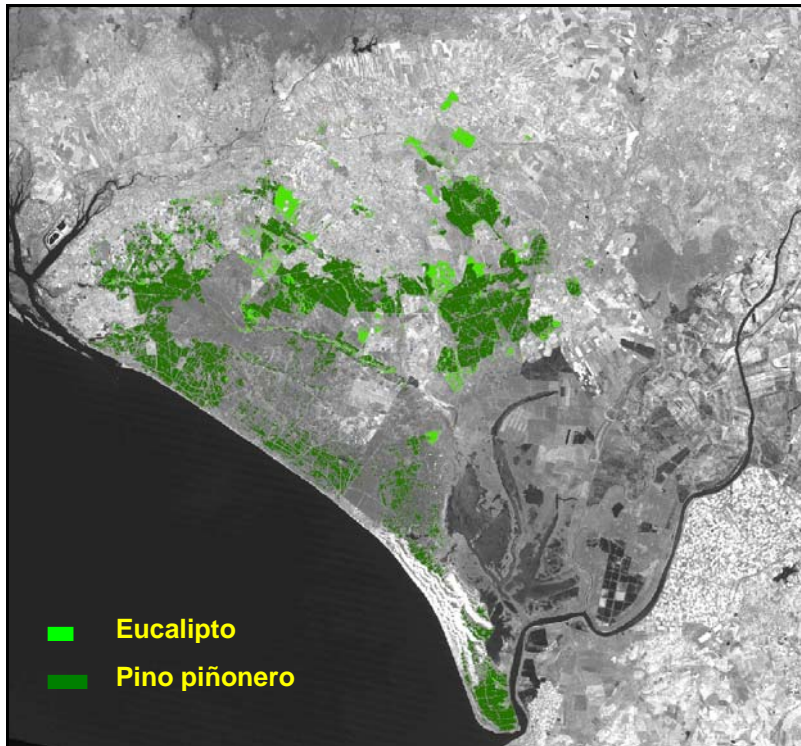


Figura 96 (e). Clasificación de superficies forestales (Landsat Junio 2004)

## **6.4 Cambios en las superficies agrícolas y forestales en el ámbito del acuífero Almonte-Marismas entre 1985 y 2005**

### **6.4.1 Cambios en las superficies agrícolas**

Una vez realizada la cartografía de las superficies de regadío en las distintas fechas consideradas, se ha tratado de analizar su evolución temporal en base a las distintas clasificaciones obtenidas entre 1985 hasta 2004. Sin embargo, dadas las diferencias en la fecha del registro de las imágenes analizadas, algunos cultivos no han podido considerarse, particularmente los cultivos que tienen rotaciones a lo largo del año.

En líneas generales, existe un aumento de superficies cultivadas en el acuífero desde 1985 hasta el 2004 (figura 97). Sin embargo, y dado que para el año 1985 sólo se ha podido utilizar una imagen de invierno, no ha sido posible cartografiar las superficies cultivadas en otras estaciones y por tanto no puede tomarse como año de referencia.



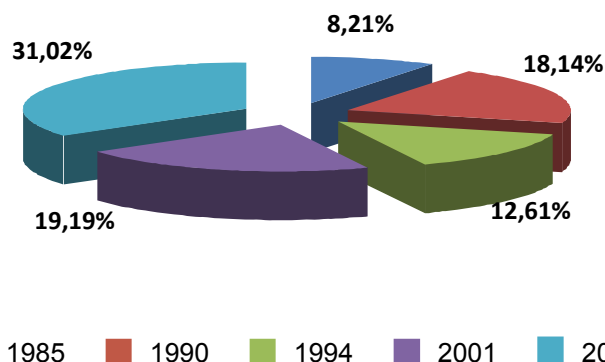


Figura 97. Distribución de cultivos por años (1985-2004) en el acuífero Almonte Marismas

En la tabla 18 y figura 98 se observa como hasta el año 2001 se produce un aumento de leñosos de regadío y un descenso en 2004, que es debido a la transformación de cítricos llevada a cabo a principios de los años noventa. El 1994 es un año de precipitaciones mínimas en un ciclo seco, durante el que muchos cultivos se secaron por lo que la respuesta espectral de la vegetación es muy baja debido al estrés hídrico. El aumento de la superficie de cítricos se debe a que los árboles plantados en años anteriores dan un porcentaje de fracción de cabida cubierta superior al 10%, lo que se traduce en una respuesta espectral característica de vegetación.

Cultivo	1985	1990	1994	2001	2004
Algodón		502,83	492,25	1012,71	880,08
Arroz	15580,38	18547,92	3514,87	18363,19	22902,59
Herbáceos de secano (Cereal)		4568,40	8925,50	8039,75	22420,30
Leñosos regadío (perennes: cítricos)	897,34	1661,85	2629,12	2863,48	1672,74
Leñosos regadío (hoja caduca: frutales de hueso)		331,65	378,77	142,09	390,60
Herbáceos de regadío (Hortícolas)		880,47	4533,03	2702,68	1409,75
Leñosos de Secano (olivar)		15187,23	7177,10	13161,76	11528,42
Cultivos bajo plástico (fresas)	557,45	1888,11	1424,44	2303,15	6934,53
Vid		4301,37	4190,64	2052,15	10825,98
<b>Total</b>	<b>21655,18</b>	<b>47869,83</b>	<b>33265,72</b>	<b>50640,97</b>	<b>81843,67</b>

Tabla 18. Superficies de cultivo (en hectáreas) para el acuífero Almonte-Marismas

Dadas las necesidades hídricas del arroz, durante la sequía de 2004 se utilizaron las parcelas de este cultivo para la plantación de herbáceas con necesidades hídricas menores, de ahí el aumento de superficie de este cultivo con respecto a otros años.

Cabe reseñar el incremento de superficie de los cultivos bajo plástico a lo largo de los años, con un leve descenso en 1994.

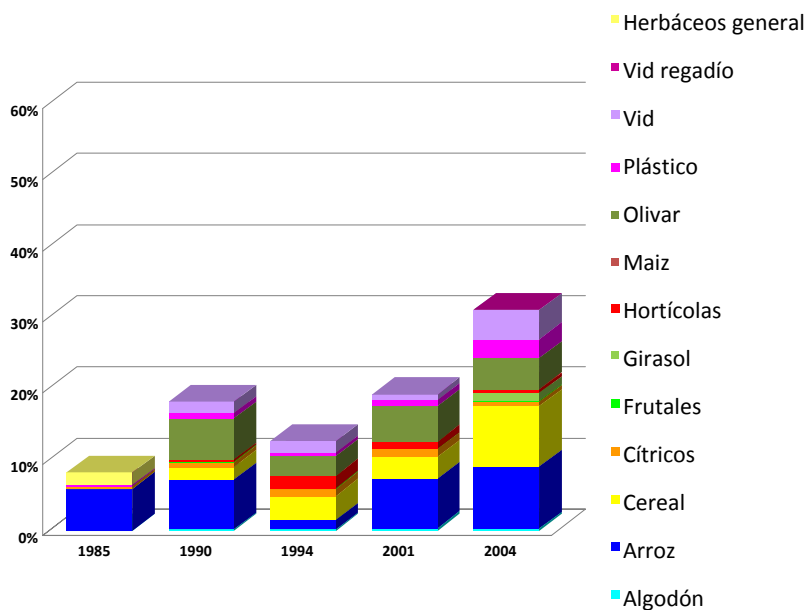


Figura 98. Evolución temporal de superficies cultivadas en el acuífero Almonte Marismas en el periodo 1985-2004

#### 6.4.2 Cambios en las superficies forestales

Los resultados obtenidos en las sucesivas clasificaciones muestran la evolución de los tratamientos selvícolas y los aprovechamientos forestales aplicados a las masas de pinar y eucalipto en la superficie correspondiente al acuífero Almonte-Marismas. En 1985 el pinar ocupa una extensión de 23944,77 ha y el eucalipto de 11435,22 ha. Las principales masas de pino y eucalipto se localizan en esta fecha al norte del arroyo de La Rocina, en los términos de Villamanrique de la Condesa, Hinojos, Almonte y Moguer. El eucalipto es una especie con necesidades hídricas mayores que el pino, por lo que sus repoblaciones se sitúan en terrenos con mayor disponibilidad de agua (entorno a arroyos como el de La Rocina, El Algarbe,...). En el Manto Eólico Litoral las masas de pinar y de eucalipto son de menor entidad. El pinar se extiende fundamentalmente al este del MELAD, al norte del complejo de Santa Olalla y en la zona meridional del Parque Nacional; y por otro lado en un sector más occidental del MELAD. Las zonas repobladas en su mayoría con eucalipto se ubican

fundamentalmente en una franja situada entre el arroyo de la Rocina y Ribetehilos en el Bajo Manto Eólico de Dunas Fitoestables. Otro núcleo importante de esta especie se extiende en el noreste del MELAD, colindante con la Marisma, en los terrenos conocidos como Los Monteruelos y El Guaperal.

En 1990 la superficie calculada de pinar de piñonero es de 27147,15 ha y la de eucalipto de 13508,82 ha. Las repoblaciones de eucalipto llevadas a cabo en años anteriores muestran en esta imagen un gran aumento de la espesura de sus masas. El eucalipto es una especie de crecimiento rápido y los cambios que se manifiestan en sus repoblaciones son mayores que los de la conífera, que tiene un crecimiento menor. El mayor aumento en la fracción de cabida cubierta de la conífera se observa en las repoblaciones situadas en el MELAD.

A finales de 1993 parte de las repoblaciones de eucalipto situadas al noroeste de Ribetehilos y en la cabecera de La Rocina son eliminadas. En 1994 también son cortadas las masas de eucalipto situadas inmediatamente al norte de la línea Ribetehilos.

La imagen de 2001 muestra los resultados de la gestión forestal aplicada desde la década de los 80 (Custodio et al. (op. cit.)), que tiene entre sus objetivos la eliminación de la masa de eucalipto. La superficie correspondiente a eucalipto pasa a ser de 4541,58 ha y la de pinar de 25852,32 ha. El mayor cambio se observa en los terrenos situados entorno al arroyo de La Rocina y en el noreste del MELAD (El Guaperal, El Arrecife, Los Monteruelos), donde la masa de eucalipto ha sido cortada casi en su totalidad. En las masas de pinar se observan cambios fundamentalmente en su espesura. Al noroeste de las lagunas Charco del Toro y Alcornoque Escobar se han iniciado cortas en la masa de pinar que tienen como objetivo su eliminación progresiva. En la parte más septentrional del límite del acuífero Almonte-Marismas (en los términos de Hinojos, Villalba del Alcor, Manzanilla y Chucena) se localizan en esta fecha nuevas repoblaciones de eucalipto.

Parte de las masas de eucalipto han sido eliminadas al llegar su turno de corta en la mitad septentrional de la superficie correspondiente al acuífero Almonte-Marismas (términos de Bonares, Hinojos, Rociana del Condado,...) en el período 2001 – 2004.

Se han llevado a cabo también aprovechamientos forestales en el Parque Nacional de Doñana, consistentes en la eliminación de la masa de pinar situada al noroeste de las lagunas Charco del Toro y Alcornoque Escobar y de la localizada en la zona conocida como Mata de los Domínguez.

## 7 Cartografía de la Vegetación Higrofítica

### 7.1 Cartografía de la vegetación higrofítica a partir de la imagen Landsat

El matorral higrofítico se localiza en las zonas más húmedas y deprimidas, con encharcamiento temporal en invierno, así como en aquellos puntos en donde la capa freática está próxima a la superficie. En el Parque Natural de Doñana se localiza un importante conjunto de formaciones palustres conocidas como lagunas turbosas de Ribetehilos. Estas lagunas se sitúan en una línea que corresponde al contacto entre el Alto Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables y el Bajo Manto Eólico de Dunas Fitoestables. La conservación de las lagunas turbosas de Ribetehilos tiene una gran importancia e interés debido a su carácter relíctico y por sus rasgos de atlanticidad (García Murillo y Sousa, op. cit.).

La cartografía de la vegetación higrofítica se ha realizado a partir de una clasificación supervisada de la imagen Landsat de junio de 2004 por el método de máxima probabilidad, tomando como referencia las observaciones efectuadas durante varias campañas de campo. Se han establecido varias categorías de “vegetación higrofítica”, considerando como tal el monte negro, la mezcla de monte negro con pastizal y helófitos, y la vegetación asociada a las formaciones turbosas de Ribetehilos. En la figura 99 se observa el resultado de la clasificación de la vegetación higrofítica sobre una composición de la imagen en falso color.

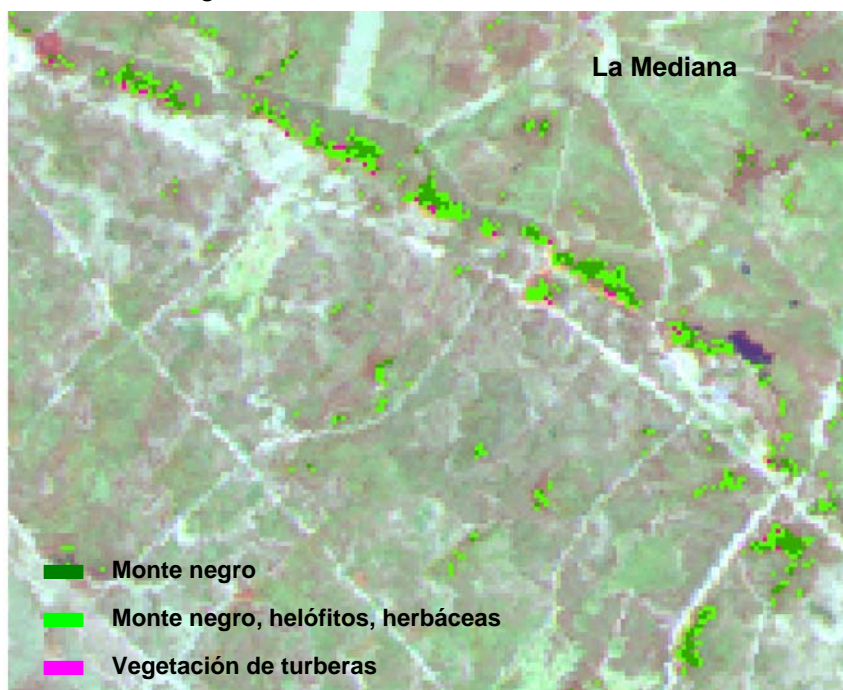


Figura 99. Clasificación de la vegetación higrofítica sobre suelos turbosos en Ribetehilos

Las lagunas turbosas se prolongaban por su desagüe natural a la Marisma en el Parque Nacional. Sin embargo, el desarrollo agrícola de la finca Los Mimbrales, que tiene como límite sur la línea de contacto entre el Alto y Bajo Manto Eólico de Dunas Fitoestables, ha afectado el régimen hídrico y por tanto la vegetación asociada a esta línea de lagunas turbosas. En el borde sur de la finca de Los Mimbrales todavía se han registrado algunos puntos donde se desarrolla la vegetación propia de turberas.

En el sector oriental del Alto Manto Eólico de dunas Fitoestables, en el Parque Nacional, la clasificación resultante de la imagen se ajusta bien a la cartográfica de la vegetación higrofitica que allí aparece (figura 100).

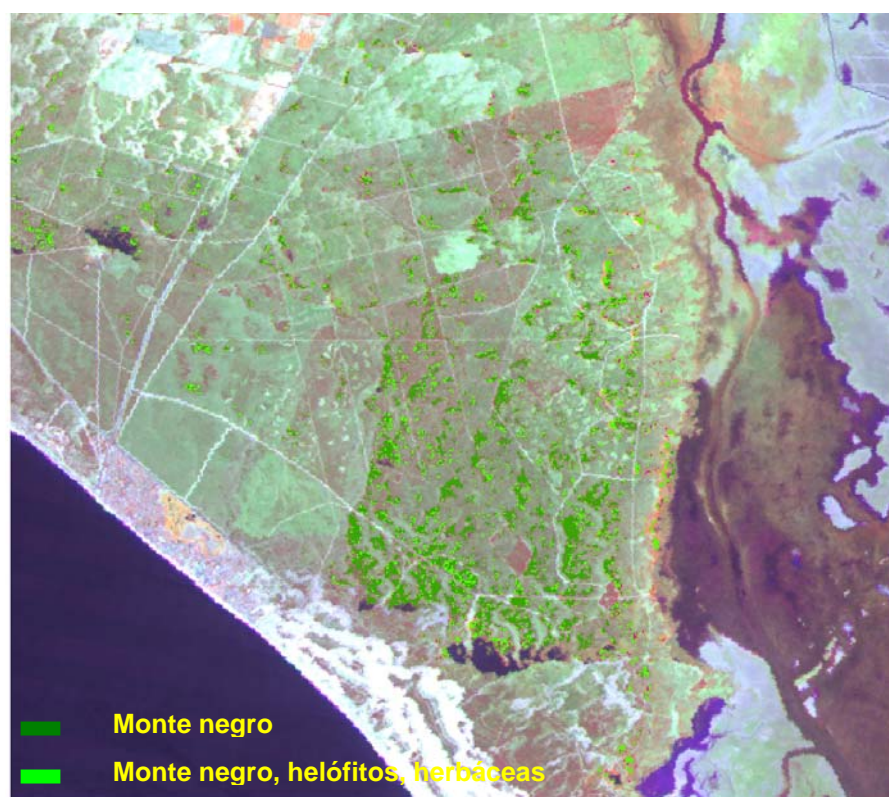


Figura 100. Clasificación de la vegetación higrofitica. Sector Parque Nacional

En la figura 101 (mapa 39) se incluye la clasificación de la vegetación higrofitica en el MELAD.

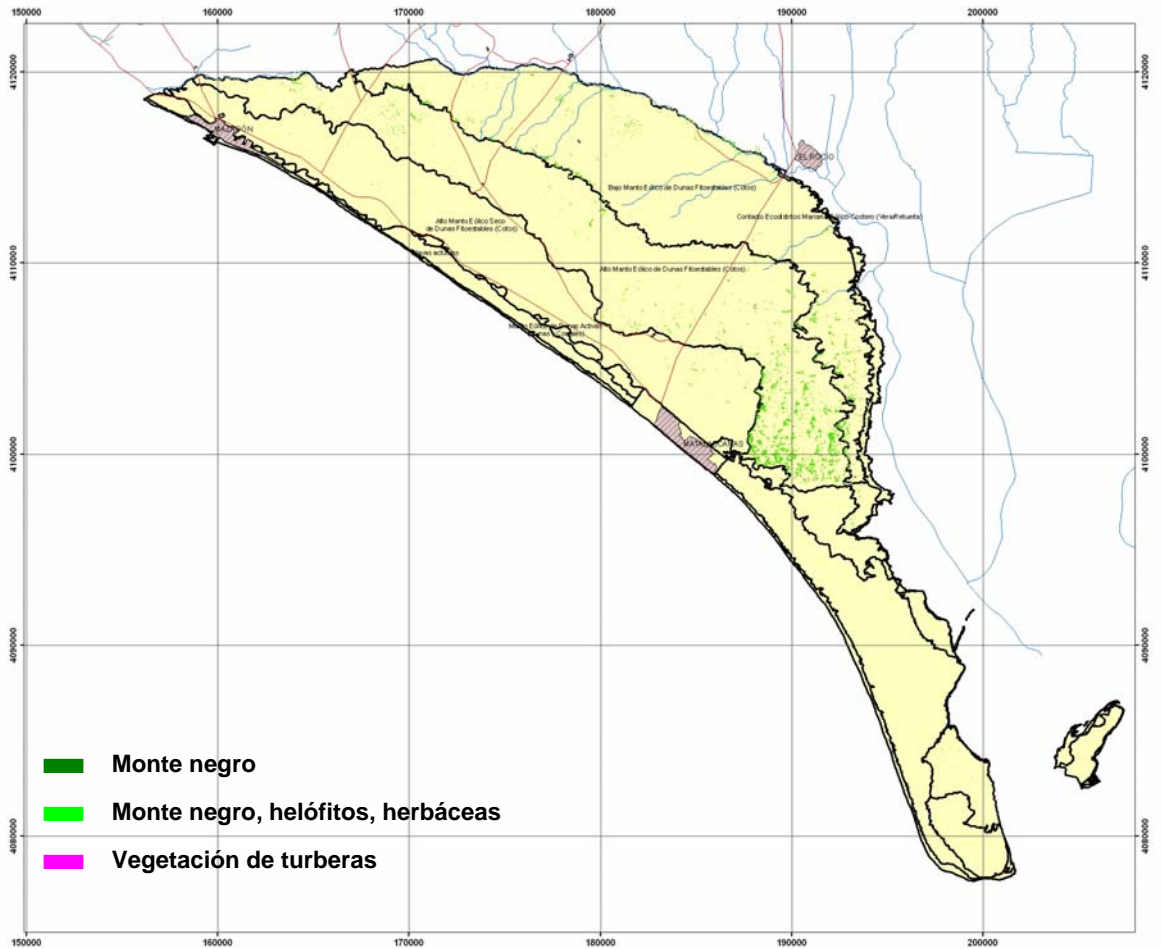


Figura 101. Cartografía de la vegetación higrofítica en el MELAD

## 7.2 Cartografía de la vegetación higrofítica a partir de las imágenes AHS

Los algoritmos convencionales de tratamiento de datos multiespectrales presentan inconvenientes en el manejo de los datos hiperespectrales debido a la propia naturaleza y gran dimensionalidad de estos datos, por lo que se han desarrollado nuevos procedimientos para su tratamiento y análisis. Puesto que se trata de analizar la información espectral continua que se registra en cada píxel y poder compararla esta información con los espectros de campo y/o los existentes en las librerías de laboratorio, el primer paso es convertir los datos de radiancia originales que proporciona el sensor en reflectividad.

Una vez realizada la conversión de las imágenes hiperespectrales a reflectividad hay varios procedimientos para el análisis de las mismas. Generalmente las diferencias entre dos bandas de longitud de onda adyacente son muy pequeñas por lo que ambas

imágenes en escala de grises aparecen prácticamente idénticas. Sin embargo, las pequeñas diferencias que hay en ellas puede ser información crítica para identificar determinados materiales superficiales. La mayor parte de los métodos para analizar imágenes hiperespectrales se basa en la información espectral de los píxeles de cada imagen más que en las variaciones espaciales dentro de bandas individuales o grupos de bandas. Los métodos de clasificación estadística (clustering) usados con imágenes multiespectrales convencionales también pueden aplicarse a imágenes hiperespectrales aunque se han adecuado para tratar su gran dimensionalidad.

Los métodos de análisis hiperespectral se pueden dividir entre los que clasifican cada píxel en una clase única que corresponde al material predominante en el píxel y los que calculan la composición del píxel mediante el análisis lineal de mezclas espectrales que identifica los distintos materiales que componen el píxel y calcula la proporción de cada material o cubierta. El *ajuste espectral* se realiza mediante la comparación con curvas espectrales de referencia procedentes de bibliotecas espectrales existentes, de las adquiridas mediante espectrorradiometría de campo o de las derivadas de la propia imagen.

Otro procedimiento es el clasificador Angular (Spectral Angle Mapper, SAM) que calcula la similitud entre dos espectros a partir su desviación angular, asumiendo que forman dos vectores en un espacio n-dimensional, siendo n el número de bandas. El modulo del vector es la reflectividad y la dirección del vector la forma de la curva. El ángulo entre dos curvas mide la diferencia de las formas de las curvas. Esta técnica tiene la ventaja de que es bastante independiente de las condiciones de iluminación ya que el cálculo de la desviación entre los vectores hace referencia a la longitud y no a la posición de los vectores.

En base a la comparación de las curvas de reflectividad de las distintas cubiertas, se han procesado las imágenes AHS de septiembre de 2004, fecha en la que la vegetación higrófitica presenta mayores diferencias de reflectividad respecto a la vegetación xerófitica. Como zona de referencia se ha seleccionado el sector correspondiente a las lagunas peridunares de Doñana por ser el área en la que se ha realizado un mayor número de medidas espectrales de las distintas comunidades vegetales (mapas AHS3 y AHS4). Se han tomado medidas sobre helófitos (*Juncus maritimus*, *Scirpus holoschoenus*) y pastizales (*Panicum repens*, *Agrostis stolonifera*, *Cynodon dactylon*) en los bordes de las lagunas y sobre el monte negro (*Erica scoparia*, *Ulex minor*, *Pteridium aquilinum*, *Pistacia lentiscus*, *Rubus ulmifolius*, *Smilax aspera*, *Ulex australis*) y en monte blanco (*Halimium halimifolium*, *Stauracanthus genistoides*, *Rosmarinus officinalis*).

El estudio de la espectrorradiometría de campo ha puesto de manifiesto diferencias entre las firmas espectrales registradas en abril y septiembre de 2004, en el rango correspondiente al visible e infrarrojo cercano (400-920 nm) (figura 102). Los valores de reflectividad correspondientes al brezal y al monte blanco son intermedios en el segmento visible, mientras que los helófitos muestran valores más bajos. El pastizal es el que presenta valores más altos en este segmento, especialmente en la firma correspondiente al mes de septiembre. La reflectividad del brezal higrofitico es mayor que la del monte blanco en los datos registrados en septiembre de 2004, mientras que en abril la situación es inversa.

A partir de los datos AHS transformados a reflectividad, se ha aplicado el algoritmo Minimum Noise Fraction (MNF) (Green, 1988) para determinar su dimensionalidad y eliminar el ruido. Se trata de dos transformaciones sucesivas: la primera calcula la matriz de covarianza del ruido y realiza su reescalado. La segunda es un análisis convencional de componentes principales. Las bandas resultantes expresan bien los tipos de cubiertas existentes en la zona, tal y como se observa en la figura 103a, que corresponde a una combinación en color de las bandas MNF432 (RVA).

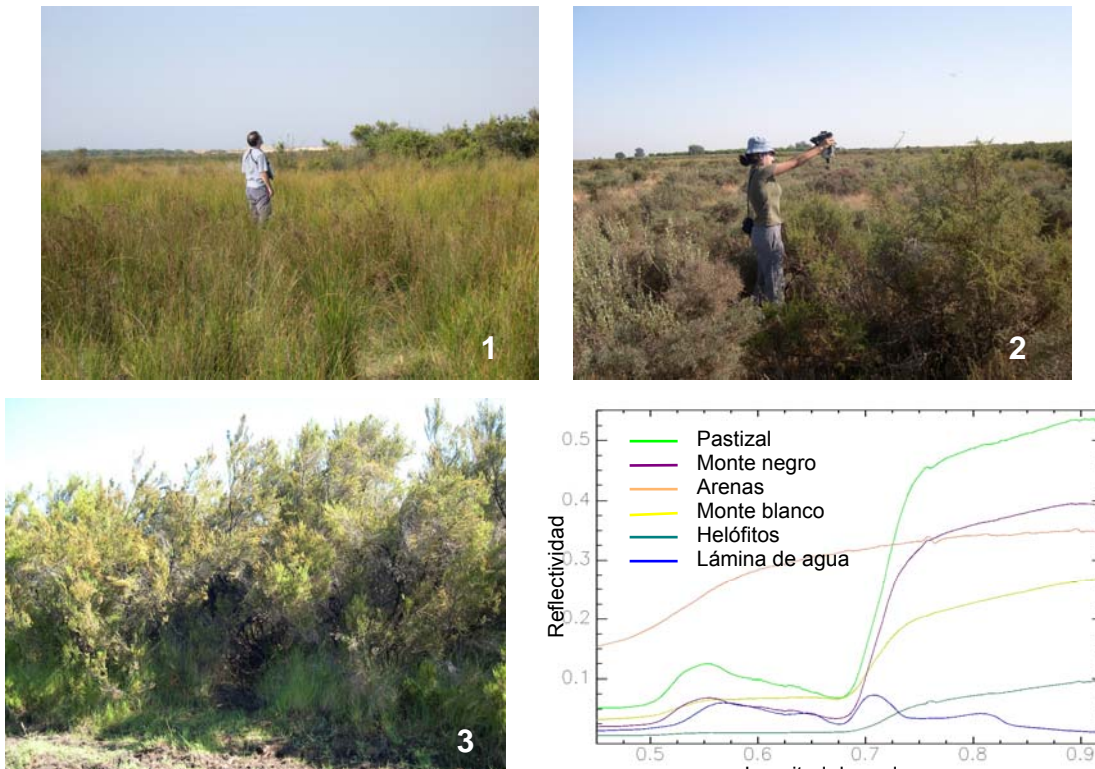


Figura 102. Curvas espectrales de helófitos, monte blanco y monte negro (septiembre 2004)

En la etapa siguiente se trata de determinar los componentes puros o *endmembers* a partir de los que se va a tratar de clasificar la imagen. Estos miembros puros o



extremos forman las distintas mezclas de que se componen los píxeles de la escena. Para ello se han realizado tres aproximaciones; en la primera, la determinación de los *endmembers* se ha llevado a cabo aplicando el algoritmo PPI (Pixel Purity Index) sobre las diez primeras bandas resultantes de la transformación MNF. En la segunda se han utilizado las curvas registradas sobre el terreno en septiembre y en la tercera se han seleccionado las firmas sobre la propia imagen con el apoyo de las observaciones de campo y la ortofoto 1:10.0000.

El clasificador angular SAM (Spectral Angle Mapper) (Kruse et al., 1993) calcula la similitud del píxel y el espectro de referencia a partir de su desviación angular, de manera que, como ya se ha mencionado anteriormente, se minimizan las diferencias de iluminación y albedo. En la figura 102 aparecen los *endmembers* utilizados en la clasificación angular. El resultado aparece como un mapa temático con la distribución espacial de las comunidades vegetales de interés: monte negro, monte intermedio, monte blanco, juncal, juncal-pastizal (figura 103b).

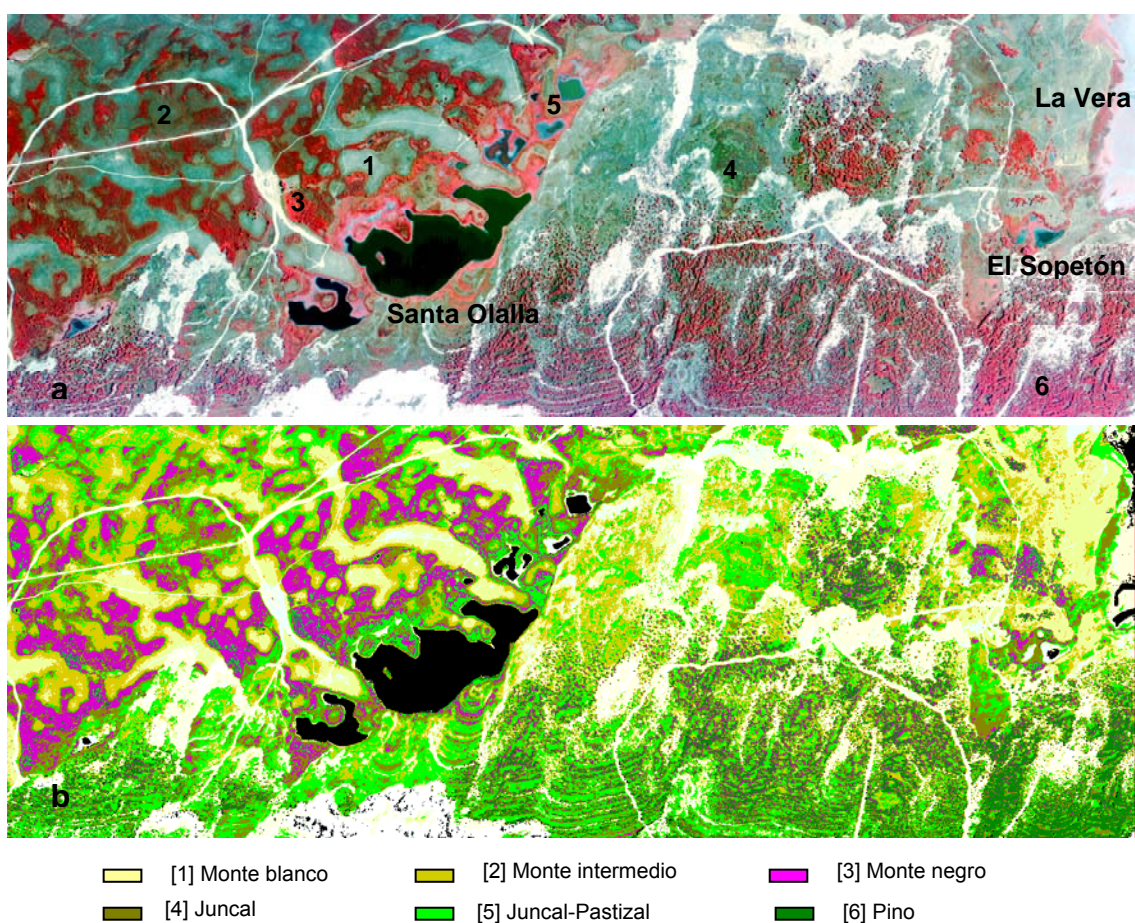


Figura 103. a: Composición AHS falso color del sector Santa Olalla. b: Clasificación angular de la imagen

En la línea de Ribetehilos, la clasificación de la imagen AHS de septiembre de 2004 ha dado excelentes resultados para discriminar y cartografiar de la vegetación higrófitica de las turberas. En las figuras 104, 105 Y 106 aparece la clasificación correspondiente a la vegetación higrófitica en varias áreas de esta zona.

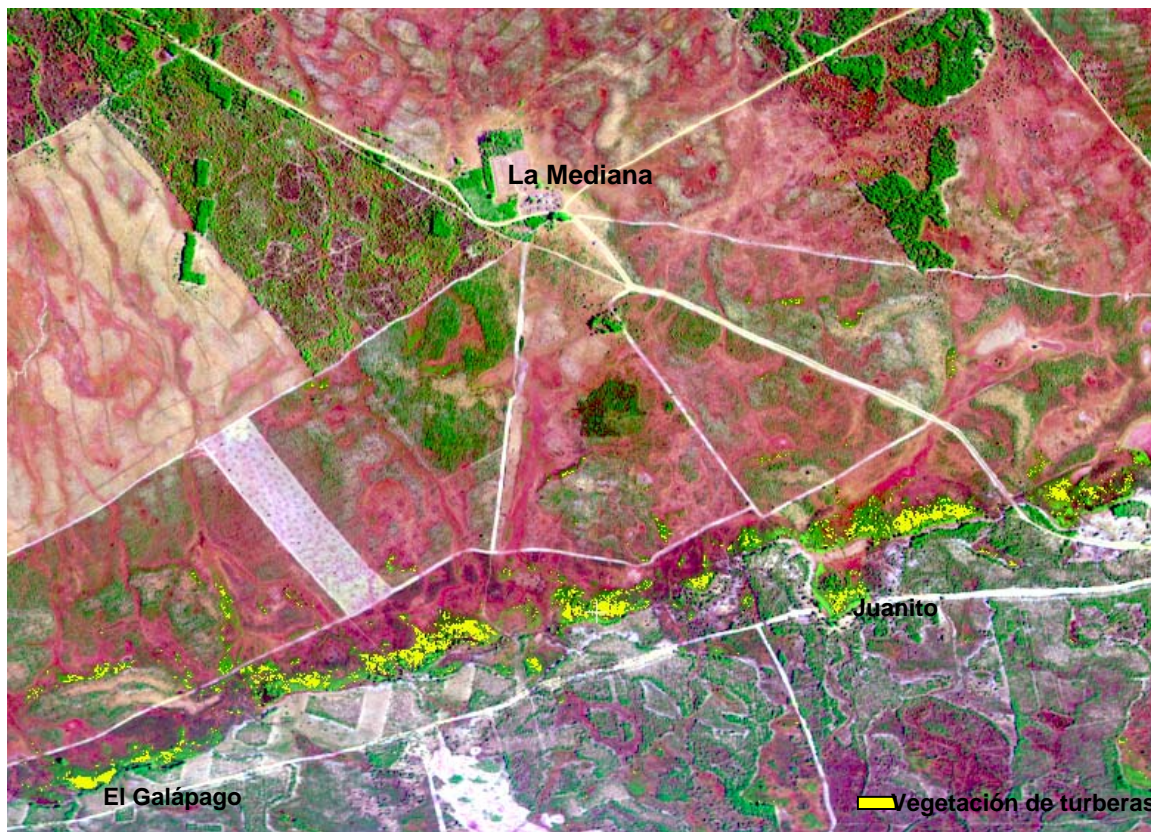


Figura 104. Clasificación digital de la vegetación higrófitica en un sector de Ribetehilos

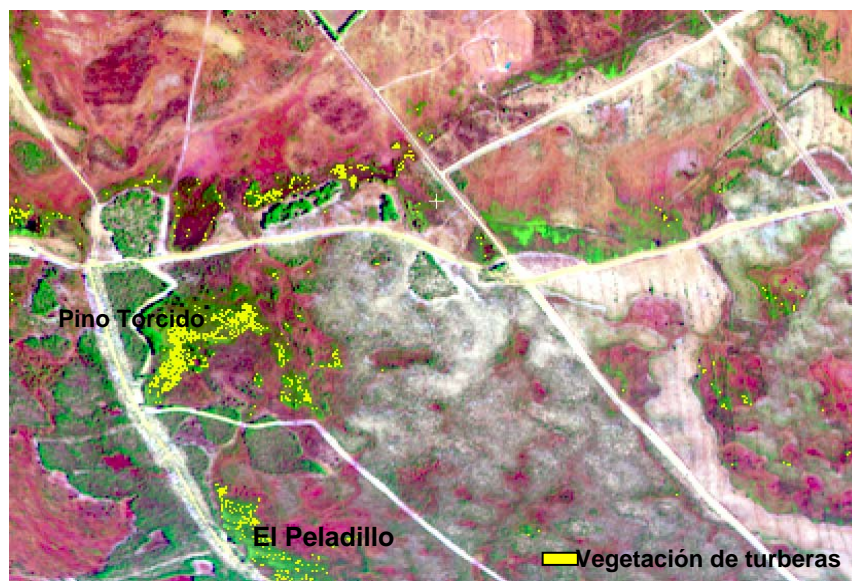


Figura 105. Clasificación digital de la vegetación higrófitica en el sector del Peladillo

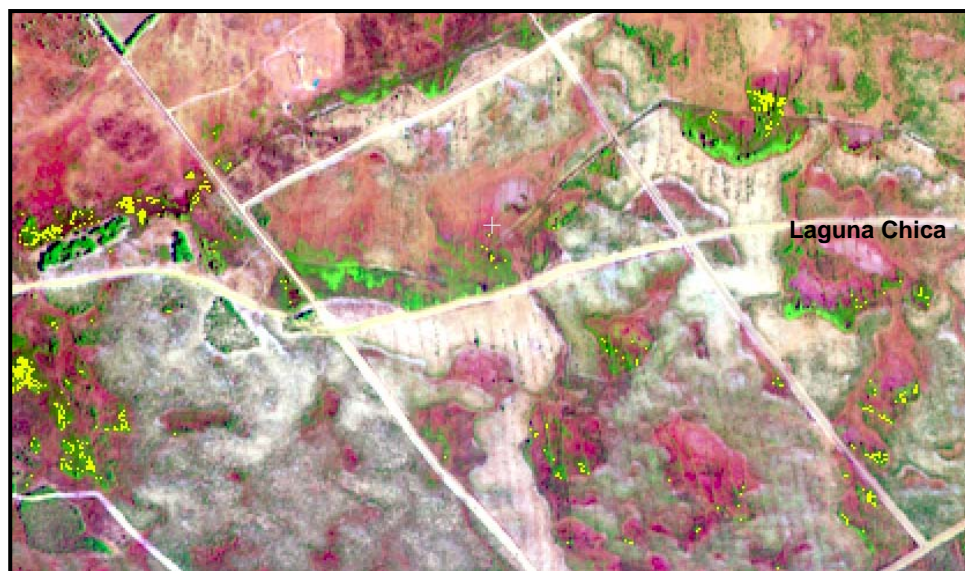
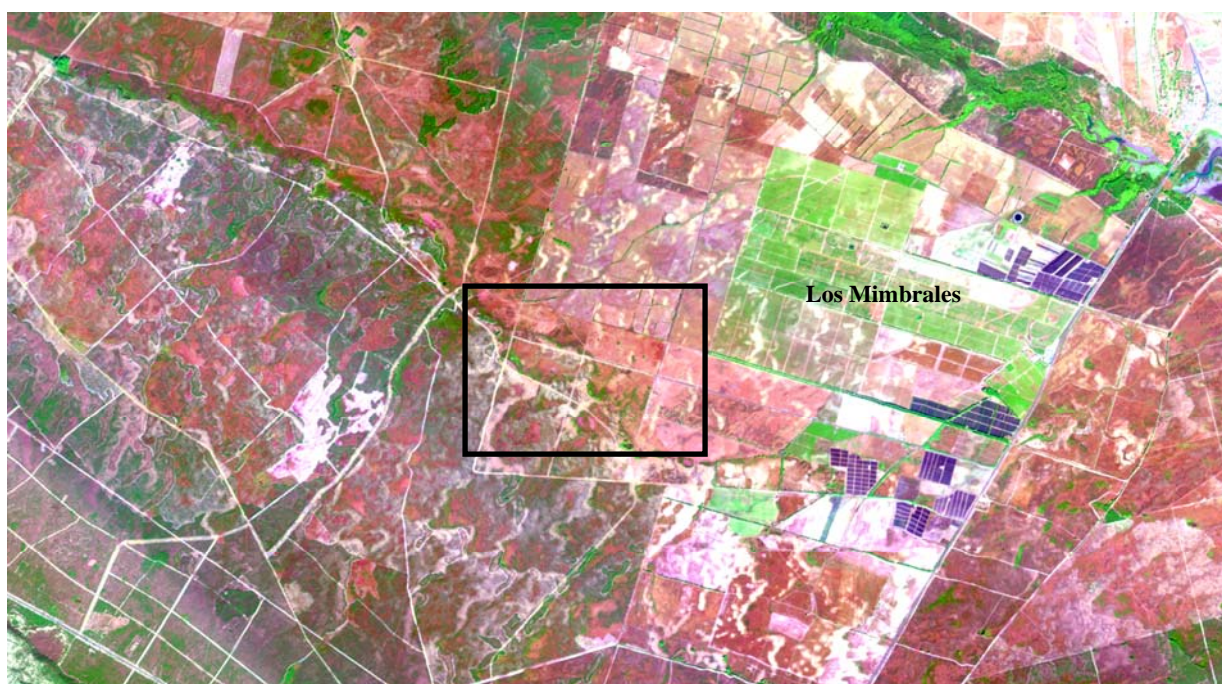


Figura 106. Clasificación digital de la vegetación higrofítica al sur de Los Mimbrales

## **8 Estimación de la Evapotranspiración a partir de la utilización de Imágenes de Satélite y datos Meteorológicos**

### **8.1 Introducción**

En este capítulo se presentan los resultados preliminares obtenidos en el cálculo de la evapotranspiración a escala regional mediante el uso combinado de imágenes MODIS y METEOSAT, y datos meteorológicos en la superficie correspondiente al acuífero Almonte-Marismas. La determinación de la evapotranspiración en esta zona es importante ya que se trata de un parámetro crítico en la optimización del modelo matemático del acuífero. Para el cálculo de la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) se ha aplicado el método de Allen et al., 1998, adaptado por el Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid (LATUV). Se han utilizado imágenes MODIS Y METEOSAT con resoluciones temporales y espectrales adecuadas para determinar ciertos parámetros que intervienen en este método, en el que la ET<sub>r</sub> se calcula a partir del producto de una evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y de un coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>). La ventaja del uso de la teledetección en el cálculo de la ET<sub>r</sub> frente a los métodos convencionales que proporcionan valores puntuales, es la extensión de los modelos locales a escalas regionales. Este método se ha aplicado al mes de julio de 2005 obteniendo como resultado una serie de mapas de ET<sub>r</sub> de tipo decenal con una resolución de 250 m. A pesar de la buena concordancia que presentan estos mapas con el estado de la vegetación, se pretende seguir investigando la aplicación de otros índices que consideren también el factor de evaporación procedente del suelo no vegetado.

El término evapotranspiración comprende el proceso de transferencia de agua a la atmósfera tanto por la transpiración de las plantas como por la evaporación directa a partir del suelo y de la vegetación húmeda. Engloba un conjunto de procesos complejos que controlan la transferencia de agua a la atmósfera desde la superficie terrestre, conectando el ciclo hidrológico y el balance de energía superficial, de manera que a partir de la transferencia de masa y energía se mantengan unos niveles energéticos e hídricos adecuados en el sistema tierra-atmósfera (Sánchez y Chuvieco, 2000).

La evapotranspiración depende de dos tipos de factores: los climáticos y los intrínsecos a la superficie del objeto. Los factores climáticos incluyen la radiación global, la velocidad del viento, y la temperatura y humedad del aire. Los principales factores locales son el albedo, la emisividad de la superficie, la rugosidad del suelo, el tipo de planta y su estado fenológico, el tipo de suelo y el contenido de agua en el suelo

(Delegido, J. et al., 1991). La Teledetección, frente a la metodología clásica basada en conseguir un resultado fidedigno para cada punto de superficie, permite la extensión de los modelos locales a escalas regionales, facilitando la observación sistemática, completa y exhaustiva de toda la región de estudio.

La información que suministran las imágenes MODIS y METEOSAT (SEVIRI-MSG) proporciona una serie temporal y multiespectral adecuada para determinar parte de los parámetros necesarios para el cálculo de la ET a escala regional. La estimación directa de la ET a partir de los datos climatológicos registrados por las estaciones meteorológicas y de las imágenes de satélite no es sencilla a causa de la diversidad y complejidad de los factores que intervienen en este proceso. Se han desarrollado diversos modelos para el cálculo de la ET en base al balance de energía superficial (Choudhury, B. y De Bruin, H. (1995), Bastiaanssen, W. G. M. et al. (2002)), a la medida de la temperatura superficial por derivación del método residual (Jackson, R. (1977), Seguin, B. et al. (1994), Delegido et al. (op. cit.), Caselles, V. et al. (1992)), a la relación entre la evapotranspiración y las características de la vegetación (Mora, F. e Iverson, L. (1998), Yang, W. et al. (1997), Allen et al. (op. cit.)), y a la relación entre los índices de vegetación y la temperatura de superficie (Nemani, R. et al. (1989), Jackson, R. et al. (1981), Nishida, K. (2002), Moran, M. et al. (1994), Di Bella, C.M. et al. (2000)). El método utilizado en este trabajo ha sido puesto a punto por el LATUV a partir del modelo de Allen et al. (op. cit.).

## **8.2 Materiales utilizados**

Se han utilizado los datos climatológicos de 32 estaciones meteorológicas (figura 107). De estas, 16 registran una serie completa de datos: temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, humedad máxima, humedad mínima, radiación solar, precipitación, evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>), velocidad y dirección del viento; 5 estaciones registran los parámetros anteriores salvo la ET<sub>o</sub> y el resto (11 estaciones) registran solo datos de temperatura y precipitación.

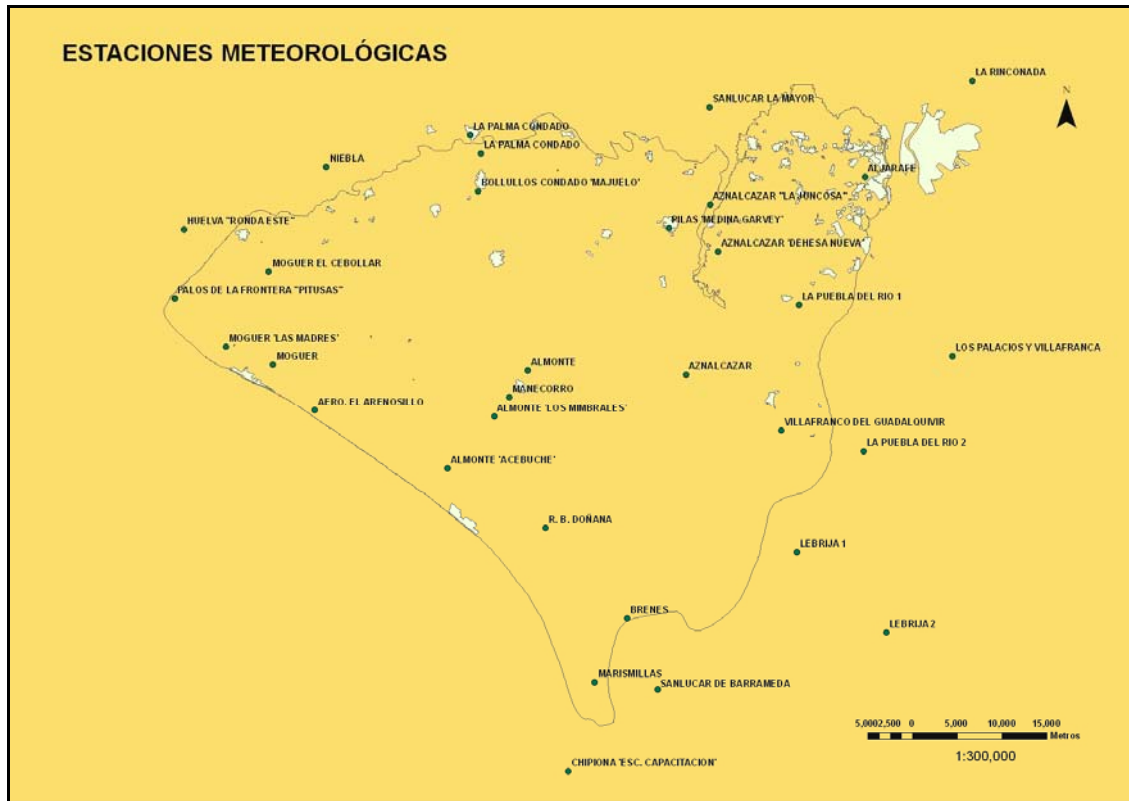


Figura 107. Situación de estaciones meteorológicas en el acuífero Almonte-Marismas

Se han seleccionado dos colecciones de imágenes de satélite tomadas durante el mes de julio de 2005 desde las plataformas TERRA y MSG. Se trata de imágenes registradas por los sensores MODIS y SEVIRI, sensores portados a bordo de los satélites TERRA y MSG, respectivamente. SEVIRI toma imágenes en 11 bandas espectrales definidas en longitudes de onda desde el visible hasta el infrarrojo térmico con una resolución espacial de 3 Km., y una pancromática de alta resolución de 1 Km. La resolución temporal de este tipo de datos es de 15 minutos.

La otra colección de datos como se dijo, pertenece a MODIS, sensor con 36 bandas espectrales, igualmente que antes, comprendidas en los intervalos de longitudes de onda del visible y el infrarrojo térmico, siendo su resolución espacial de 250 m, 500 m ó 1 Km. Todos los datos de satélite han sido cedidos por el LATUV, corregidos atmosférica y geoméricamente. Pertenecen al periodo del 24 de junio al 31 de julio de 2005. Así, los datos MODIS utilizados corresponden a las resoluciones de 250 m y 500 m: los primeros, corresponden a las bandas 1 y 2 (620 - 670 nm) y (841 - 876 nm), respectivamente, frente a los segundos de 500 m, bandas 3, 4, 5, 7 y los agregados de las bandas 1 y 2 (459 - 479 nm), (545 - 565 nm), (1.230 -1.250 nm) y (2.105 -2.155 nm).

### 8.3 Metodología

A partir de las imágenes de satélite y los datos meteorológicos y utilizando las herramientas informáticas desarrolladas con este fin por el LATUV, se ha aplicado el método de Allen et al. (op. cit.). Este método fue propuesto a la FAO, para estimar la evapotranspiración a partir de datos meteorológicos y de un coeficiente de cultivo de manera que la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) se calcula a partir del producto de una evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) y de un coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>). Este método es el resultado de la revisión y actualización de otros anteriores y fue implementado por un grupo de expertos bajo los auspicios de la FAO en colaboración con la ICID (International Commission for Irrigation and Drainage) y la WMO (World Meteorological Organization). Se recomendó la adopción del método combinado Penman-Monteith y se marcaron los procedimientos de cálculo de sus parámetros, definiendo un nuevo concepto de evapotranspiración de referencia basado en la modificación del anterior modelo de ET<sub>o</sub> propuesto por Doorembos y Pruitt (1977).

El concepto de evapotranspiración de referencia (ET<sub>o</sub>) se define como la tasa de evapotranspiración de una superficie de referencia. Inicialmente fue implementado para estudiar la demanda evaporativa de la atmósfera independientemente del tipo de cultivo, del desarrollo del cultivo y de las prácticas de manejo. El método de Penman-Monteith está basado en la combinación de la ecuación del balance de energía y los gradientes de humedad, temperatura y velocidad del viento. Este método introduce en la ecuación procedimientos para resolver casos en los que hay limitación de datos e información climática para diferentes cultivos. Allen et al. (op.cit.) determinaron esta ecuación a partir de la definición de un cultivo de referencia como un cultivo hipotético con valores fijos de altura (12 cm.), resistencia de la cubierta vegetal (70 sm<sup>-1</sup>) y albedo (0,23), que representa la evapotranspiración de una superficie extensa cubierta de gramíneas verdes de altura uniforme y crecimiento activo, que cubre completamente el terreno y sin déficit hídrico.

Este método utiliza datos climáticos estándar que pueden ser derivados fácilmente a partir de los datos registrados por las estaciones meteorológicas. A pesar de su complejidad, ofrece resultados bastante precisos para un amplio rango de localizaciones y climas, y permite su aplicación en series de datos no muy completas.

$$E_{to} = \frac{0,408\Delta(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)}$$

Siendo:

$E_{t_0}$ : evapotranspiración de referencia ( $\text{mm día}^{-1}$ ),

$R_n$ : radiación neta de la superficie del cultivo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),

$G$ : flujo de calor en el suelo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),

$T$ : temperatura media diaria a 2 m de altura ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$U_2$ : velocidad del viento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ ),

$e_s$ : presión de saturación de vapor ( $\text{kPa}$ ),

$e_a$ : presión de vapor actual ( $\text{kPa}$ ),

$e_s - e_a$ : déficit de saturación de presión de vapor ( $\text{kPa}$ ),

$\Delta$ : pendiente de la curva de presión de vapor ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ),

$\gamma$ : Constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

Las variables de esta ecuación pueden determinarse a partir de los datos registrados en las estaciones meteorológicas y de aquellos calculados a partir de las imágenes de satélite. Las variables meteorológicas que intervienen son: la temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ ), la temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), la temperatura media ( $^{\circ}\text{C}$ ), la humedad máxima (%), la humedad mínima (%), y la dirección ( $^{\circ}$ ) y velocidad del viento ( $\text{m/s}$ ). Se ha realizado una interpolación espacial con el fin de obtener los mapas climáticos correspondientes a la zona de estudio. Los métodos de interpolación utilizados han dependido de la variable meteorológica y de un estudio previo realizado para cada una de las variables en función del menor error medio cuadrático (EMC). Se ha aplicado el método de Shepard para la temperatura máxima y el viento, el método de Kriging para la temperatura mínima y el Radial Basis Function para la humedad máxima y mínima (tabla 19).

Variable	Método de interpolación
Temperatura máxima	Shepard's Method
Temperatura mínima	Kriging
Humedad máxima	Radial Basis Function
Humedad mínima	Radial Basis Function
Velocidad y dirección de viento	Shepard's Method

Tabla 19. Variables meteorológicas y métodos de interpolación.

Hay que señalar que la temperatura media se obtiene del promedio de la temperatura máxima y mínima y que a estas variables se les resta el gradiente de altura (cada 100 metros la temperatura desciende  $0,5 ^{\circ}\text{C}$ ) obtenido a partir del modelo digital del terreno de Andalucía.

El viento es también un caso especial, puesto que se calcula a partir de la composición de la velocidad y la dirección del viento en las componentes X e Y. Donde:



$$Z = \text{SQRT}(X^2 + Y^2)$$

$$X = \text{Velocidad} * \text{Cos}(\text{Dirección})$$

$$Y = \text{Velocidad} * \text{Sen}(\text{Dirección})$$

A partir de la serie de imágenes Meteosat de Segunda Generación (MSG) y MODIS se han calculado tres de las variables de la ecuación de Penman-Monteith para determinar la ETo: el índice de nubosidad, el albedo y la radiación neta.

### 8.3.1 Índice de nubosidad

Expresa la presencia o ausencia de nubes. Para su determinación se han utilizado las imágenes MSG a las que se les aplica un test de diferencias de temperatura en el canal del infrarrojo térmico (10,8 nm) para la detección de nubes. Se establece una máscara que descarta todos aquellos píxeles que registren una temperatura menor a 15°C, umbral establecido para los meses de verano como temperatura adecuada en la determinación de nubes. La fusión con las otras resoluciones se realizó mediante un remuestreo de los mapas de máscara de nubes por el método del vecino más próximo a una resolución final de 500 m, resolución con la que se obtendrá el producto final de evapotranspiración de referencia.

### 8.3.2 Albedo

La determinación del albedo es importante para evaluar la insolación, además de ser uno de los parámetros más relevantes en la aplicación de modelos de balance radiativo tierra-atmósfera. La Teledetección es la única técnica que permite representar el albedo de forma global en un mapa. Las imágenes de satélite constituyen una excelente herramienta para determinar el albedo ya que poseen una cobertura espacial y temporal adecuada. El albedo se ha obtenido en base al método propuesto por Liang et al. (2002) mediante la suma ponderada de los canales del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio de las imágenes MODIS a 500 metros de resolución.

$$\alpha = 0,160\alpha_1 + 0,291 \alpha_2 + 0,243 \alpha_3 + 0,116 \alpha_4 + 0,112 \alpha_5 + 0,081 \alpha_7 - 0,0015$$

Debido a las características de orbitación de la plataforma TERRA, un punto geográfico de tierra es visto con las mismas propiedades geométricas de visión cada 16 días. Por este motivo, cuando se desea trabajar con compuestos temporales MODIS, se suele operar con esta frecuencia temporal. Sin embargo, los mapas de ETo a estimar se realizan sobre un periodo de 10 días (una decena), periodo estándar de referencia para muchos tipos de datos, p.e. mapas de índice de vegetación de datos AVHRR-NOAA.

Así, el albedo correspondiente al mes de julio, se estimó por un método que el LATUV denomina “compuestos deslizantes”. El procedimiento se basa en que fijados los días 10, 20 y 30 de cada mes y recogiendo los 16 días de imágenes anteriores a cada una de las fechas, se calcula mediante una operación matemática un compuesto resultante de las mismas.

Todas las imágenes diarias fueron filtradas previamente de nubes y se despreció cualquier píxel escaneado con un ángulo cenital superior a 50°. El compuesto se estimó realizando para cada píxel la media aritmética de los valores de albedo de los 16 días. Así, finalmente se obtuvieron 3 mapas de albedo para el mes de julio, representando cada uno de ellos, el valor medio de albedo en los 16 días anteriores a los días 10, 20 y 30.

### 8.3.3 Radiación neta

Se trata de la diferencia entre la radiación del espacio que llega a la Tierra y la radiación terrestre que sale hacia el espacio. Se determina a partir de las variables meteorológicas y de las variables previamente calculadas a partir de las imágenes MODIS y MSG. Aplicando la ecuación de Iqbal M. (1983) se obtiene la Radiación solar ( $R_s$ ). A partir de la ecuación de la Radiación neta:

$$R_n = R_{ne} - R_{ns} = ((1 - \alpha) * R_s) - \left( \frac{[(4,903 * 10^{-9}) * ((T_{mxa} + 273,15)^4 + (T_{mna} + 273,15)^4)] * \varepsilon * f_{nub}}{2} \right)$$

Donde:

$R_{ne}$ : radiación neta entrante ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),

$R_{ns}$ : radiación neta saliente ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),

$R_s$ : radiación solar ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ),

$\alpha$ : albedo,

$T_{mxa}$ : temperatura máxima del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$T_{mna}$ : temperatura mínima del aire ( $^{\circ}\text{C}$ ),

$\varepsilon$ : emisividad neta ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$ ) y

$f_{nub}$ : factor de nubosidad.

Sin embargo, la evapotranspiración real (ET<sub>r</sub>) está limitada no solo por los factores atmosféricos y radiativos sino también por el tipo de cultivo y la disponibilidad de humedad. Una vez calculada la ET<sub>o</sub>, Allen et al. (op. cit.) proponen considerar un coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), con el fin de que las características del dosel vegetal y la

resistencia aerodinámica del cultivo de referencia estén representadas. Este parámetro describe las variaciones en la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que estas se van desarrollando, desde la siembra hasta la recolección y contempla las diferencias fisiológicas y fenológicas entre los distintos tipos de cultivos. Una propuesta considera un coeficiente único ( $K_c$ ), mientras que en otra este coeficiente se divide en dos factores individuales que describen la evaporación ( $K_e$ ) y la transpiración ( $K_{cb}$ ).

El desarrollo de métodos para obtener un  $K_c$  adecuado a diferentes especies vegetales, considerando distintos estadios fisiológicos y de estrés, es un campo de investigación actualmente en desarrollo. En nuestro estudio se ha considerado el Índice de Verdor. Se trata del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) actual escalado respecto a un valor máximo y mínimo de NDVI de forma relativa. De esta manera se puede discriminar mejor en cada píxel el cambio de la vegetación debido a las condiciones climáticas, ya que el valor absoluto del NDVI a veces está más relacionado con la composición paisajística del píxel (% de cubierta verde) que con su dinamismo estacional. Este índice se determina a partir de las imágenes MODIS a resolución 250 m con las que se calcula el NDVI y los NDVI históricos, máximo y mínimo, del periodo de estudio.

$$IV = \frac{(NDVI - NDVI_{\min})}{(NDVI_{\max} - NDVI_{\min})} * 100$$

#### **8.4 Resultados y Discusión**

En este estudio preliminar y con el fin de evaluar el modelo propuesto se han procesado los datos correspondientes al mes de Julio de 2005, considerado como un año hidrológico seco. Se ha elegido esta fecha tanto por la disponibilidad de imágenes como por tratarse de una época con valores altos de evapotranspiración. El cálculo se ha basado en primer lugar en la estimación de la evapotranspiración de referencia ( $E_{To}$ ) de forma diaria, realizándose posteriormente una media cada 10 días y un remuestreo final de 500 m a 250 m. Así mismo se ha calculado el coeficiente de cultivo que también ha sido promediado cada 10 días, con resolución 250 m. De esta manera se han obtenido tres mapas de  $E_{Tr}$  decenales, a una resolución de 250 metros, que incluyen todo el sector del acuífero Almonte- Marismas (figuras 108 y 109).

Desde el punto de vista cualitativo, la validación del método parece evidente al comparar los valores de ETr obtenidos con el NDVI, que reflejan una buena concordancia. Los niveles más altos de ETr, en color rojo anaranjado en el mapa (figura 109), corresponden a las zonas de cultivos de regadío, que aparecen en la imagen de NDVI en colores magenta-rojo-naranja (figura 110). Los mapas de ETr resultantes se han contrastado con diversos estudios y mapas de uso del suelo de la zona (CMA, 1999; Corine Land Cover, 2000; Aquavir, 2005; Antón-Pacheco, C. et al., 2006) en los que aparece una extensa zona agrícola de cultivo de regadío que coincide de forma neta con los valores más altos de ETr. Se trata de los arrozales en la zona de la marisma o de los cultivos de frutales de regadío en el área del Rocío; en ambos casos la ETr presenta unos valores altos del orden de 6-8 mm de media por día en la decena.

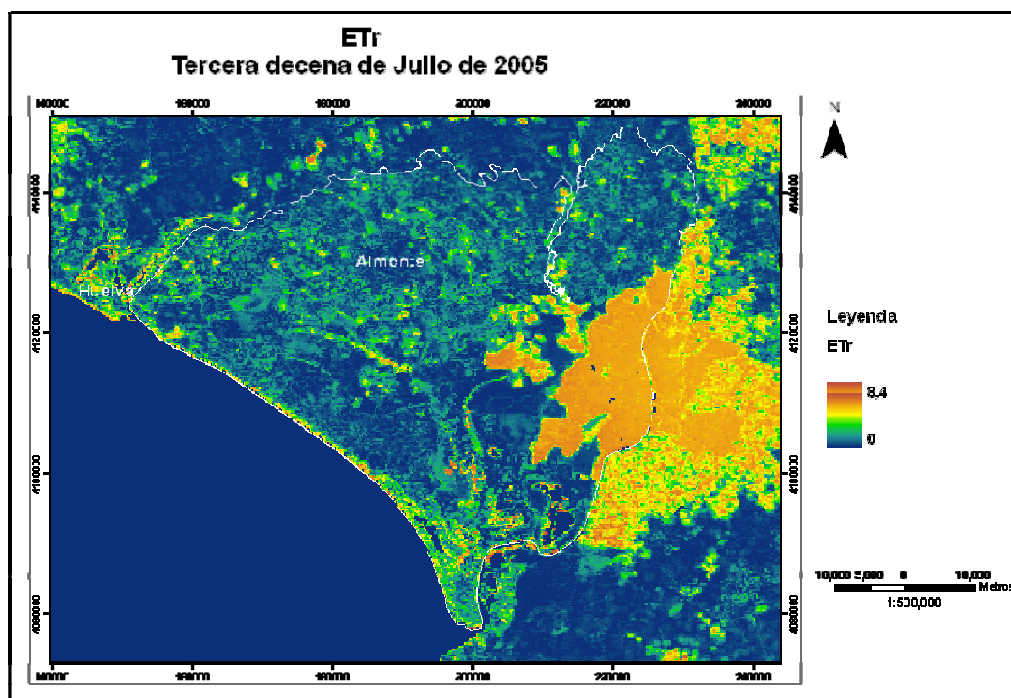


Figura 108. Mapa de ETr correspondiente a la tercera decena de julio de 2005

La comparación de los mapas de ETr con los diferentes usos del suelo existentes permite poner de manifiesto el buen ajuste de la ETr con la vegetación natural. En aquellas zonas donde no existe vegetación, como es el caso de suelos abiertos, donde solo se produce evaporación, la ETr da valores muy bajos del orden de 0 a 1,2 mm. Sin embargo, en zonas de arbolado, como es el caso del pinar y del eucaliptal, los valores de ETr oscilan entre 1 y 4 mm, según la fracción de cubierta. Por último, las zonas de regadío se corresponden con los valores más altos de ETr que alcanzan los 6 o 8 mm. Hay que señalar que incluso en áreas con lámina de agua aparece un valor de

ET que puede variar entre 0,2 y 1,8 mm, probablemente debido a la existencia de vegetación acuática.

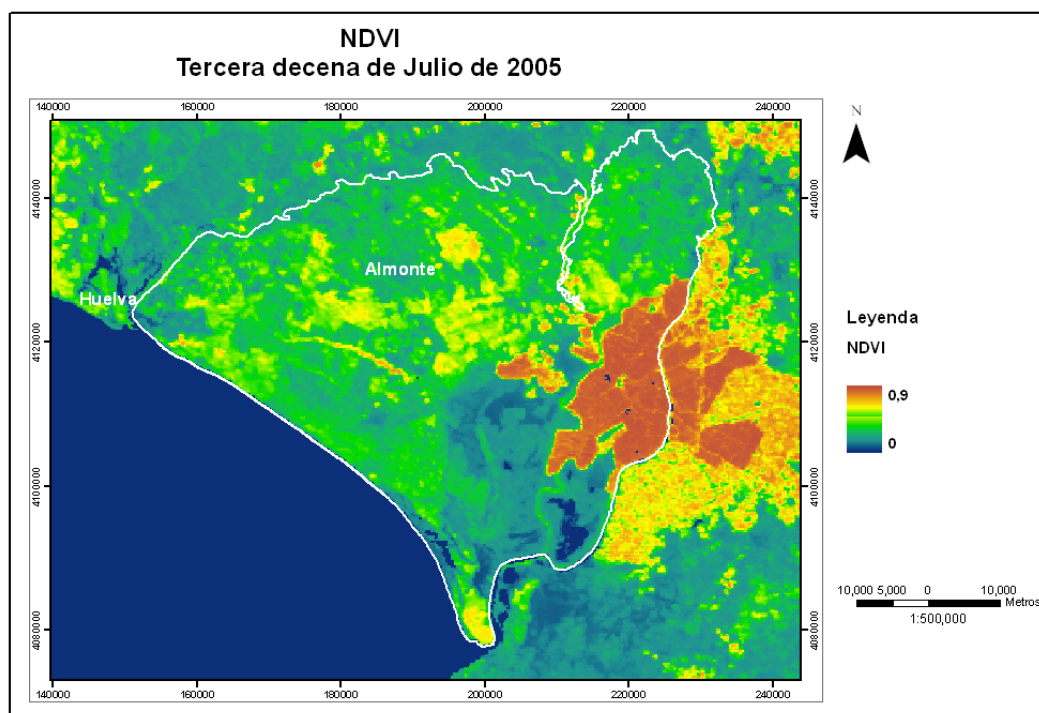


Figura 109. Imagen NDVI correspondiente a la tercera decena de julio de 2005

Se ha realizado una validación cuantitativa comparando los datos de la ETo obtenidos con los datos de ETo procedentes de diferentes estaciones meteorológicas. Se ha calculado la media y la desviación estándar de la diferencia de ambas para cada uno de los periodos (tabla 20). Estos resultados indican que los valores de la ETo se ajustan razonablemente bien con los valores tomados en las estaciones meteorológicas de la zona.

Periodo	Media	Desviación estándar
1ª decena	-0,578	0,617
2ª decena	-0,668	0,628
3ª decena	-0,527	0,570

Tabla 20. Media y desviación estándar de la diferencia de ETo.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del método de Allen et al. (op. cit.) para el mes de julio de 2005 han permitido establecer una serie de mapas de ETr a nivel regional con una resolución de 250 m de tipo decenal válido que presentan una buena concordancia con el estado de la vegetación y el uso del suelo en esa fecha. Pese a la complejidad del cálculo de la ETr, los resultados preliminares obtenidos

parecen confirmar un buen ajuste a escala regional aunque habría que realizar una verificación cuantitativa de los datos.

La capacidad de las imágenes METEOSAT y MODIS de proporcionar información sobre los flujos energéticos superficiales y el estado de los cultivos y de la vegetación natural, han permitido obtener los parámetros necesarios para calcular unos valores de la ETr acordes al estado fenológico de la vegetación y a una escala regional. Habría, sin embargo, que tener en consideración otros coeficientes de cultivo para calcular la ETr, como por ejemplo el SAVI, que tiene en cuenta el suelo ya que de esta manera se optimizaría el factor de evaporación procedente del mismo. Otra solución sería aplicar la segunda propuesta de Allen et al. (op. cit.), consistente en fraccionar el valor de  $K_c$  en dos coeficientes independientes: uno para cuantificar la transpiración del cultivo ( $K_{cb}$ ) y el otro para considerar la evaporación desde el suelo ( $K_e$ ).

El hecho de que el área de estudio tenga una amplia zona costera en la que apenas se registran algunas de las variables meteorológicas necesarias para el cálculo de la ETo puede dar lugar a errores considerables en los sectores próximos a la costa.

## **9 Estructura de la Base de Datos**

Se ha realizado una aplicación vía Intranet para la difusión de los resultados de la investigación del Proyecto Doñana. Esta aplicación se realizará con tecnología .NET y estará basada en una Arquitectura Cliente-Servidor. Como núcleo central de la aplicación se ha generado una base de datos relacional que está gestionada a través del Sistema Gestor de Bases de Datos (SGBD) SQL-Server de Microsoft, al igual que otras bases de datos institucionales del IGME.

La base de datos consta de:

- una tabla principal-maestra con información alfanumérica (Identificador de Imagen, tipo de imagen-satélite, fecha, coordenadas de los bordes,...) sobre la serie de datos de las imágenes de satélite empleadas (Imágenes Landsat y AHS),
- una tabla con información sobre los resultados del tratamiento de las imágenes,
- vínculos a los ficheros de las imágenes que permitirán su visualización a través de internet.

Además se va a implementar un servidor WEB de cartografía digital que permitirá al usuario final la interacción con la información geográfica de la zona de estudio, así como la visualización y consulta de los datos espaciales obtenidos en el estudio realizado (puntos de muestreo, fotografías, vectores de lámina de agua, límite del

acuífero, unidades eólicas), utilizándose como fondo del visualizador-SIG las imágenes georreferenciadas de la zona de estudio.

## 10 Resultados

El registro de dos series completas del MELAD con imágenes AHS en las etapas de máxima variación interanual del año 2004 ha permitido realizar la cartografía de la fluctuación de la lámina de agua para este periodo. La imagen AHS registrada en abril de 2004, a pesar del alto nivel de inundación en esta fecha, ha puesto de manifiesto la desecación de lagunas en sectores próximos a zonas donde se realizan bombeos del acuífero. La imagen registrada en septiembre de 2004 refleja la temporalidad de la mayor parte de estas formaciones palustres y muestra los rezumes de los mantos eólicos en el ecotono de La Vera. En la imagen AHS de septiembre de 2005, coincidente con el estiaje máximo correspondiente al 2004-2005, que ha sido el ciclo hidrológico más seco del registro total histórico de la estación meteorológica del Palacio de Doñana (“Datos del Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la E BD”, <http://www-rbd.ebd.csic.es/seguimiento/mediofisico.htm>). Esta sequía, junto con la presencia de varios días de helada durante el invierno de 2005 y el descenso en los niveles freáticos locales, han provocado importantes daños en la vegetación de matorral y arbórea en Doñana (Díaz-Delgado, R., 2006).

El análisis de los datos hiperespectrales AHS, a pesar del reducido rango espectral por fallo del puerto 2, ha permitido realizar una caracterización espectral preliminar de determinadas cubiertas vegetales higrofiticas de marcado interés por su relevancia ecológica. Ha sido posible identificar y cartografiar los principales tipos de comunidades vegetales que se desarrollan en los mantos eólicos estabilizados a partir del algoritmo de clasificación angular (SAM). La vegetación higrofitica está condicionada por la distancia de sus sistemas radicales a la capa freática, de manera que la ausencia de precipitaciones unida a las extracciones intensivas de agua subterránea puede originar la desaparición de estos humedales y de la vegetación asociada.

La serie temporal de imágenes Landsat ha permitido cartografiar las formaciones palustres y zonas de encharcamiento del MELAD a lo largo de una secuencia de veinte años de diferentes condiciones hidrológicas. El análisis de los resultados muestra:

- Una recuperación generalizada de las lagunas del MELAD en el sector de El Abalario, en el Parque Natural, como consecuencia de los tratamientos selvícolas para la eliminación de las masas de eucalipto. En el sector

occidental del Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables, lagunas como La Verdeja, Pino Alto, Conchas, La Vaca, de La Res, Río Oro, Quemada, de Las Turnas... permanecen sin agua incluso en años hidrológicos húmedos, posiblemente debido a la existencia de una evapotranspiración mas alta originada por la cubierta de pinar y a las extracciones de aguas subterráneas para riegos agrícolas.

- La desecación de las lagunas del Charco del Toro y del Brezo, situadas en el extremo occidental del cordón de las lagunas peridunares de Doñana, que ponen en evidencia la incidencia del descenso del nivel freático del acuífero sobre la lámina de agua de estas lagunas. en el sector de Matalascañas debido probablemente a las extracciones intensivas de agua subterránea que se han realizado durante los últimos años.
- La evolución de las superficies arboladas muestra los resultados de la gestión forestal aplicada desde la década de los 80. El cambio principal se observa en las masas de eucalipto. La superficie correspondiente a esta especie en febrero de 1985 es de 11435,22 hectáreas que se reduce a 5660,55 hectáreas en junio de 2004.
- Dada la importancia e interés en la conservación de las lagunas turbosas de Ribetehilos, por su carácter relíctico y por sus rasgos de atlanticidad, se ha realizado la cartografía de la vegetación higrofítica asociada a estas formaciones a partir de la imagen Landsat de junio de 2004.
- La cartografía de los usos agrícolas en el año 2004 así como la estimación zonificada de los volúmenes de agua aplicados para riego y la recarga por retornos de riego. La estimación de la dinámica agrícola durante el periodo 1985-2004 ha quedado incompleta por la falta de imágenes registradas en las fechas adecuadas para el estudio fenológico de los cultivos.

Como resultado del tratamiento e interpretación de los datos Landsat y AHS se ha implementado una metodología de tratamiento de imágenes de teledetección para la cartografía y seguimiento temporal de los humedales en Doñana y su entorno. La técnica empleada para cartografiar estos cambios es de gran ayuda para el estudio de la dinámica de las formaciones palustres y para la gestión de ecotonos sometidos a una gran presión.



## 11 Agradecimientos

Agradecemos a Emilio Custodio por su interés y apoyo a la propuesta inicial del proyecto. A la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y a la Estación Biológica de Doñana la cesión de parte de las imágenes Landsat utilizadas. A José Luis Casanova y Alfredo Romo por las facilidades dadas para utilizar las imágenes METEOSAT y MODIS así como los programas e instalaciones del Laboratorio de Teledetección de la Universidad de Valladolid para la realización del estudio de la evapotranspiración. Agradecemos también a Carlos Urdiales del Parque Nacional de Doñana y al Instituto Nacional de Meteorología (INM) la cesión de los datos meteorológicos utilizados en el estudio de evapotranspiración. A Pablo García Murillo y Arturo Sousa por su amabilidad al acompañarnos al campo para reconocer la vegetación higrofítica del sector de Ribetehilos. Por último, a M<sup>a</sup> Teresa López y Natalia García por su ayuda en la realización de los trabajos de campo.

## 12 Referencias

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D. y Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper, 56. Roma. <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm>

Allen-Díaz, B.H., (1991). Water table and plant species relationships in Sierra Nevada meadows. American Midland Naturalist, 126: 30-43.

Antón-Pacheco, C., Rowan, L. C., Mars J. C., y Gumiel, J.C., (2002). Characterization of mine waste material and hydrothermally altered rocks in the Riotinto mining district (southwest Spain) using HyMap data. Revista de Teledetección, 16, pp. 65-68.

Antón-Pacheco C, Moreno MT, Gómez JA, Jiménez M, Mediavilla C, Gumiel JC, Prado E, Reja JG, Gutiérrez O, Rebollo A (2005). Contribución al Estudio de los Humedales del Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana a partir de Imágenes AHS. XI Congreso Nacional de Teledetección: *Avances en Observación de la Tierra*. Ed.: Arbelo, González y Pérez Darias. XI Congreso Nacional de Teledetección. Puerto de La Cruz. Tenerife, 437-442.

Antón-Pacheco, C., Moreno, M.T., Gumiel, J.C., Mediavilla, C., Rebollo. A. (2006). Estudio de los humedales y de los usos del suelo en la comarca de Doñana y su entorno a partir de imágenes Landsat y AHS. Las aguas subterráneas en los países mediterráneos. Pub Inst. Geol. y Min. de España. Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas. 17: 383-391.

AQUAVIR (2005). Superficie de los cultivos de regadío y sus necesidades en riego en la demarcación de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Informe final 127 pp.

Aragonés, D., Díaz-Delgado, R. and Bustamante, J. (2005). Estudio de la dinámica de inundación histórica de las marismas de Doñana a partir de una serie temporal larga de imágenes Landsat. En Teledetección: Avances en la observación de la Tierra, editado por M. Arbelo, A. González y J.C. Pérez. Actas del XI Congreso Nacional de Teledetección . AET. Tenerife, 21-23 Septiembre. Pp. 407-410.

Bastiaanssen, W. G. M, Ahmad, M., y Chemin, Y. (2002). Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin. *Water Resources Research*, 38 (12):1-9.

Baumann, P. R. (1996). Flood Analysis: 1993 Mississippi Flood. Project: The Remote Sensing Core Curriculum. Volume 4. Applications in Remote Sensing (Foresman, T. W., Serpi, T. editors). [www.r-s-c-c.org/rsc/Volume4/baumann/baumann.html](http://www.r-s-c-c.org/rsc/Volume4/baumann/baumann.html)

Benett, M.W.A. (1987). Rapid monitoring of wetland water status using density slicing. *Proceedings of the 4<sup>th</sup> Australasian Remote Sensing Conference*, Adelaide, 682-691.

Berk, A., Andersonb, G. P., S.Bernsteina, L., Acharyaa, P. K., Dothea, H., Matthewa, M. W., Adler-Goldena, S. M., Chetwynd, J. H., Richtsmeiera, Jr.b, S. C., Pukallb, B., Allredb, C. L., Jeongb, L. S. and Hokeb. M. L. (1999). MODTRAN4 Radiative Transfer Modelling for Atmospheric Correction. *SPIE Proceeding, Optical Spectroscopic Techniques and Instrumentation for Atmospheric and Space Research III*, Volume 3756.

Blackman, J.G., Gardiner, S.J. y Morgan, M.G. (1995). Framework for biogeographic inventory, assessment, planning and management of wetland systems: the Queensland approach, *Workshop Proceedings, Wetland Research in the Wet/Dry Tropics of Australia*, (C.M. Finlayson, editor), Jabiru, NT, Australia, Supervising Scientist Report No. 101. Department of Environment and Heritage, Canberra, 114-122.

Borja, F. y Díaz del Olmo, F. (1996). 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 Paleoambiente Cuaternario de la Península Ibérica: 375-390.

Brady, A.M., Shaikh, A.K. y Sharma, P. (1999). Remote sensing and the Great Cumbung Swamp, *Wetlands Australia*, 7: 596-606.

Bravo, M. A. y Montes, C. (1993). Inventario de las formaciones palustres del manto eólico del Parque Nacional de Doñana (SW España). *Acta VI Congreso español de Limnología*: 31-43. Granada

Bustamante, J., Díaz-Delgado, R., Aragonés, D. (2005). Determinación de las características de masas de agua someras en las marismas de Doñana mediante teledetección. *Revista de Teledetección*, 24: 107-111.

Caselles, V., Delegido, J., Sobrino, J. y Hurtado, E. (1992). Evaluation of the maximum evapotranspiration over the La Mancha region, Spain, using NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 13 (5), 939-946.

Castañeda, C. (2002). El agua de las saladas de Monegros sur estudiada con datos de campo y de satélite. Consejo de protección de la Naturaleza en Aragón, Zaragoza, 158 pp.

Civis, J., Dabrio, C.J., González-Delgado, J.A., Goy, J.L., Ledesma, S., Pais, J., Sierro, F.J. y Zazo, C. (2004). Geología de España (J.A. Vera, Ed.), SGE-IGME, 543-550.

Chander G., Helder, D.L., Markham, B., Dewald, J.D. (2004). Landsat 5 TM Reflective-Band Absolute Radiometric Calibration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 42(12):2747 – 2760

Choudhury, B. y De Bruin, H. (1995). First order approach for estimating unstressed transpiration from meteorological satellite data. Advances in Space Research, 16 (10): 167-176.

Clark, R. N., G. Swayze, K. Heidebrecht, A.F.H. Goetz and R.O. Green. (1993). Comparison of Methods for Calibrating AVIRIS Data to Ground Reflectance, Proceedings of the Fourth Annual JPL Airborne Geoscience Workshop, October 25-29, 1993, vol. I, 35-36.

Coletto, M.C., (2003). Funciones hidrológicas y biogeoquímicas de las formaciones palustres hipogénicas de los mantos eólicos de el Abalario-Doñana (Huelva). Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid. 461 págs. más anexos.

Conel, J. E., Green, R. O., Vane, G., Bruegge, C. J., Alley, R. E., and Curtiss, B., J. (1987). Airborne imaging spectrometer-2: radiometric spectral characteristics and comparison of ways to compensate for the atmosphere: in Proceedings, SPIE, 834:140 -157.

Consejería de Medio Ambiente. (1999). Mapa de Usos y Coberturas Vegetales de Andalucía. Junta de Andalucía. 1 CD.

Consejería de Agricultura y Pesca. (2002). Inventario y Caracterización de los Regadíos de Andalucía. Servicio de Publicaciones y Divulgación. Junta de Andalucía 1 CD.

Cuevas, J.M. y González Alonso, F. (1992). Reconocimiento de eucaliptos en el sureste de la provincia de Huelva mediante análisis de una imagen Landsat MSS. Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetales, 9 (3): 439-449.

Cuevas Gonzalo, J.M. y González Alonso, F. (1992). Variación temporal de las superficies cultivadas en regadío en el área del Parque Nacional de Doñana mediante imágenes Landsat MSS. Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetales, 7 (2): 245-252.

Cuevas, J.M. y González Alonso, F. (1993). Análisis mediante una imagen Landsat MSS de la diversidad espacial de los usos del suelo en el Parque Nacional de Doñana (España). Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales, 2 (1): 89-98.

Custodio, E. y Palancar, M. (1995). Las aguas subterráneas en Doñana. Revista de Obras Públicas, 3340: 31– 53.

Custodio, E. (2000). "Groundwater-dependend wetland. Acta Geologica Ungarica, 43(2): 173- 202.

Custodio, E., Dolz, J., Manzano, M. (2006). Recursos de agua de la Comarca de Doñana. Fundación Doñana 21.

[www.pds.donana.es/documentos\\_publicos/1158862155285.pdf](http://www.pds.donana.es/documentos_publicos/1158862155285.pdf)

De Castro-Ochoa, F. y Muñoz-Reinoso, J.C. (1997). Model of long-term water-table dynamics at Doñana National Park. Water Resource, 31 (10): 2586-2596.

De La Lama Gutiérrez, G. (1976). Atlas del Eucalipto. Tomos I a IV. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias e Instituto para la Conservación de la Naturaleza (Ministerio de Agricultura). Sevilla.

De Torres, T. (1977). Memoria del mapa geológico de España. Escala 1/50.000. Almonte. Hoja 1001. IGME, Ministerio de Industria y Energía. Madrid.

Delegido, J., Caselles, V., Hurtado, E. (1991). Determinación a escala regional de la evapotranspiración. En: Gandía, S y Meliá, J. (ed), La Teledetección en el Seguimiento de los Fenómenos Naturales. Recursos Renovables: Agricultura. Universidad Politécnica, Valencia, 345- 370.

Díaz de Arcaya, N., Castañeda, C., Herrero, J. y Losada, J. A. Cartografía de coberturas asociadas a las fluctuaciones de la Laguna de Gallocanta. (2005). Teledetección: Avances en la observación de la Tierra, editado por M. Arbelo, A. González y J.C. Pérez. Proceedings of the XI Congreso Nacional de Teledetección organized by AET. Tenerife, 21-23 Septiembre. Pp. 399 -402

Díaz-Delgado, R. (2006). Evento de mortalidad en la vegetación terrestre del Parque Nacional de Doñana. Estación Biológica de Doñana.

Di Bella, C.M., Rebella, C.M. y Paruelo, J.M. (2000). Evapotranspiration estimates using NOAA-AVHRR imagery in the Pampa region of Argentina. International Journal of Remote Sensing, 21(4), 791-797.

Dwivedi, R.S., Rao, B.R.M., Bhattacharya, S. (1999). Mapping wetlands of the Sundaban Delta and its environs using ERS-1 SAR data. International Journal of Remote Sensing, 20 (11), 2235 – 2247.

Doorembos, J. y Pruitt, W. O. (1977). Guidelines for Predicting Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage. Paper 24

Earth Satellite Corporation (EarthSat) (2007). Global: Remote sensing for Ramsar sites. Columbia University and the Socioeconomic Data and Applications Centre (SEDAC), USA, <http://sedac.ciesin.org/ramsardg/casestudies/earthsat.html>. E-mail: [ciesin.info@ciesin.columbia.edu](mailto:ciesin.info@ciesin.columbia.edu)

Eckhardt, D.W. y Litke, D.W. (1988). Estimation of reservoir surface areas using satellite imagery, Upper Gunnison Basin, Colorado. Conference on Water Data for

Water Resources Management, Tucson, Arizona, U.S.A., August 1988 (Bethesda, MD: American Water Resources Association), pp. 691-702.

Ernst-Dottavio, C. L., Hoffer, R. M., Mroczynski, R.P. (1981). Spectral characteristics of wetland habitats, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 47, No. 2: 223-227

European Space Agency (ESA) (2007). Observing the Earth. News. Ramsar and remote-sensing experts tackle treats to wetlands. [http://www.esa.int/esaEO/SEMVA8PFHTE\\_index\\_0.html](http://www.esa.int/esaEO/SEMVA8PFHTE_index_0.html). Italia. E-mail: [contactesa@esa.int](mailto:contactesa@esa.int)

Espina, J. y Estévez, A. (1992). Programa de recuperación del Patrimonio del P.N. Doñana. Vol. III. Abalario. Informe inédito.

Espina, J. y Estévez, A. (1993). El espacio de repoblación de Cabezudos-Abalario. In: *Intervenciones Públicas en el Litoral Atlántico andaluz. Efectos territoriales*. Granados, M. y Ojeda, J.F., (eds.): 95 – 107. Agencia de Medio Ambiente. Consejería de Cultura y Medio Ambiente. Sevilla.

FAO (1975). Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir. Proyecto de transformación de la zona regable Almonte-Marismas: informe técnico 7 AGL: SF/SPA 9, Roma: 1-157 (informe inédito).

Fernández, M. y Borja, F. (2006). Doñana y cambio climático: Propuestas para la mitigación de los efectos. WWF/Adena.

Flaash (Spectral Sciences, Inc; U.S. Air Force Research Laboratory and Spectral Information Technology Application Centre, 2004).

Foody, G.M., Palubinskas, G., Lucas, R.M., Curran, P.J. y Honzak, M. (1996). Identifying terrestrial carbon sinks: Classification of successional stages in regenerating tropical forest from Landsat TM data. *Remote Sensing of Environment*, 55: 205-216.

Frazier, P.S., Page, K.J. (2000). Water body detection and delineation with Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 66, No. 12: 1461-1467

Gao, B.C., Heidebrecht, K. H., Goetz, A. F. H. (1993). Derivation of scaled surface reflectances from AVIRIS data, *Remote Sens. Environ.*, 44: 165-178.

García Murillo, P. y Sousa, A. (1999). El paisaje vegetal de la zona oeste del Parque Natural de Doñana (Huelva). *Lagascalía* 21(1): 111 - 131

García Novo, F. y Marín Cabrera, C. (2005). Doñana, Agua y Biosfera. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Medio Ambiente, UNESCO.

García Murillo, P. y Sousa, A. (1997). Vegetation changes in Abalario (Parque Natural Entorno de Doñana). *Lagascalía* 19: 737 – 744.

García Murillo, P. y Sousa, A. (1999). El paisaje vegetal de la zona oeste del Parque Natural de Doñana (Huelva). *Lagascalía*, 21 (1): 111 – 132.

Goetz, A.F.H., J.W. Boardman, B. Kindel and K.B. Heidebrecht. (1997). Atmospheric corrections: On deriving surface reflectance from hyperspectral imagers, Proceedings SPIE Annual Meeting, 3118, 14-22.

Goetz, A.F.H., K.B. Heidebrecht, and B. Kindel. (1997). The effect of atmospheric correction on AVIRIS data to obtain consistent multiyear foliage chemistry results, Presented at the IEEE IGARSS'97 Conference in Singapore, August 3-8.

Gong, P., Miao, X., Tate, K., Battaglia, C. y Biging, G. (2004). Water table level in relation to EO-1 ALI and ETM+ data over a mountainous meadow in California. Can. J. Remote Sensing, Vol. 30, No. 5: 691-696.

Gong, P., Miller, J.R. y Spanner, M. (1994). Forest canopy closure from classification and spectral unmixing: a multi –sensor evaluation of application to an open canopy. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 32, No. 5: 1067-1080.

González, A., Fernández, A., Lobato, A. y Moreira, J.M. (1991). Cartografía y estadística de cultivos en riego en el entorno de Doñana mediante integración de SIG y clasificación de imágenes Landsat TM. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección: 276-286.

González-Alonso, F., Cuevas, J.M. y Arbiol, R. (1994). Estimación de superficies cultivadas mediante imágenes de satélite y estimadores de regresión múltiple. Aplicación en Navarra y Lérida. Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetales, 9(2): 273 – 280.

González-Alonso, F. y Cuevas, J.M. (1995). Utilización diacrónica de encuestas de campo e imágenes de satélite en la estimación de superficies cultivadas por el método de regresión. VI Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección. Valladolid. 20 – 22 septiembre de 1995.

González Bernáldez, F., García Novo, F. y Ramírez Díaz, L. (1975). Analyse factorielle de la végétation des dunes de la Reserve Biologique de Doñana (Espagne). I. Analyse numérique des dunes floristiques. Isr. J. Bot. 24, 106 – 107.

Green, A. A., Berman, M., Switzer, P. and Craig, M. D. (1988). A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implication for noise removal. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 26, no. 1, pp. 65-74.

Grupo de Examen Científico y Técnico (GECT) de la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971), Oficina de Ramsar, Wetlands International, Environmental Research Institute of the Supervising Scientist (Australia) (2004). Manual de la Convención de Ramsar, 3ª edición, [http://www.ramsar.org/lib/lib\\_manual2004s.htm](http://www.ramsar.org/lib/lib_manual2004s.htm) - Apéndices II y III. Humedales: agua, vida y cultura. 8va. Reunión de la Conferencia de las Partes Contratantes en la Convención sobre los Humedales (Ramsar, Irán, 1971) Valencia, España, 18 a 26 de noviembre de 2002. E-mail: [ramsar@ramsar.org](mailto:ramsar@ramsar.org)

Gumiel, J. C., Fabregat, V., Antón-Pacheco, C., Ramos, G. y Sánchez, E. (1999). Clasificación de imágenes Landsat TM para la estimación de superficies de regadío en la Vega Baja y Campo de Elche, Unidad Hidrogeológica 07.24, (Alicante).

Holder, D.N.H. y Ahern, F.J. (1986). Forestry information content of Thematic Mapper data. *International Journal of Remote*, 7: 405-428.

IGME (1983). Hidrogeología del Parque Natural de Doñana y su entorno. Serv. Publ. Min. Industria y Energía: 1-120. 1 mapa.

IGME (1974-1980). Mapa geológico de España 1:50.000, 2ª serie (MAGNA). Hojas nº 982 (La Palma del condado), 983 (Sanlúcar la Mayor), 984 (Sevilla), 1000 (Moguer), 1001 (Almonte), 1002 (Dos Hermanas), 1017 (El Abalario), 1018 (El Rocío), 1019 (Los Palacios y Villafranca), 1033 (Palacio de Doñana) y 1034 (Lebrija). Madrid.

IGN (2005). Corine Land Cover 2000. Base de datos de ocupación del suelo nacional para el año 2000. [www.fomento.es/NR/rdonlyres/C316F5B3-8A86-4807-BF1C-A7CAE4B490C8/3154/010416ICLC2000.doc](http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/C316F5B3-8A86-4807-BF1C-A7CAE4B490C8/3154/010416ICLC2000.doc)

Iqbal, M. (1983). An introduction to Solar Radiation. Academic press, Toronto. 101p

ITGE (1992). Hidrogeología del Parque Natural de Doñana y su entorno. Serv. Publ. Min. Industria y Energía: 64 pp. 2 mapas.

Jackson, R., Reginato, R. e Idso, S.B. (1977). Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements'. *Water Resources Research*, 13, 651-656.

Jackson, R., Idso, S.B., Reginato, R. y Pinter, P. (1981). Canopy temperature as a crop water stress indicator. *Water Resources Research*, 17, 1.133-1.138.

Johnston, R., Barson, M. (1993). Remote sensing of Australian wetlands: An evaluation of Landsat TM data for inventory and classification, *Australian Journal of Marine and Freshwater Research*, 44: 235-252.

Kingsford, R.T., Thomas, R.F., Wong, P.S. y Knowles, E. (1997). GIS database for wetlands of the Murray Darling Basin. Final report to the Murray-Darling Basin Commission, National Parks and Wildlife Service, Sydney, Australia, 85 p.

Kruse, F.A., Boardman, J.W., Lefkoff, A.B., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloon, P.J., y Goetz, A.F.H. (1993). The Spectral Image Processing system (SIPS). Interactive Visualization and Analysis of Imaging Spectrometer Data. *Remote Sensing of Environment*, 44:145-163.

Lee, K.H. y Lunetta, R.S. (1995). Wetland detection methods, *Wetland and Environment Applications of GIS* (J.G. Lyon y J. McCarthy, editors), Lewis, Boca Raton, Florida, pp. 249-284.

Lee, K-S, Kim, T-H, Yun, Y-S, Shin, S-M. (2001). Spectral characteristics of shallow turbid water near the shoreline on inter-tidal flat. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 17, No. 2: 131-139

Liang, S., Shuey, C. J., Russ, A. L., Fang, H., Chen, M., Walthall, C. L., Daughtry, C. S. T. y Hunt Jr, R. (2006). Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. *Remote Sensing of Environment*, 84, 25-41.

Lozano, E. (2004). Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas. Tesis Doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. E.T.S.I.C.C. y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña. 316 pp mas anexos.

Lunetta, R.S., Balogh, M.E. (1999). Application of multi-temporal Landsat 5 TM imagery for wetland identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 65, No. 11: 1303-1310

Llamas, M.R., Rodríguez, J., Tenajas, J. y Vela, A. (1987). El Parque Nacional de Doñana. El Medio Físico. Seminario sobre 'Bases Científicas para la Protección de los Humedales en España'. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Madrid: 147-172.

Manavalan, P., Sathyanath, P. y Rajegowda, G.L. (1993). Digital image analysis techniques to estimate waterspread for capacity evaluations of reservoirs. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 59 (9): 1389-1395

Manzano, M. (1999). Los Humedales de Doñana y su relación con el agua subterránea. 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana.: 161-167.

Manzano. M., Borja, F. y Montes, C. (2002). Metodología de tipificación de los humedales españoles con vistas a su valoración funcional y a su gestión. Aplicación a los humedales de Doñana. *Boletín Geológico y Minero*, 113 (3): 313-330.

Márquez, D. (1985). Las repoblaciones de eucaliptos y su impacto en la última década 1973 – 1983. *Revista de Estudios Andaluces*, 5: 135 – 142.

Martínez del Olmo, W., García Mallo, J., Lert Verdú, G., Serrano Oñate, A. y Suárez Alba, J. (1984). Modelo tectosedimentario del Bajo Guadalquivir. I Congreso Español de Geología, Tomo I: 199-213.

Menanteau, L. (1979). Les Marismas du Guadalquivir. Exemple de transformation d'un paysage alluvial au cours du Quaternaire récent. Tesis Doctoral. Universidad Paris – Sorbona, 154 p.

Moller-Jensen, L. (1990). Knowledge-based classification o fan urban area using texture and context information in Landsat TM imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 56 (6): 899-904

Montes, C., Borja, F., Bravo, M. A., y Moreira J. M. (1998). Reconocimiento Biofísico de Espacios Naturales Protegidos. Doñana. Conserjería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. 311 pp. 1 mapa.

Mora, F y Iverson, L. (1998). On the sources of vegetation activity variation and their relation with water balance in Mexico. *International Journal of Remote sensing*, 19 (10), 1.843-1.871.



Moran, M., Clarke, T., Inoue, Y. y Vidal, A. (1994). Estimating crop water deficit using the relation between surface-air temperature and spectral vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 49, 246-263.

Moreira, J.M. Ramos, A., Lobato, A. y Fernández, A. (1989). Evaluación de superficies cultivadas del fresón mediante imágenes Landsat TM. Su uso en un sistema de pronóstico de cosecha. III Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección: 93-103.

Moreira, J.M. y Ojeda, J. (1992). Andalucía, una visión inédita desde el espacio. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.

Moreno, M.T., Antón-Pacheco, C y Gumiel, J.C. (2004). 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.

Muñoz-Reinoso, J.C. (2001). Vegetation changes and groundwater abstraction in SW Doñana, Spain. *Journal of Hydrology*, 242: 197-209.

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

Nemani, R y Running, S. (1989). Estimation of regional surface resistance to evapotranspiration from NDVI and thermal-IR AVHRR data. *Journal of Applied Meteorology*, 28, 276-284.

Nishida, K., Nemani, R., Running, S. y Glassy, J. (2002). Remote sensing of Land Surface Evaporation (I) Theoretical Basis for an Operational Algorithm. *Journal of Geophysical Research D (Atmosphere)*, 1-37.

Ojeda, J.F. (1987). Organización del territorio en Doñana y su Entorno próximo (Almonte). Siglos XVIII-XX. ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.

Overton, I. (1997). Satellite image analysis of River Murray floodplain inundation, NRMS Project R6045, Murray-Darling Basin Commission, Adelaide, 12 p.

Pardo, M. T., Esteve, M. A., Carreño, M. F., Martínez, J., Miñano, J. y Rodríguez, S. (2004). "Análisis de los cambios paisajísticos en los humedales costeros del Mar Menor (Murcia, SE Ibérico) mediante técnicas de teledetección ambiental ", en Medio Ambiente, Recursos y Riesgos Naturales: Análisis mediante Tecnología SIG y Teledetección. Volumen I., Murcia, Carmelo Conesa García, Yolanda Álvarez Rojel y Juan Bautista Martínez Guevara.

Perconig, E. (1960-1962). Sur la constitution géologique de l'Andalousie Occidentale en particulier du Bassin du Guadalquivir (Espagne méridionale). Livre en Mémoire du Professeur Paul Fallot, Mémoires Hors de Série, Société Géologique de France: 229-256.

Pérez González, M.A. y García Rodríguez, M.P. (2001). Comparación de imágenes TM y ETM para analizar los cambios en la gestión del agua y el uso del suelo en la Mancha

húmeda. Teledetección: Medio Ambiente y Cambio Global. Universidad de Lérida. pp. 326-329.

Pinilla (1995). Elementos de Teledetección. Editorial Rama. 311 p.

Rejas, J. G., Prado, E., De Miguel, E. (2004). Caracterización del sensor Hiperespectral AHS para la georreferenciación directa de imágenes a partir de un sistema inercial GPS / IMU. 6ª Semana de Geomática. Barcelona. [www.isprs.org/publications/related/semana\\_geomatica05/front/abstracts/Dimecres9/R16.pdf](http://www.isprs.org/publications/related/semana_geomatica05/front/abstracts/Dimecres9/R16.pdf)

Reserva Biológica de Doñana, CSIC. Datos del Equipo de Seguimiento de Procesos Naturales de la Estación Biológica de Doñana. Huelva, 2006. <http://www.rbd.ebd.csic.es/Seguimiento/mediofisico.htm>.  
E-mail: [acandreu@ebd.csic.es](mailto:acandreu@ebd.csic.es)

Riaza, C. y Martínez del Olmo, W. (1996). Depositional model of the Guadalquivir-Gulf of Cádiz Tertiary Basin. In: Friend, P.F. y Dabrio, C.J. (Eds.). Tertiary Basins of Spain. The Stratigraphic Record of Crustal Kinematics. Cambridge University Press: 330-338.

Ruiz Labourdette, D., Coletto, C., Bravo, M.A., Borja, F. y Montes, C., (en preparación). Formaciones palustres de los mantos eólicos y flecha litoral del Abalario-Doñana, (E 1:60.000). CMA JA.

Ruiz-Verdú, A., Domínguez, J. A. y Peña, R. (2001). Teledetección aeroportada hiperespectral del embalse de Ribarroja. Revista de Teledetección. 16:69-72.

Salvany, J.M. y Custodio, E. (1995). Características litoestratigráficas de los depósitos cuaternarios del Bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas. Rev. Soc. Geol. España, 8: 21-31.

Sánchez, M y Chuvieco, E. (2000). Estimación de la evapotranspiración del cultivo de referencia, ETo, a partir de imágenes NOAA-AVHRR. Revista de Teledetección, 14, 1-10.

Seguin, B., Courault, D. y Guérif, M. (1994). Surface temperature and evapotranspiration application of local scale methods to regional scales using satellite data. Remote Sensing of environment, 49, 287-295.

Serrano, L. y Serrano, L. (1996). Influence of Groundwater Exploitation for Urban Water Supply on Temporary Ponds from the Doñana National Park (SW Spain). Journal of Environmental Management, 46: 229-238.

Shaikh, M., Brady, A., Sharma, P. (1997). Applications of remote sensing to assess wetland inundation and vegetation response in relation to hydrology in the Great Cumbung Swamp, Lachlan Valley, NSW, Australia. Wetlands for the Future (A.J. McCumb and J.A. Davies, editors), Gleneagles Publishing, Glen Osmond, South Australia, pp. 595 – 606.

Sierro, F.J., González Delgado, J.A., Dabrio, C.J., Flores, J.A. y Civis, J. (1990). The Neogene of the Guadalquivir Basin (SW Spain). Paleont. Evol. Mem. Esp. 2: 211-250.

Sierro, F.J., Flores, J.A., Civis, J., González-Delgado, J.A. y Francés, G. (1993). Late Miocene globorotaliid event-stratigraphy and biogeography in the NE-Atlantic and Mediterranean. *Marine Micropaleontology*, 21: 143-168.

Sierro, F.J., González Delgado, J.A., Dabrio, C.J., Flores, J.A. y Civis, J. (1996). Late Neogene depositional sequences in the Foreland basin of Guadalquivir (SW Spain). *Tertiary Basins of Spain* (P.F. Friend y C.J. Dabrio, Eds.), Cambridge University Press: 329-334.

Sierro, F.J., Ledesma, S., Flores, J.A., Torrecusa, S. y Martínez del Olmo, W. (2000). Sonic and gamma ray astrochronology. Cycle to cycle calibration of Atlantic climatic records to Mediterranean sapropels and astronomical oscillations. *Geology*, 28: 695-698.

Sierro, F.J., Hilgen, F.J., Krijgsman, W. y Flores, J.A. (2001). The Abad composite (SE Spain). A Mediterranean and global reference section for the Messinian. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 168: 143-172.

Siljeström, P., García, L.V., Clemente, L. y Segura, F.J. (1989). Estudio multitemporal de las marismas del Guadalquivir. Reconocimiento del medio físico. II Reunión del Grupo Español de Trabajos de Teledetección: 51-58.

Smith, G.M. y Milton, E.J. (1999). The use of the empirical line method to calibrate remotely sensed data to reflectance. *International Journal of Remote Sensing*, 20: 2653 – 2662.

Sousa Martín, A. y García Murillo, P. (1998). Cambios históricos en el avenamiento superficial y la vegetación del Parque Natural de Doñana (Sector Abalarío), Huelva.

Sousa Martín, A. y García Murillo, P. (1999). Historical evolution of the Abalarío lagoon complex (Doñana Natural Park, SW Spain). *Limnética* 16: 85 – 98.

Sousa Martín, A. (2004). Evolución de la vegetación higrofitica y de los humedales continentales asociados en el litoral onubense oriental. Tesis doctoral. Universidad de Sevilla. 2 t. 935 p.

Suárez, J., Martínez del Olmo, W., Serrano, A. y Lleret, G. (1989). Estructura del sistema turbidítico de la Formación Arenas del Guadalquivir, Neógeno del Valle del Guadalquivir. Libro Homenaje R. Soler, AGGEP, 123-132.

Tenajas López, J.L. y Llamas, R. (1986). Aplicación de la teledetección espacial (imágenes Landsat) al estudio de la hidrología superficial de las Marismas del Parque Nacional de Doñana. II Simposio sobre el Agua en Andalucía, Granada, 2: 555-566.

Thenkabail, P.S., Ward, A.D., Lyon, J.G. y Merry, C.J. (1994). Thematic Mapper vegetation indices for determining soybean and corn crop parameters. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60: 437-442.

Thenkabail, P.S. (2003). Biophysical and yield information for precision farming from near-real-time and historical Landsat TM images. *Int. J. Remote Sensing*, Vol. 24, No. 14: 2879-2904

Trick, Th. (1998). Impacto de las extracciones de agua subterránea en Doñana: aplicación de un modelo numérico con consideración de la variabilidad de la recarga. Tesis doctoral. ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.

Vela, A., Rodríguez-Arévalo, J., Tenajas, J.L., (1991). Análisis de los efectos de la explotación del acuífero costero en las proximidades del Parque Nacional de Doñana. *Aquifer Overexploitation. XXIII IAH International Congreso*, Puerto de La Cruz. 1: 179-182.

Vela, A., Mejuto, M.F., Castaño, S. y Calera, A. (1999). Efectos causados por los regadíos en la disponibilidad de recursos hídricos para el Parque Nacional de Las Tablas de Daimiel. *Teledetección. Avances y Aplicaciones. Papeles de la diputación de Albacete*. pp. 11-114.

Verdin, J.P. (1996). Remote sensing of ephemeral water bodies in western Niger. *Int. J. Remote Sensing*, 1996, Vol. 17, No. 4: 733-748

Vermote, E.F., Tanre, D., Deuzé, J.L., Herman, M., and Morcrette, J.J., (1997). Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview, *IEEE Trans. Geosc. Remote Sens.* 35(3):675-686.

Viguié, C. (1974). Le Néogène de l'Andalousie Nord-Occidentale (Espagne): Histoire géologique du Bassin du Bas-Guadalquivir. Thèse Univ. Bordeaux: 450pps.

Wilson, P. A. (1997). Rule-based classification of water in Landsat MSS images using the variant filter. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 63, No. 5: 485-491.

Yang, W., Yang, L. y Merchant, J. (1997). An assessment of AVHRR/NDVI-ecoclimatological relations in Nebraska, U.S.A. *International Journal of Remote Sensing*, 18(10), 2161-2180.

Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Civis, J. y Baena, J. (1985). Paleogeografía de la desembocadura del Guadalquivir al comienzo del Cuaternario (Provincia de Cádiz, España). *Actas I Reunion Quatre. Iberico*, Lisboa: 461-472.

Zazo, C., Goy, J.L., Somoza, L., Dabrio, C.J., Belluomini, G., Improta, S., Lario, J., Bardaji, T. y Silva, P.G. (1994). Holocene sequence of sea-level fluctuations in relation to climatic trends in the Atlantic-Mediterranean linkage coast. *Jour. Coastal Res.*, 10: 933-945.

Zazo, C., Dabrio, C.J., González, J.A., Sierro, F.J., Yll, R., Goy, J.L., Luque, L., Pantaleón-Cano, J., Soler, V., Roure, J.M., Lario, J., Hoyos, M. y Borja, F. (1999). The record of the latter glacial and interglacial periods in the Guadalquivir marshlands (Mari López drilling, SW Spain). *Geogaceta*, 26: 119-122.

Zunzunegui, M., Díaz Barradas, M.C., y García Novo, F. (1998). Vegetation fluctuation in Mediterranean dune ponds in relation to rainfall variation and water extraction. *Applied Vegetation Science*, 1: 151-160.



CIRCULAR 1/2005. ANEXO V  
INFORME FINAL DE RESULTADOS DEL PROYECTO

FECHA INICIO (mes/año)		FECHA FINALIZACIÓN (mes/año)		RESPONSABLE DEL PROYECTO	
Abril / 2003		Prevista: diciembre/2006	Real: julio/2007	CARMEN ANTÓN-PACHECO	
TÍTULO DEL PROYECTO					
ESTUDIO DE LOS HUMEDALES Y DE LOS USOS DEL SUELO EN LA COMARCA DE DOÑANA Y SU ENTORNO MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN					
TÍTULO ABREVIADO			LÍNEA DE ACCIÓN		
TELEDETECCIÓN DOÑANA			Cartografía Geocientífica		
PROYECTO					
Tipo 1 <input checked="" type="checkbox"/>	Tipo 2 <input type="checkbox"/>	Propio <input checked="" type="checkbox"/>	Subvencionado <input type="checkbox"/>	En Convenio <input checked="" type="checkbox"/>	Op. Comercial <input type="checkbox"/>
INFORME FINAL ENTREGADO EN EL CENTRO DE DOCUMENTACIÓN: Si <input checked="" type="checkbox"/> No <input type="checkbox"/>				FECHA DE ENTREGA: 14-08-07	

EQUIPO DE TRABAJO			
Nombre	Categoría	Organismo	Actividad realizada
María Teresa Moreno Álvarez	T-5	IGME	Análisis imágenes Landsat y AHS. Cartografía formaciones palustres
Juan Carlos Gumiel Gutiérrez	T-4	IGME	Análisis imágenes Landsat . Cartografía usos del suelo
Carmen Antón-Pacheco	T-2	IGME	Dirección del proyecto. Análisis datos AHS
Carlos Mediavilla	T-4	IGME	Estudio piezométrico del sector de Santa Olalla
Sara Soto	Becaria	IGME	Análisis imágenes MODIS y METEOSAT. Estudio evapotranspiración
Teresa López	Becaria	IGME	Análisis imágenes Landsat. Cartografía segmentos agrícolas
Román Hernández	T-4	IGME	Aplicación Intranet base de datos
Manuel Bernat	T-5	IGME	Aplicación Intranet base de datos
Ana Rebollo	T-5		Estudio piezométrico del sector de Santa Olalla
Otros Organismos Participantes en el Proyecto			
Organismo	Responsable	Actividad realizada	
INTA	José Antonio Gómez	Planificación vuelos AHS	
INTA	Marcos Jiménez	Campañas radiometría y calibración datos AHS	
CEDEX	José Antonio Domínguez	Análisis imágenes MODIS y METEOSAT. Estudio evapotranspiración	
Universidad Valladolid	Alfredo Romo	Campañas radiometría	



#### **BREVE DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO (máximo 10 líneas)**

Una serie temporal de imágenes Landsat registradas a lo largo de una secuencia de veinte años ha permitido cartografiar las fluctuaciones de la lámina de agua de las lagunas permanentes y temporales del Manto Eólico Litoral de El Abalarío-Doñana (MELAD). Se ha evaluado la capacidad de nuevos datos hiperespectrales del sensor aeroportado AHS para determinar las oscilaciones máximas de los niveles de inundación de las formaciones palustres a lo largo del ciclo hidrológico 2004-2005. La espectroradiometría de campo y el tratamiento de las imágenes AHS han permitido caracterizar la vegetación higrofítica (monte negro) de la zona, cuya distribución es un buen indicador de la profundidad del nivel freático del acuífero de Doñana. En relación con la actualización del modelo hidrogeológico del acuífero regional Almonte-Marismas, se han cartografiado las superficies de cultivo de regadío a partir de la utilización de imágenes Landsat para estimar las demandas de riego y los retornos al acuífero y a partir de imágenes MODIS y METEOSAT se ha calculado la ETr para un periodo de 2005

#### **OBJETIVOS DEL PROYECTO**

##### **OBJETIVOS GENERALES (máximo 5 líneas)**

Se enmarcan en la búsqueda de indicadores que relacionen las manifestaciones de sequía en las zonas húmedas con la evolución de los niveles freáticos del acuífero, las precipitaciones y los usos de las aguas subterráneas. Una de las herramientas disponibles en la actualidad para realizar la cartografía y el estudio de la evolución temporal de los humedales es el tratamiento y análisis de imágenes de satélite y de sensores aeroportados. El análisis de los cambios en las cubiertas y usos del suelo proporcionan una información fundamental en los estudios de gestión y planificación territorial y de impacto ambiental. La cartografía de los cambios de usos que se han producido en la comarca de Doñana es una información de gran interés para evaluar la incidencia de las extracciones en los sistemas lagunares, en los márgenes de arroyo y en las zonas húmedas del ecotono.

##### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS (máximo 5 líneas)**

Aplicación y evaluación de diversos algoritmos de tratamiento de imágenes Landsat para la discriminación de superficies de agua, zonas encharcadas y vegetación higrofítica en los mantos arenosos de Doñana y su entorno. Caracterización del estado y evolución de las lagunas y zonas húmedas, así como el comportamiento espectral de la vegetación natural de los mantos eólicos a partir de imágenes hiperespectrales AHS. Cálculo de la superficie de los cultivos de regadío con el fin de obtener las demandas y volúmenes de riego durante el año 2004, y los retornos al acuífero. Análisis de imágenes MODIS y METEOSAT, y datos meteorológicos para el cálculo de la evapotranspiración real (ETr)

#### **SÍNTESIS DE LOS LOGROS DEL PROYECTO (en relación con los objetivos)**

Cartografía de las lagunas y zonas de encharcamiento correspondientes al subsistema acuífero de Doñana, así como de su evolución durante el periodo 1985-2005.  
Cartografía del estado actual de la vegetación higrofítica asociada a las zonas húmedas.  
Cartografía de los usos agrícolas y forestales, así como de los cambios de uso de suelo ocurridos durante el periodo 1985-2005 en el área correspondiente al acuífero Almonte-Marismas.  
Incorporación de la información generada en un SIG y cruce de la misma con las cartografías de cambios de uso del suelo, datos pluviométricos y de niveles piezométricos con objeto de caracterizar las afecciones de los mismos.  
Implementación de una metodología de tratamiento de imágenes de teledetección para la cartografía y el seguimiento temporal de los humedales en Doñana y su entorno.  
Resultados preliminares del cálculo de la ETr correspondientes a un periodo de 2005 y obtención de mapas de ETr del sector del acuífero Almonte-Marismas



**PRODUCTOS DEL PROYECTO (GENERALES Y DE INTERÉS PARA EL IGME)**

**PUBLICACIONES (autores, título, libro o revista, lugar publicación, volumen, páginas, ISBN o ISSN)**

Moreno Álvarez, M.T.; Antón-Pacheco, C y Gumiel Gutiérrez, J.C. (2004). Detección de las variaciones estacionales de las lagunas peridunares de Doñana a partir de imágenes Landsat e imágenes ADS 1268 ATM. Geotemas 6(2) pp.353-356.ISSN: 1567-5172

C. Antón-pacheco, M.T. Moreno, J. A. Gómez, M. Jiménez, C. Mediavilla, J.C. Gumiel, E. Prado, J.G. Reja, O. Gutiérrez y A. Rebollo. (2005) Contribución al Estudio de los Humedales del Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana a partir de Imágenes AHS. Actas XI Congreso Nacional de Teledetección. Puerto de la Cruz. Pp.437-442.ISBN: 84-609-6894-4

C. Antón-Pacheco, M.T. Moreno, J.C. Gumiel, C. Mediavilla, A. Rebollo. (2006) Estudio de los humedales y de los usos del suelo en la comarca de Doñana y su entorno a partir de imágenes Landsat y AHS. (2006). Las aguas subterráneas en los países mediterráneos. Pub Inst. Geol. y Min. de España. Serie Hidrogeología y aguas Subterráneas. 17: 383-391. ISBN: 84-78460-631-X.

**INFORMES INÉDITOS (autores, título, extensión, serie, lugar de depósito)**

**DATOS (tipo y características, base de datos que los contiene)**

**OBRAS (tipo y características)**

**INSTALACIONES (tipo y características)**





#### FORMACIÓN CONSEGUIDA

Técnicas de tratamiento de datos hiperespectrales y sus aplicaciones

#### ACTIVIDADES EXTERIORES RELACIONADAS CON EL PROYECTO (Participación en reuniones científicas y congresos, de seguimiento de convenios, etc.)

VI Congreso Geológico de España. Comunicación oral  
Reunión proyectos de investigación Estación Biológica de Doñana junio 2005. Comunicación oral  
XI Congreso Nacional de Teledetección. Puerto de La Cruz. Tenerife. septiembre 2005. Premio al mejor poster "Contribución al Estudio de los Humedales del Manto Eólico Litoral de El Abalario-Doñana a partir de Imágenes AHS"  
Congreso AqualnMed: Las aguas subterráneas en los países mediterráneos. Málaga, abril 2006. Comunicación oral.  
Taller de Grupos de Investigación para la Gestión Hídrica de los Humedales Andaluces. Baeza, mayo 2007. Comunicación oral.

#### EXPLICACIÓN DE LAS DESVIACIONES EN LA EJECUCIÓN DEL PROYECTO (si las hubo)

El proyecto ha acumulado atrasos por la contratación del titulado superior y el tratamiento de los datos AHS imputables a problemas de registro del sensor aeroportado.

#### COMENTARIOS

El Responsable del Proyecto	Enterado, El Responsable de Línea	Enterado, El Responsable de Programa, o El Director de la Unidad	Recibido, El Gestor de Proyectos
Nombre: Carmen Antón-Pacheco Fecha: 13/08/2007	Nombre: Juan Carlos Gumiel Fecha: 13/08/2007	Nombre: Carmen Antón-Pacheco Fecha: 13/08/2007	Nombre: Fecha: