

CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE

 Instituto Geológico  
y Minero de España

62540

I

# ***IMPACTO DE LA SEQUÍA EN LOS ACUÍFEROS DE ANDALUCÍA***

***TOMO I***

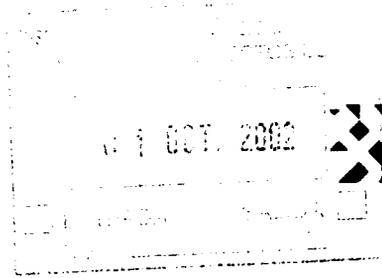
***MEMORIA***

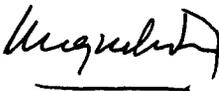
***ANEXO 2. TELEDETECCIÓN***

***ANEXO 3. BASE DE DATOS***

***ANEXO 4. SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA***

*Sevilla, 21 de Diciembre de 2.001*



<b>INFORME</b>	Identificación: Impacto de la sequía en los acuíferos de Andalucía <b>H.8.002.2003</b>
	Fecha: diciembre de 2001
<b>TÍTULO</b>	
Impacto de la Sequía en los Acuíferos de Andalucía (Tres tomos y un CD)	
<b>PROYECTO</b>	
Convenio específico con la Consejería de Medio Ambiente para el proyecto Impacto de la Sequía en los Acuíferos de Andalucía	
<b>RESUMEN</b>	
<p>Recopilación de la información climatológica, hidrológica, hidrogeológica y de usos del las aguas subterráneas en los acuíferos de Andalucía vinculados a los Espacios Naturales Protegidos y de los que tiene información histórica el IGME. Para esto se ha creado un sistema de información geográfica y sus bases de datos asociadas.</p> <p>Se han seleccionado una serie de indicadores y estudiado su evolución en periodos secos y húmedos así como su afección a los ecosistemas de superficie como manifestación de la sequía. Al mismo tiempo se ha iniciado la implementación de un método de evaluación del efectos de la sequía en acuíferos de nivel somero (vinculados a humedales) a través del análisis espectral de series de imágenes de satélite.</p>	
Revisión  Nombre: <b>Juan Antonio López Geta</b>  Unidad: <b>Hidrogeología y Aguas Subterráneas</b>  Fecha: <b>17/3/2003</b>	<b>Autores: Manuel Vázquez Mora, Rafael Ortega Vargas y Juan Antonio Luque Espinar</b>    <b>Responsable: Miguel Martín Machuca</b>

*El presente proyecto ha sido realizado de forma conjunta por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y el Instituto Geológico y Minero de España.*

*Por parte de la Consejería de Medio Ambiente ha participado:*

*D. José Manuel Moreira Madueño  
D<sup>a</sup>. Mercedes García Padilla*

*Por parte del IGME han participado:*

*D. Miguel Martín Machuca (Director del Proyecto)  
D. Manuel Vázquez Mora  
D. Rafael Ortega Vargas  
D. Juan Antonio Luque Espinar*

*También han colaborado en la realización del proyecto por parte del IGME:*

*D. Ángel Díaz Pérez (SIG)  
D. David Pachón García (Base de Datos)  
D<sup>a</sup>. Carmen Antón Pacheco (Teledetección)  
D<sup>a</sup>. María Teresa Moreno (Teledetección)  
D. Juan Carlos Gumiel Gutiérrez (Teledetección)*

#### *AGRADECIMIENTOS:*

*El presente trabajo no hubiese sido posible sin la inestimable colaboración de los Directores de los Espacios Naturales Protegidos, de la generosidad de la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente por la cesión de las imágenes Landsat, de D. Luis Linares (INIMA) y el servicio de Gestión de Aguas de la Mancomunidad S<sup>a</sup> de Grazalema.*

## ÍNDICE

Pág.

### 1. MEMORIA

1.1	INTRODUCCIÓN	2
1.2	OBJETIVO	3
1.3	METODOLOGÍA	4
1.4	LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ANDALUCÍA	8
1.5	LA SEQUÍA	16
1.6	CONCLUSIONES	21
1.7	RECOMENDACIONES Y PROPUESTAS	29
1.8	BIBLIOGRAFÍA	31

### 2. ANEXOS

2.1.	FICHAS INDIVIDUALES	32
2.2.	TELEDETECCIÓN	34
2.3.	BASE DE DATOS	47
2.4.	SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	48

## 1. MEMORIA

### 1.1 INTRODUCCIÓN

El presente proyecto nace del interés mutuo de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y el Instituto Geológico y Minero de España, del Ministerio de Ciencia y Tecnología, en profundizar en el conocimiento de la sequía y los mecanismos que conducen a la afección de los Espacios Naturales Protegidos por dicha sequía.

La Consejería de Medio Ambiente y el IGME tienen firmado un Convenio Marco de Cooperación desde 1994 (entonces Agencia de Medio Ambiente e Instituto Tecnológico Geominero de España) por el cual se facilitará la coordinación de acciones científicas y tecnológicas tendentes al mejor conocimiento del Medio Ambiente Geológico constituido por los Sistemas de Tierra y Agua en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

Amparándose en este Convenio Marco, se suscribe, con fecha 21 de diciembre de 1999, un Acuerdo Específico de Colaboración entre el IGME (antes ITGE) del Ministerio de Ciencia y Tecnología (antes Ministerio de Medio Ambiente) y la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía para la realización del proyecto "Impacto de la Sequía en los Acuíferos de Andalucía".

Tal como se ha comentado en líneas anteriores, el objeto del presente estudio es profundizar en el conocimiento de la sequía, desde el punto de vista de la afección que produce la misma en los acuíferos vinculados a Espacios Naturales Protegidos en Andalucía.

Para llevar a cabo esta tarea, el IGME dispone de una gran infraestructura de información hidrogeológica, obtenida a partir de los

estudios hidrogeológicos que viene realizando, principalmente desde los años sesenta hasta la actualidad y de las redes de control que tiene en gran parte de las unidades hidrogeológicas del territorio andaluz.

Es en estas unidades, en las que existen registros históricos de los parámetros hidrogeológicos, en las que se centra el presente proyecto.

En definitiva, se pretende también aprovechar la existencia del Acuerdo Marco entre ambas instituciones para incrementar el conocimiento del medio hídrico y al mismo tiempo, alimentar con estos conocimientos el Sistema de Información Ambiental de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía.

## 1.2 OBJETIVO

El objetivo principal de este proyecto es disponer de un documento que contenga la información existente sobre las aguas subterráneas y los espacios naturales protegidos en Andalucía, orientada desde el punto de vista de la sequía y con la finalidad de servir de documento de partida para un mejor conocimiento de sus mecanismos de afección.

Al mismo tiempo, el modelo de informe final propuesto en el Acuerdo Específico, da una idea del carácter metodológico del proyecto, conteniendo una serie de fichas o informes individualizados por unidad hidrogeológica, en los que se esquematizan las características principales de las unidades, poblaciones, usos, afecciones de esos usos y afecciones del espacio natural vinculado a cada una. Esta información individualizada y específica se plasma en una base de datos que permite, de forma rápida, realizar consultas diversas sobre aspectos comunes de las unidades hidrogeológicas.

Esta base de datos constituye otro de los objetivos de este proyecto al crearse un instrumento que permita incorporar al SINAMBA, la

información hidrogeológica básica así como los datos específicos de usos y afecciones del medio hídrico, en cuanto a aguas subterráneas se refiere, de Andalucía.

### 1.3 METODOLOGÍA

La forma en que se plantea la ejecución de este proyecto viene ya determinada en el Acuerdo Específico que da origen al mismo. Así, se dice que debe haber una primera parte introductoria en la que se planteen las líneas generales del conocimiento de las aguas subterráneas en Andalucía, de los conceptos generales de sequía y de los términos aplicables a los casos de Andalucía.

En segundo lugar se realiza un estudio pormenorizado de la situación de las unidades hidrogeológicas vinculadas a espacios naturales protegidos, haciendo la salvedad de aquellas en las que el IGME no posea datos históricos ni redes de control que permitan obtener conclusiones de la investigación. Esta segunda parte del proyecto es la que requiere el mayor esfuerzo de toma de datos y constituye el núcleo de la información del mismo. Para llevar a cabo esta actividad se diseñó una ficha tipo para cumplimentarla con los datos de cada unidad.

El criterio inicial que se siguió fue el de mayor cantidad de información, es decir, se plantearon en esta ficha todos los aspectos relacionados con las características de la unidad, las de las aguas subterráneas, sus usos (agrícola, urbano, industrial y ambiental), las modificaciones de los usos provocadas por los episodios de sequía, los parámetros considerados como posibles indicadores de la sequía y sus evoluciones.

En la fase de captura de la información se ve que la amplitud inicial de la ficha es buena como punto de partida, pero en la práctica se demuestra que, desgraciadamente, no hay información útil de todos los parámetros que nos interesan, o sea, que no existe información o que la

que existe no es de utilidad para los objetivos de este trabajo. De este modo se observa que hay determinadas unidades, afortunadamente pocas, a las que no se puede extender el estudio por falta de datos y por otro lado hay ciertos parámetros que deben ser descartados para su estudio como indicadores por la escasez de sus datos, la falta de uniformidad de los mismos y la ausencia total en diversas unidades.

Debe tenerse en cuenta en este punto que muchos de los datos de partida proceden de redes de control y sistemas de datos no diseñados para el objetivo de este proyecto, por lo que frecuentemente las situaciones de los puntos de control, la frecuencias de las medidas y las épocas de toma de datos no son los ideales, pero pueden aportar alguna información de interés.

El resultado final ha sido que ha variado levemente el número de unidades a las que se les ha aplicado el presente estudio y además que ha variado la ficha de cada unidad y por ello la información obtenida de las mismas.

Respecto de la idea original, se han variado algunos apartados de las fichas-informe de cada unidad. Así, en el capítulo tercero "Modificación de los usos habituales de las aguas subterráneas en la U.H. debido a la sequía", se ha suprimido el apartado nº 26 Espacios Naturales Protegidos vinculados a la U.H. afectados, porque, de modo general han sido afectados todos los ENP, el apartado nº 27 Efecto sobre los caudales superficiales relacionados con la U.H., por no disponer el Organismo de Cuenca de una red de información suficientemente extensa ni fiable, el apartado nº 28 Descarga de manantiales afectados, por no disponer de información fiable ni suficientemente extensa, el apartado nº 29 Evolución de las Zonas Húmedas vinculadas a la U.H.. Superficie vegetal afectada por estrés hídrico, porque su información se ha incorporado a un apartado nuevo numerado como nº 29 Efectos ambientales de la sequía en la flora y la fauna de los ENP vinculados a

la unidad y el apartado nº31 Evolución de las características hidroquímicas de los puntos del Inventario de Puntos de Agua pertenecientes a la red de seguimiento de la calidad, seleccionados como indicadores. Fecha y analítica, porque una vez analizadas las series de datos de las Red de Calidad del IGME, se observa que existen bastantes unidades objeto del estudio que no disponen de puntos de la red y que las que disponen de puntos de seguimiento de la calidad de las aguas subterráneas, tanto la ubicación, como la frecuencia de toma no están diseñados para el objetivo de este proyecto, sino para modificaciones generales de la calidad de los acuíferos, con lo que el periodo de toma habitual, semestral, invalida los datos para obtener conclusiones realistas sobre la afección de la sequía a la calidad de una unidad hidrogeológica.

La información contenida en cada ficha se ha dividido en cuatro clases diferentes según su origen; una primera procede de las bases de datos, informes y publicaciones que constituyen la infraestructura de conocimiento del IGME, e incluye la caracterización geológica e hidrogeológica de la unidad, la caracterización química de sus aguas, así como las evoluciones históricas de los parámetros medidos periódicamente por el IGME y los datos generales al balance de cada unidad. A continuación, los datos correspondientes a los usos de las aguas subterráneas, deben partir y actualizarse periódicamente de sus usuarios, y en este caso se han consultado datos de la Consejería de Agricultura y Pesca, así como determinadas comunidades de regantes para conocer los usos como regadío, datos de los ayuntamientos y Empresas de Abastecimiento, para el conocimiento de los usos en abastecimiento y finalmente se han consultado a los Directores de los Espacios Naturales Protegidos para obtener información sobre el uso (ambiental) de las aguas subterráneas.

En tercer lugar, con la información recogida en las fichas, se construye una base de datos, cuyo formato ha sido previamente consensuado con

la Consejería de Medio Ambiente, para su incorporación al SINAMBA de dicha Consejería.

La estructura de la base de datos se compone de una serie de tablas con los datos de las fichas de las unidades, distribuidos según conceptos análogos y enlazados de modo que permita consultar datos comunes a diferentes unidades. El objetivo de esta base de datos es, fundamentalmente, disponer de la información del proyecto en un formato incorporable al SINAMBA.

En cuarto lugar, toda la información cartográfica vinculada al proyecto se agrupa en un sistema de información geográfica de Andalucía, sobre las aguas subterráneas y los Espacios Naturales Protegidos. Este S.I.G. tiene diferentes coberturas, entre las que se destaca, a parte de las de información general, las de los Espacios Naturales Protegidos, las poligonales de las unidades hidrogeológicas y las redes de piezometría e hidrometría. A partir de este S.I.G. se han generado los mapas de situación de cada unidad que se incorporan como anexos en los respectivos informes.

Finalmente, se entregan, como anexos complementarios a la base de datos, los archivos con las tablas y gráficas de la evolución de los principales puntos de control de las redes del IGME en las unidades estudiadas.

De forma extraordinaria, fuera de los objetivos del Acuerdo Específico y como precedente a las posibilidades de una futura colaboración en este tema, se presenta un anexo con las conclusiones parciales del estudio específico de aplicación la tecnología de teledetección como indicador de los efectos de la sequía en el Parque Nacional y Parque Natural de Doñana. Este estudio partió como trabajo específico en el acuífero Almonte-Marismas, por ser muy conocido, importante desde el punto de vista de la ecología y como humedal y por la gran cantidad de datos

existentes, en un intento de investigar parámetros no habituales como indicadores de la sequía.

La base de este método consiste en la implementación de un tratamiento específico de las imágenes de satélite y su correlación con medidas periódicas de pluviometría y de niveles piezométricos y/o limnimétricos, así como la constatación in situ de los parámetros rediométricos obtenidos, de modo que puedan establecerse conclusiones sobre lluvia, posición relativa del nivel freático y afección a la cubierta vegetal. Las ventajas que tiene este método es que permite su calibración con imágenes de años anteriores (existe una serie importante de imágenes desde hace más de 15 años).

#### 1.4 LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN ANDALUCÍA.

Históricamente el hombre se ha asentado, por sus necesidades, en las proximidades de fuentes de abastecimiento de agua dulce, bien de origen superficial (ríos y lagos) o subterránea (manantiales).

Los primeros indicios de obras para el aprovechamiento de las aguas subterráneas se remontan a la época romana que dejó un importante legado de conducciones, acueductos y sistemas de abastecimiento, como los acueductos de Estepona, Gades (abastecimiento a Cádiz desde el Tempul, en la Sierra de las Cabras) e Itálica, así como las termas de Carratraca, Alhama de Granada o Manilva.

La civilización árabe también contribuyó al desarrollo de las aguas subterráneas pues otorgaban un alto valor al agua en general como elemento de vida y sobre el que giraba toda la actividad productiva.

Hidrológicamente las aguas superficiales tienen una recarga-descarga muy grande y un almacenamiento pequeño, mientras que con las aguas subterráneas ocurre lo contrario, tienen un gran almacenamiento y poca circulación. Así, el valor de la hidrogeología radica en la importancia de los depósitos subterráneos de agua y en los caudales circulantes por ellos. Estos depósitos ocupan grandes extensiones y en Andalucía la superficie ocupada por los principales acuíferos se estima en 21.000 km<sup>2</sup>.

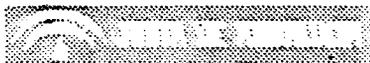
A parte, existen gran cantidad de pequeñas formaciones acuíferas de carácter local que satisfacen la demanda dispersa, principalmente de origen rural y pequeños núcleos urbanos.

En la Tabla nº 1 se reproduce la relación de Unidades Hidrogeológicas catalogadas dentro de Andalucía.

Tabla nº 1. Relación de Unidades Hidrogeológicas en el ámbito de la Comunidad Autónoma de Andalucía.

N.U.	NOMBRE	SUP. Km <sup>2</sup>	ENTRADAS hm <sup>3</sup> /año	BOMBEOS hm <sup>3</sup> /año
04.12	Ayamonte-Huelva	610	105	45
05.01	S <sup>a</sup> de Cazorla	590	100	4
05.02	Quesada-Castril	1500	200	1
05.03	Duda-La Sagra	50	7	< 1
05.04	Hués-car-Puebla	170	30-44	4
05.05	S <sup>a</sup> de la Zarza	40	4	< 1
05.06	Oro-e-María	220	22-24	1,3
05.07	Oúllar-Beza	125	7-9	3
05.08	S <sup>a</sup> de las Estancias	249	17	8
05.09	Baza-Caniles	160	21-26	4
05.10	Jabalcoón	10	1	0
05.11	S <sup>a</sup> de Baza	272	35	1
05.12	Guadix-Marquesado	300	43-49	17,5

N.U.	NOMBRE	SUP km <sup>2</sup>	ENTRADAS hm <sup>3</sup> /año	BOMBEO hm <sup>3</sup> /año
05.13	Mencal	28	7	2
05.14	Bedmar-Jódar	17	2,2	1,6
05.15	Torres-Jimena	16,4	4-5,3	0,4
05.16	Jabalcoz	6	2,6	1,2
05.17	Jaén	10,5	2,6-3,1	1,6
05.18	San Cristóbal	4	0,75	0,3
05.19	Mancha Real-Pegalajar	30	4,7-6,5	1,5
05.20	Almadén-Carluca	77	19-20	0,1
05.21	S <sup>a</sup> Mágina	55	13,5	0,4
05.22	Mentidero-Montesinos	23	5	0
05.23	Úbeda	100	14	2
05.24	Bailén-Guarroman	15	3-6	1
05.25	Rumblar	40	3	2
05.26	Aluv. Guadalquivir (Córdoba-Jaén)	450	45	5
05.27	Porcuna	15	2	< 1
05.28	Montes Orientales. Sector Norte	145	35	1
05.29	S <sup>a</sup> de Colomera	98	25	8,2
05.30	S <sup>a</sup> Arana	156	50	2,3
05.31	Padul-La Peza	300	92	3
05.32	Depresión de Granada	1000	280	60
05.33	S <sup>a</sup> Elvira	8	2	1
05.34	Madrid-Parapanda	28	7,2	0,8
05.35	Sierras de Cabra-Gaena	148	54	0,5
05.36	Rute-Horconera	192	19	0
05.37	Albayate-Chanzas	53	10	1
05.38	Pedroso-Arcos	21	6,5	3
05.39	Hacho de Loja	9	3	0,5
05.40	S <sup>a</sup> Gorda	305	131	9
05.41	Chotos-Cortijo Hidalgo	16	1	0,5
05.42	Tejada-Almijara-Los Guajares	720	153-157	10
05.43	S <sup>a</sup> de Estepa	95	11,2	8,5
05.44	Altiplanos de Écija	1319	77	35-40
05.45	S <sup>a</sup> Morena	740	63	10,5
05.46	Aluvial del Guadalquivir	450	80-120	15
05.47	Sevilla-Carmona	1300	174	40
05.48	Arahal-Paradas-Morón	435	23,6	9,7
05.49	Niebla-Posadas	287	28-34	25,3
05.50	Aljarafe	350	28,5	25,3
05.51	Almonte-Marismas	1840	213	77
05.52	Lebrija	80	7	6
05.53	Llanos de Villamartín	45	5,5	3
05.54	Arcos-Bornos-Espera	65	7	7
05.55	Aluvial del Guadalete	150	24	15
05.56	Jerez de la Frontera	95	14	2
05.57	Rota-Sanlúcar-Chipiona	90	13	10



N.U.	NOMBRE	SUP Km <sup>2</sup>	ENTRADAS hm <sup>3</sup> /año	BOMBEOS hm <sup>3</sup> /año
05.58	Puerto de Santa María	40	8	4
05.59	Puerto Real-Conil	210	29,5	12,5
05.60	S <sup>a</sup> de las Cabras	26	7	1
05.61	Vejer-Barbate	146	33	27
05.62	Aluvial del Barbate	130	20	4
05.63	Setenil-Ronda	300	10	7
05.64	S <sup>a</sup> de Grazalema	185	60	2
06.01	El Saltador	73	3	5-9
06.03	Alto Almanzora	180	17-20	4-7
06.04	Huércal-Overa	9	7,5-8	2,5-4
06.05	Ballabona-S <sup>a</sup> Lisboa	48	2,5-3,8	4-6
06.06	Bajo Almanzora	20	3	2-3,5
06.07	Bédar-Alcornia	14	2,5-4	3-4
06.08	Alto Aguas	145	6-8	2
06.09	Campo de Tabernas-Gérgal	117	8	1,2
06.10	Cuenca de río Nacimiento	130	15-20	10
06.11	Campo de Níjar	320	18-19	22-23
06.12	Andarax-Almería	260	25	18
06.13	S <sup>a</sup> de Gádor (Medio Adra)	160	34-39	4
06.13	S <sup>a</sup> de Gádor (Alto Andarax)	260	34-43	9
06.14	Campo de Dalías	670	97	133
06.15	Delta del Adra	18	21-23	15-17
06.16	Albuñol	23	11-13	4
06.18	Lújar	125	66	< 1
06.19	S <sup>a</sup> Escalante	18	15	< 1
06.20	Carchuna-Castell de Ferro	8	5,5	2,3
06.21	Motril-Solobrea	42	47,5	17,5
06.22	Río Verde	5	11-17	7-11
06.23	Depresión de Padul	50	1,5	0
06.27	Vélez	30	33	39
06.29	Alfarnate	25	10	< 1
06.31	Las Cabras-Camarolo-San Jorge	63	20	< 1
06.32	El Torcal de Antequera	35	15	6,7
06.33	Llanos de Antequera-Archidona	225	46-53	31
06.34	Fuente de Piedra	150	20-24	3
06.35	S <sup>a</sup> Teba	10	2,7	1
06.36	Valle de Abdalajís	31	6-7	1
06.37	Bajo Guadalhorce	189	75	25-30
06.38	S <sup>a</sup> Blanca-S <sup>a</sup> de Mijas	200	65-75	35
06.39	Fuengirola	17	19	6,5
06.40	Marbella-Estepona	80	33-45	23
06.41	S <sup>a</sup> de Cañete	55	17	1-2
06.43	S <sup>a</sup> Blanquilla-Merinos-Borbolla	112	39,5	< 1
06.44	S <sup>a</sup> de Líbar	82	112	0
06.45	Jarastépar	13	8	0

N.U.	NOMBRE	SUP Km <sup>2</sup>	ENTRADAS hm <sup>3</sup> /año	BOMBEO hm <sup>3</sup> /año
06.46	Yunquera-Las Nieves	170	75	< 1
06.47	Guadiaro-Hozgarganta	40	18	4
06.48	Sotogrande	33	4	0,5
06.49	Guadarranque-Palmones	105	18	1
06.50	La Línea	10	2,5	1,2
	<b>TOTAL</b>	<b>20.556</b>	<b>3592 a 3774</b>	<b>998 a 1031</b>

La recarga para el conjunto de unidades se estima entre 3.600 hm<sup>3</sup>/año y 3.800 hm<sup>3</sup>/año y la explotación directa por bombeos se aproxima a los 1.000 hm<sup>3</sup>/año, por tanto quedan por regular casi 3.000 hm<sup>3</sup>/año de los recursos de los acuíferos, que suponen una cantidad equivalente a un tercio de la descarga fluvial al mar.

Respecto a los usos de las aguas subterráneas extraídas, el principal es la agricultura, como en el caso de las aguas superficiales, seguido del abastecimiento. No obstante lo anterior, la tendencia actual es hacia una agricultura menos expansiva y más seleccionada en cuanto a especies, métodos de cultivo y volúmenes de riego, con lo que la demanda actual de agua subterránea puede que en lugar de crecer se oriente hacia usos de calidad, principalmente abastecimiento y usos medioambientales.

El consumo actual de agua en Andalucía se cifra en 5.000 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales el 28% corresponden a aguas subterráneas y de estos cerca de 1.100 hm<sup>3</sup>/año se emplean en agricultura y 300 hm<sup>3</sup>/año en abastecimiento urbano y a la industria.

De todos los usos de las aguas subterráneas el menos conocido es el medioambiental, pero no por ello es menos importante. En realidad, se conoce muy poco de este uso como tal y sólo se conocen sus consecuencias, fundamentalmente cuando llegan los periodos de escasez de precipitaciones. Por esto, uno de los objetivos del presente

proyecto es profundizar en el conocimiento del uso ambiental de las aguas subterráneas en Andalucía y tratar de situar el estado de dicho conocimiento.

Como se cita en el Atlas Hidrogeológico de Andalucía, (ITGE-COPT-CTI), podemos decir, respecto a las aguas subterráneas y los usos ambientales de las mismas, que en Andalucía existe una gran cantidad de Espacios Naturales Protegidos (ENP) que ocupan cerca del 20% del territorio y en estos ENP la presencia del agua en sus diferentes estados es imprescindible para el desarrollo de sus ecosistemas.

En relación con las aguas subterráneas, es destacable el número de unidades hidrogeológicas estrechamente relacionadas con áreas de alto valor ecológico y paisajístico. El 45% de los ENP están relacionados con algunas de las unidades hidrogeológicas que están catalogadas en la comunidad.

La mayor parte, expresada en cuanto a su número, de los ENP son Zonas Húmedas y entre éstas, cabe destacar al Parque Nacional y al Parque Natural de Doñana por su extensión y biodiversidad, sin embargo hay que decir que muchas de estas zonas húmedas no están directamente relacionadas con acuíferos, sino que por el contrario se encuentran formando lagunas endorreicas en zonas impermeables..

Sin embargo, desde una óptica areal, las mayores superficies corresponden a aquellos espacios protegidos que abarcan importantes extensiones montañosas, constituidas frecuentemente por macizos carbonatados, cuyo funcionamiento como acuíferos kársticos, condiciona la morfología y la dinámica del espacio natural. Ejemplo de estos son las Sierras de Cazorla y Segura, la Sierra de Grazalema, la Sierra de las Nieves, las Sierras Subbéticas Cordobesas, las Sierras de Huétor y de Baza, Sierra Mágina, Sierra María, Sierra de Castril, Torcal de Antequera, Sierra de Aracena, Sierra Norte de Sevilla y Sierra de Hornachuelos.

Tabla nº 2. Unidades Hidrogeológicas vinculadas a Espacios Naturales Protegidos.

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	ESPACIO NATURAL PROTEGIDO
04.12 Ayamonte- Huelva	Paraje Natural de las Marismas del Odiel
	Paraje Natural de las Marismas de Isla Cristina
	Paraje Natural de las Marismas del Piedra y Flecha del Rompido
	Reserva Natural de la Laguna del Portil
	Paraje Natural de los Enebrales de Punta Umbría
05.01 Sierra de Cazorla	Parque Natural de la Sª de Cazorla, Segura y las Villas
05.02 Quesada-Castril	Parque Natural de la Sª de Cazorla, Segura y las Villas
05.03 Duda-La Sagra	Parque Natural de la Sª de Castril
05.06 Oro- María	Parque Natural de Sª María-Los Vélez
05.11 Sª de Baza	Parque Natural de la Sª de Baza
05.20 Almadén-Carluca	Parque Natural de Sª Mágina
05.21 Sª Mágina	Parque Natural de Sª Mágina
05.26 Aluvial de Guadalquivir Condoba-San	Paraje Natural Laguna Grande
	Paraje Natural del Alto Guadalquivir
05.30 Sª Arana	Parque Natural de Sª Huétor
05.31 Padul-La Peza	Parque Natural de Sª Huétor
05.35 Sª de Cabra-Gaena	Parque Natural de Sª Subbéticas
05.36 Rute-Horconera	Parque Natural de Sª Subbéticas
05.37 Albayate-Chanzas	Parque Natural de Sª Subbéticas
05.42 Tejada-Almijara-Los Guajares	Paraje Natural de los Acantilados de Cerro Gordo-Maró
05.45 Sª Morena	Parque Natural de Sª de Aracena y Picos de Aroche
	Parque Natural de Sª Norte de Sevilla
	Parque Natural de Hornachuelos
05.51 Almonte-Marismas	Parque Nacional de Doñana
	Parque Natural de Doñana
	Paraje Natural de la Laguna de Palos y Las Madres
05.53 Llanos de Villamartín	Paraje Natural de la Cola del Embalse de Bornos
05.54 Arcos-Bornos-Espera	Paraje Natural de la Cola del Embalse de Arcos
05.59 Puerto Real-Conil	Parque Natural de la Bahía de Cádiz
05.61 Vejer-Barbate	Parque Natural Pinar de la Breña y Marismas del Barbate
05.64 Sª de Grazalema	Parque Natural de la Sª de Grazalema
05.08 Alto Aguas	Paraje Natural del Karst en yesos de Sorbas
05.09 Campo de Tabernas	Paraje Natural del Desierto de Tabernas
06.11 Campo de Níjar	Parque Natural de Cabo de Gata-Níjar
06.14 Campo de Dalías	Reserva Natural de Punta Entinas-Sabinar
06.15 Delta del Adra	Reserva Natural de la Albufera de Adra

UNIDAD HIDROGEOLOGICA	ESPACIO NATURAL PROTEGIDO
06.24 Tejada-Almijara-Los Guajares	Parque Natural de las S <sup>a</sup> de Tejada-Almijara
	Paraje Natural de los Acentilados de Cerro Gordo-Maró
06.32 Torcal de Antequera	Paraje Natural del Torcal de Antequera
06.34 Fuente de Piedra	Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra
06.36 Valle de Abdalajís	Paraje Natural del Desfiladero de los Gaitanes
06.37 Bajo Guadalhorco	Paraje Natural de las Desembocadura del Guadalhorco
06.43 S <sup>a</sup> Blanquilla-Merinos-Borbolla	Parque Natural de la S <sup>a</sup> de las Nieves
06.44 S <sup>a</sup> de Libar	Parque Natural de la S <sup>a</sup> de Grazalema
06.46 Yunquera-Las Nieves	Parque Natural de la S <sup>a</sup> de las Nieves
06.47 Guadaro-Hozgarganta	Parque Natural de los Alcornocales
06.49 Guadarranque-Palmones	Paraje Natural del Estuario del río Guadaro
	Parque Natural de los Alcornocales
	Paraje Natural de las Marismas del río Palmones

Como se ha reseñado con anterioridad, diversos motivos como la falta de información o la deficiencia de la misma no nos han permitido incluir en el presente estudio todas las unidades anteriormente relacionadas, siendo excluidas las que aparecen en rojo.

La unidad 05.03 Duda-La Sagra, es de pequeñas dimensiones, no dispone de red de control y su contacto con el Parque Natural de la Sierra de Castril es pequeño

La unidad 05.26 Aluvial del Guadalquivir (Córdoba-Jaen) no dispone de información.

La unidad 05.53 Llanos de Villamartín no dispone de información suficiente al no contar con red de control.

Las unidades 06.08 Alto Aguas y 06.09 Campo de Tabernas, no disponen de suficiente información y los Parajes Naturales del Karst en yesos de Sorbas y del Desierto de Tabernas, tienen un valor fundamentalmente paisajístico.

## 1.5 LA SEQUÍA.

El término sequía no ha tenido una definición fácil para los diferentes autores estudiosos del tema. En realidad, según el objetivo del estudio que se esté haciendo se dará una definición distinta de la sequía, meteorológica, hidráulica, agronómica, ecológica, etc.

Existe un factor común a todas esas definiciones y es el hecho de que se produzca un déficit prolongado de precipitaciones que cause perjuicios por las modificaciones que produce en el uso del agua.

En función de los usos del agua, se tendrán los distintos tipos de sequía, pero habría que puntualizar que los usuarios sean todos los que hacen uso de las aguas y que el déficit implique perjuicios importantes, trastornos en definitiva de las actividades normales biológicas y humanas, que de por sí están habituadas al medio.

No obstante lo anterior, y debido al crecimiento continuado de la demanda, el carácter de sequía se ha ido afinando cada vez más hasta el punto que en muchas ocasiones se considera esa situación incluso cuando los valores de las precipitaciones se encuentran próximos a los medios históricos en los puntos donde dichos valores medios son de por sí bajos, que es en gran parte de la superficie peninsular.

La sequía es un término difuso respecto a sus límites geográficos, y a su inicio y final y por supuesto con fuerte componente objetivo en función de su influencia sobre el observador.

Antiguamente sólo se tenía conocimiento de las sequías por su afección a la agricultura, pero hoy día no sólo es la agricultura la que marca las pautas de la sequía, sino también la industria y sobre todo la población por la elevada demanda actual (Navarro, 1990).

En la actualidad se está considerando de un modo creciente la demanda ambiental y de este modo el medio ambiente pasa a ser otro usuario más de entre los que puede verse perjudicado en las situaciones de ausencia prolongada de precipitaciones, naciendo de este modo el concepto de sequía ecológica.

Tal como cita Catalá (1990), el estudio de la sequía sólo tiene sentido como una materia multidisciplinar (ecólogos, físicos, hidrólogos, meteorólogos, climatólogos,..) que tiene consecuencias sobre aspectos también muy diversos, científicos, económicos, sociales y políticos.

Otro importante factor a tener en cuenta es el carácter relativo de la sequía, en la que no sólo influyen las precipitaciones, sino la distribución de las mismas e incluso la posibilidad de suplir la demanda circunstancialmente con otro recurso que no sea la precipitación directa. Es por tanto conveniente resaltar la importancia de la oportunidad sobre la cantidad de una precipitación, para la comprensión del fenómeno de la sequía.

Partiendo de que los periodos secos en la España verde corresponden a situaciones de predominio de la invasión de masas de aire polar sobre las tropicales, en la España parda ocurre lo contrario. Por tanto, si las grandes sequías son consecuencia de anomalías en la circulación general, sus causas y su previsión habrá que buscarlas en las que a su vez originan tales anomalías; estas resultan de las variaciones producidas en las interacciones térmicas existentes entre las circulaciones atmosféricas y oceánicas y como quiera que tales variaciones son, en gran medida, imprevisibles, no debe sorprendernos que cualquier intento de anunciar la proximidad de sequías resulte fuera de nuestro alcance y que a lo más, tengamos que limitarnos a conjeturas de carácter muy general sobre las tendencias meteorológicas que cabe esperar.

La aperiodicidad de los fenómenos de sequía, o sea, se repiten en el tiempo sin oscilar y el comportamiento de los fenómenos meteorológicos, que son sistemas caóticos que no contemplan ningún parámetro de repetitividad, llevan a plantear que en problemas como los de la sequía, más que a predecirlas o preverlas, todos nuestros esfuerzos han de encaminarse a estar preparados para combatir las poniendo a punto métodos de mitigación (Catalá, 1990).

En cuanto a la afección a las aguas subterráneas, los acuíferos son especialmente sensibles a las sequías de invierno pues en esa estación es donde se produce la mayor parte de su recarga. En primavera es menos importante porque la recarga es mínima por el incremento de la evapotranspiración y en otoño lo único que provoca es un retraso en la recarga. No obstante, independientemente del volumen de las lluvias, es fundamental la distribución temporal y espacial de las mismas, si no se supera el umbral de recarga el acuífero no recibirá agua por grande que sea la precipitación (Navarro, 1990).

Así mismo, la gran inercia que tienen la mayoría de los acuíferos también es muy importante, de modo que el desfase lluvia-recarga puede variar desde días a meses según el tipo de acuífero.

El efecto de la sequía sobre los acuíferos se manifiesta principalmente en un descenso de nivel como reflejo de una disminución del almacenamiento por disminuir el ingreso y/o aumentar las extracciones.

En la sequía del 78/83 se observaron algunos puntos por el IGME en diversos acuíferos de la geografía española, concluyéndose que los acuíferos más afectados fueron los calcáreos con una afección total próxima a los 10 m o lo que es lo mismo, 0.4 m/mes de sequía. Esta cifra supone el 20% del espesor saturado en la mayoría de los acuíferos

de interés regional, y se repusieron con la llegada de las primeras lluvias.

El efecto de la sequía sobre un acuífero se traduce en un descenso del nivel piezométrico que se superpone al descenso estacional y al descenso "dinámico" en zonas afectadas por explotaciones fuertes. En general, en los acuíferos no sujetos a una fuerte demanda o en los que esta es dispersa, si bien pueden llegarse a producir descensos de relativa importancia, la recuperación después del periodo de sequía es rápida, pero en los casos de explotación intensiva concentrada en una zona o en todo el acuífero, con descensos acumulados, en estos casos, la depresión adicional por sequía no se recupera tan fácilmente. En los detríticos las variaciones son menores, no suelen pasar de los 3 m, si bien cuando están próximos al mar hay que considerar el fenómeno de la intrusión y el desplazamiento de la interfaz agua dulce-agua salada.

Otro efecto importante de la sequía sobre las aguas subterráneas es la afección a la calidad de las mismas, que se pone de manifiesto en algunos acuíferos por un incremento de la mineralización y mezcla con aguas químicamente no deseables retorno sucesivo de aguas de riego procedentes de aguas subterráneas, disminución del potencial hidráulico que puede provocar efectos de intrusión o circulación profunda por remoción de aguas fósiles o saladas.

La afección a la calidad de las aguas por la sequía, al contrario que ocurría con el nivel, es mayor en los acuíferos detríticos por la zonalidad vertical que presentan, fundamentalmente los costeros, que es donde más se ha estudiado este fenómeno. Es interesante ampliar el estudio de zonalidad vertical a otros acuíferos, por ejemplo Almonte-Marismas, donde se conoce la existencia de dicho fenómeno.

El uso de las aguas subterráneas se antoja fundamental para combatir la sequía y viene apoyado además por el avance en la técnica y la

aplicación del uso conjunto (asignatura pendiente en España). En general, este uso debe estar previamente planificado y contemplar también los aspectos relativos a la recarga, en especial a recargas adicionales con aguas excedentarias, bien naturales o bien depuradas. En definitiva, la aplicación de medidas para mitigar las sequías debe basarse en la aceptación y soportes públicos. Un sano manejo del recurso hídrico en condiciones de sequía, requiere obviamente las apropiadas condiciones técnicas y administrativas para manejar el recurso hídrico cuando no hay sequía. Si no hay una política clara para el manejo del recurso en condiciones normales, resultará difícil establecer las adecuadas políticas y estrategias para la gestión del recurso en época de sequía. (Yevjevich, V.; da Cunha, L.; Vlachos, E., 1983).

En el nuevo ordenamiento hidráulico español, a partir de la entrada en vigor del reciente Plan Hidrológico Nacional, se contempla, para la región de Andalucía y más concretamente para la cuenca hidrográfica del río Guadalquivir, que los déficits coyunturales que pueden darse en situaciones de sequía se atiendan preferentemente mediante el uso de las aguas subterráneas, si bien, no destina un programa de inversiones específico al estudio y conservación de los acuíferos o la implantación de la infraestructura necesaria para llegado el momento el uso extraordinario de las aguas subterráneas no perjudique al acuífero ni al entorno.

## 1.6. CONCLUSIONES

La mejora del conocimiento de los recursos naturales es el paso previo para su conservación. Con este lema de partida se ha planteado este proyecto que en cierto modo pretende profundizar en el conocimiento de las aguas subterráneas y su relación con los Espacios Naturales Protegidos, como una herramienta más para mejorar su conservación y en la medida de lo posible prevenir su deterioro.

Las diversas figuras de protección de los espacios naturales que recoge la legislación ambiental, se basan en diferentes parámetros, pero evidentemente el fundamental es el valor ambiental. En este sentido Andalucía ha seguido una política de preservación de su patrimonio ecológico que le ha llevado a estar a la cabeza de España en superficie protegida, lo que implica un gran compromiso para su conservación.

Las características climáticas de la región hacen que se deba prestar una atención especial al recurso hídrico, ya que la escasez e irregular distribución espacio-temporal de las precipitaciones generan una carencia histórica de agua y la llegada de periodos recurrentes de sequía.

El agua es un recurso natural indispensable para la vida y la actividad humana y para la pervivencia de los ecosistemas que conviven con el hombre. De este modo, entre los usos del recurso se cuenta el abastecimiento, que se emplea directamente para la vida del hombre y su actividad (p.e. industria), el riego, que va destinado a la actividad del hombre, el recreativo, el energético y finalmente el ecológico. Este último uso no ha sido considerado hasta hace poco tiempo, ya que no afectaba al hombre directamente, sino que al afectar a los ecosistemas que conviven con el hombre, indirectamente, este se está concienciando que también le afecta a él, bien mediante el aspecto paisajístico, bien

por el aspecto cultural de respeto a las especies bien por el aspecto sanitario o biosanitario como consecuencia de su desprecio y contaminación del componente ambiental de los usos del agua.

En este sentido, las zonas en las que el uso ambiental se hace más significativo son aquellas que gozan precisamente de algún grado de protección ambiental. En estas zonas, por la importante interrelación agua-espacio natural, debe considerarse al agua como uno de los principales elementos a proteger.

El gran número de ENP que existen en Andalucía implica una gran variedad y por ende diversidad de estados de relaciones agua-ENP. De hecho, esta variedad puede dar origen a criterios de clasificación de los ENP de Andalucía, como por ejemplo, los que se relacionan con cursos fluviales de agua (permanentes o no), o con lagunas o zonas de aguas estancadas o con marismas o zonas de aguas marinas, o aquellos con o sin humedales, dependientes o no del nivel freático, etc.

Por todo esto se ha decidido realizar el presente proyecto, que tiene un importante objetivo recopilatorio y aglutinador de la información que vincula a las aguas subterráneas y sus diferentes usos con los ENP.

De las 100 Unidades Hidrogeológicas que hay en Andalucía, 37 están vinculadas a algún Espacio Natural Protegido y de estas 33 se han contemplado en este estudio de forma detallada, es decir, el 37% del total de las U.H. y el 90% de la U.H. vinculadas a ENP.

De este estudio detallado se obtienen las siguientes conclusiones:

- De forma general, la información sobre características e infraestructura hidrogeológica es abundante y accesible, no así la información referente a los usos de las aguas subterráneas y a las afecciones de las sequías.

- La información existente en los ENP sobre el recurso agua y su relación con los ecosistemas es muy escasa y sólo en los humedales se ha avanzado algo en este campo.
- Las U.H. estudiadas pueden dividirse, a efectos de este proyecto, en dos grandes grupos, las que tienen zonas húmedas y las que no las tienen, o dicho de otra forma las U.H. de sierra y las costeras o de cuencas endorréicas.
- Las U.H. de sierra o sin humedales tienen características comunes como una pluviometría generalmente elevada (muy superior a la media de Andalucía), están formadas por macizos de materiales calcáreos, forman acuíferos generalmente kársticos y su funcionamiento principal es por fracturación, no disponen de red de control piezométrica puesto que la piezometría de estas unidades no suele ser un indicador fiable del funcionamiento o del estado de las mismas, suelen tener importantes descargas por manantiales, no están sometidas, por lo general, a un grado de explotación elevado, sino que por contra tienen una regulación mínima, la calidad de sus aguas es buena, el nivel freático está lo suficientemente profundo como para que no exista una relación directa entre este y la vida en la superficie, y el uso principal de sus aguas subterráneas es el ambiental y el abastecimiento, por lo que no hay sobreextracciones en las épocas de sequía que supongan un efecto añadido sobre estas unidades.
- Las U.H. costeras o de cuencas endorréicas, que tienen zonas húmedas, se encuentran en zonas de precipitación media-baja, están formadas por materiales detríticos y su funcionamiento principal es por porosidad, disponen de red de control de la piezometría, están próximas a zonas de gran explotación de las aguas subterráneas para regadío, tienen problemas puntuales de sobreexplotación y en algunas hay indicios focalizados de intrusión marina, tienen una gran dependencia del nivel freático bien por ser este el que mantiene encharcados los humedales directamente o bien indirectamente mediante drenaje difuso, el nivel piezométrico por tanto suele estar

próximo a la superficie, al menos en las proximidades de los humedales, y su importancia en el ecosistema es vital, el uso principal de las aguas subterráneas es el regadío, en franca competencia con el uso ecológico, tienen una gran vulnerabilidad y la calidad de sus aguas está amenazada cuando no afectada por la contaminación de origen agrícola y suelen sufrir descensos extraordinarios en épocas de sequía por el incremento de las extracciones para regadío.

- Existe un tercer grupo de U.H. con características similares a las del apartado anterior pero en las que el ENP no tiene una relación directa, a priori, con las aguas subterráneas y están constituidas por aquellas U.H. en las que el ENP vinculado a ellas es una marisma de influencia mareal. En este caso, las posiciones relativas del nivel freático no causan efecto sobre el ecosistema protegido ya que este depende exclusivamente de las aguas marinas.
- Desde el punto de vista de los ENP se plantea una división similar a las de las U.H., es decir, aquellos con zonas húmedas o sin ellas, correspondiéndose, generalmente, los primeros a zonas de sierra y los segundos a zonas costeras o cuencas endorréicas.
- Los ENP de sierra son mayoría en número y extensión y su relación con el recurso agua viene determinada principalmente por una alta pluviometría que aporta el agua necesaria para la mayor parte de los suelos del ENP y por un aporte de aguas subterráneas que mantiene los principales cauces durante gran parte del año y al que se asocian ecosistemas particulares como los bosques de rivera. La presencia de manantiales permanentes y cauces alimentados por ellos es una constante en estos ENP. Los ecosistemas típicos de esos ENP están adaptados a la climatología de la zona y el hecho de que los acuíferos que los sustentan no estén muy regulados y se encuentren en régimen casi natural, sin influencia de sobreextracciones en periodos de sequía, hace que la afección de esta sea pequeña, o dicho con otras palabras no se aprecie como un fenómeno antrópico sino natural. No significa que no se vean

afectados por las sequías, que si lo están, por ejemplo el debilitamiento de los individuos menos fuerte de cada especie vegetal provoca enfermedades y mortandades en los mismos, sino que este fenómeno se interpreta como natural y propio de la evolución de dichos ecosistemas. Así, la mayoría de los responsables de estos ENP consultados no consideran que las sequías tengan una afección especial en ellos.

- De forma específica se pueden comentar algunas afecciones particulares relacionadas con los periodos de sequía o escasas precipitaciones en los ENP vinculados a unidades hidrogeológicas de sierra, como la unidad 06.49 Guadarranque-Palmones en la zona que intersecta al Parque Natural de los Alcornocales, donde según fuentes de la dirección de dicho parque, en las zonas de vaguada próximas al mar, llamadas canutos, se dan fenómenos de especial importancia en las épocas de sequía por el incremento en número y cantidad de las extracciones, lo que provoca la desaparición de los drenajes a estas zonas con la consiguiente afección a la flora y fauna. También en la unidad 05.45 Sierra Morena, en su intersección con el Parque Natural de la Sierra Norte de Sevilla, se aprecia un incremento progresivo de captaciones en las proximidades de los cauces que conlleva una desecación extraordinaria en periodos de sequía y el consiguiente daño ecológico a los bosques de rivera y fauna asociados.
- De los ENP costeros o de cuencas endorréicas nos referiremos principalmente a aquellos con zonas húmedas que dependan de las aguas subterráneas. En estos casos, la relación de los ecosistemas con el recurso agua viene determinada por las aportaciones de las aguas subterráneas que mantienen el carácter húmedo de los mismos durante la mayor parte del año, siendo importantes también las precipitaciones por su efecto de llenado de las primeras lluvias tras la época seca y en momentos puntuales del invierno y la primavera. La situación del nivel freático suele ser directa con el mantenimiento de condiciones de humedad.

- En algunas unidades detríticas costeras, de forma específica, también se han obtenido consideraciones sobre afecciones particulares. Así, en los humedales de la costa de Huelva, los expertos en su conservación consideran que dichos ecosistemas se encuentran adaptados a los periodos de sequía estacionales e hiperanuales, y el hecho de la desaparición temporal de especies vegetales y su paso, por algún tiempo, al banco de semillas, es considerado como un fenómeno natural del que el ecosistema se recupera al cabo del tiempo. No obstante, las acciones antrópicas pueden modificar esa condición alargando artificialmente los periodos de sequía, al continuarse con las extracciones o simplemente creándolos de modo artificial en periodos de precipitaciones medias pero que no satisfacen la demanda generada. También, en el Parque Nacional y Parque Natural de Doñana, se llevan a cabo estudios específicos sobre la afección de la sequía a los ecosistemas y se observan fenómenos como la desaparición de zonas húmedas por el descenso del nivel piezométrico como consecuencia de la plantación de especies freatofitas, la colonización por especies de "monte blanco" de zonas que tradicionalmente eran ocupadas por "monte negro" debido a un descenso del nivel freático en un periodo de sequía o la variación de hábitos de algunos insectos cuyos nidos se situaban en determinadas posiciones relativas al nivel freático. Además, existen otros fenómenos causados por la sobreexplotación local del acuífero, que se ven acentuados en los periodos de sequía, como la desecación del contacto de las arenas con la marisma al noreste de El Rocio, el movimiento de masas de aguas saladas congénitas o la seca de algunos individuos de especies arbustivas. En esta unidad en particular, se lleva a cabo una gestión conjunta de las aguas superficiales y subterráneas para su uso ambiental, existiendo captaciones de aguas subterráneas usadas expresamente para alimentar zonas húmedas en épocas críticas (Laguna del Acebuche, Lucio del Lobo o Lucio de Mari López).

- De la observación de la información de cada unidad se desprende que las unidades detríticas, que se controlan habitualmente mediante la red piezométrica, disponen de mas información y por tanto de un mejor control que las unidades kársticas. Esto se debe fundamentalmente a que operativamente es más fácil la toma de medidas de piezometría que de hidrometría.
- También se concluye que hay una serie de unidades, vinculadas a ENP de especial importancia, a las que se realiza un control más exhaustivo, como son el caso de la unidad 05.51 Almonte-Marismas y el Parque Nacional de Doñana y la unidad 06.34 Fuente de Piedra y la Reserva Natural de la Laguna de Fuente de Piedra. En ambos casos existen series datos suficientemente largas y con una ubicación específica para realizar estudios de detalle sobre la interacción de las aguas subterráneas y los ENP de las mismas.
- Dentro de este proyecto y de forma específica se ha experimentado con técnicas de teledetección en la Reserva Biológica de Doñana (C.S.I.C.), para la determinación, seguimiento y control de indicadores de la sequía en las zonas húmedas. Dicha experiencia ha partido de una serie de imágenes LANDSAT cedidas por la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y otras propias del IGME, que abarcan las lagunas peridunares de la Reserva Biológica y el borde de la marisma correspondiente a dicha zona. Así mismo, se ha contado con la participación de un vuelo del INTA con un nuevo sensor aerotransportado Daedalus-1268, con una resolución de 3 m, para la correcta correlación de las señales de las imágenes LANDSAT.

La interpretación del tratamiento de las citadas imágenes, después de las oportunas correcciones radiométricas, georreferenciación y testificación en campo, se aporta en un anexo sobre Teledetección.

Una conclusión preliminar de ese trabajo es la alta capacidad de utilización de esta técnica como herramienta para medir superficies cubiertas de agua, húmedas, con diferentes tipo de vegetación e incluso con un mismo tipo de vegetación pero con diferente estado

vegetativo, en distintas épocas, lo que permite, haciendo la interpretación de imágenes que incluyan periodos de sequía y periodos húmedos, buscar una relación de los comportamientos en superficie según la posición relativa del nivel freático.

Esta fase de correlación, por no disponer el IGME de series suficientemente largas de información piezométrica en la zona de estudio, así como por no estar puesta a punto totalmente la técnica citada, será uno de los objetivos a acometer en un futuro inmediato.

- De forma conjunta con la memoria del presente proyecto se entregan una base de datos que contiene, de modo estructurado para su incorporación al SINAMBA, la información de las fichas individuales de cada unidad y los archivos correspondientes a los datos y gráficas de evolución de los parámetros medidos en las mismas y archivos de texto individualizados con explicaciones de dichas gráficas, así como los textos explicativos de las afecciones a los ENP. También se entrega un CD con un SIG en ArcView, que contiene la información relativa a los ENP y las aguas subterráneas en Andalucía recogida en este proyecto.

## 1.7 RECOMENDACIONES Y PROPUESTAS

Como finalización de este proyecto, se proponen una serie de recomendaciones, nacidas de la experiencia en hidrogeología que posee este Instituto, así como de la multitud de nuevas ideas que se han puesto de manifiesto al asociar a lo largo de este trabajo las aguas subterráneas en Andalucía con los Espacios Naturales Protegidos.

Estas recomendaciones y propuestas pretenden ser un apoyo para la planificación de la gestión de los recursos naturales en los ENP o lo que es lo mismo, la planificación de la gestión de los ENP.

- Debemos comenzar reconociendo que los ecosistemas responden de forma natural ante fenómenos naturales, ya que su funcionamiento y composición en un momento dado, viene determinado por una selección natural. No tiene sentido actuar contra fenómenos naturales y mantener la calidad del medio ambiente de un modo artificial, sino que por contra, se debe actuar para corregir, mitigar o suprimir los efectos de las sequías sobre los ENP cuando el origen de estas se deba en una parte importante a la acción antrópica.
- Debe tomarse conciencia de la importancia del agua como un recurso natural de primera importancia en la conservación de los ENP, por lo que se propone la realización de estudios básicos en cada ENP para la definición de la relación entre estos y el agua. Dichos estudios deben definir la cantidad y calidad de este recurso que se considere óptima y mínima para un adecuado funcionamiento de los ecosistemas, el origen de las aguas y los sistemas de control existentes o potenciales que puede haber sobre ellas. De modo particular se recomienda definir para cada ENP un protocolo de seguimiento de las aguas vinculadas a él, en el que se propongan los métodos de control, el tipo de puntos de control, su ubicación, las instalaciones necesarias y los programas de toma de datos y gestión de los mismos.

- De forma particular y a título experimental se recomienda seleccionar una serie de unidades y ENP para investigar la aplicación de los mencionados protocolos así como continuar la aplicación de la técnica implementada de teledetección para el seguimiento de la afección de los periodos de sequía a los mismos.
- Se propone también la continuación de la alimentación de la base de datos creadas con los datos de las redes existentes de forma transitoria, en tanto no se creen los nuevos sistemas de control de las aguas en los ENP.
- Se recomienda también, la realización de trabajos concretos de investigación sobre la influencia de las extracciones para regadíos en las unidades más afectadas por esta actividad, así como el seguimiento de la contaminación potencial de origen agrícola a las aguas subterráneas y los humedales de estas unidades (especial atención debe prestarse a los Parajes Naturales costeros de las provincias de Almería, Cádiz y Huelva que poseen humedales y pueden verse afectados por estas actividades).
- Finalmente, se propone complementar el SIG creado en el ámbito de este proyecto, con nuevas coberturas que puedan incluir, por ejemplo, imágenes de los ENP y de los puntos de control seleccionados en el proyecto o de los que se seleccionen o creen en el futuro de un modo específico para este fin. También puede vincularse de forma interactiva el SIG y la base de datos creada, pudiendo disponerse en cada unidad hidrogeológica o ENP, de los datos referentes a sus características, usos y afecciones, de modo que este sea una herramienta de consulta eficaz para la planificación y toma de decisiones en materia de conservación de los ENP.

Sevilla, 21 de diciembre de 2.001

## 1.8. BIBLIOGRAFÍA

- Navarro Alvargonzález, Agustín (1.990) "Cambios en la calidad y en la cantidad de las aguas subterráneas por efecto de las sequías". En Jornadas sobre las Sequías en España. Real Academia de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, noviembre de 1.990. Pag 79-104.
- Catalá de Alemany, Joaquín (1.990): "Introducción". En Jornadas sobre las Sequías en España. Real Academia de las Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid, noviembre de 1.990. Pág. 1-11.
- López Geta et al (1.997). "Atlas hidrogeológico de Andalucía". IGME-JUNTA DE ANDALUCÍA.
- Del Valle, M., Machuca, L. Et al (1988). "Atla hidrogeológico de la Provincia de Málaga". Servicio de Arquitectura, Urbanismo y Ordenación del Territorio de la Diputación Provincial de Málaga.
- Sánchez, A. Et al (1998). "Las Unidades Hidrogeológicas de las Sierras de Líbar (00.06) y Grazalema (05.64)". Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Ministerio de Medio Ambiente.
- Navarro, R., Martín, M., Batlle, A. et al. (1985). "Atlas Hidrogeológico de la Provincia de Cádiz". Diputación de Cádiz.
- Varios (1999). "Inventario y Caracterización de los Regadíos de Andalucía". CD elaborado por la Dirección General de Investigación y Formación Agraria. Consejería de Agricultura y Pesca.

## ANEXOS

## 2.1. FICHAS INDIVIDUALES

A modo de anexos se entregan a continuación las fichas individuales de cada unidad en las que se contempla, en una primera parte la información recopilada en la encuesta de cada U.H. y ENP vinculado, incluyendo características, usos y afecciones de las aguas subterráneas. Se acompaña también una serie de anexos con las evoluciones gráficas de los indicadores seleccionados en cada unidad, pluviometría, piezometría e hidrometría y un mapa de situación de la unidad y los ENP en su entorno geográfico.

## 2.2. TELEDETECCIÓN

### **CONTRIBUCIÓN AL ESTUDIO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA ALMONTE-MARISMAS 0.5-51 MEDIANTE EL ANÁLISIS DE IMÁGENES MULTIESPECTRALES**

**Servicio de Teledetección**

## 1. INTRODUCCIÓN

La multitemporalidad en el registro de la información que proporcionan los satélites de recursos naturales es una característica singular que hace de estos datos una herramienta muy útil en el estudio y cartografía de las variaciones temporales de los cuerpos de agua a lo largo de una secuencia prolongada de condiciones hidrológicas. La utilización de imágenes multispectrales para la cartografía de cuerpos de agua es un método que se ha utilizado ampliamente en estudios de control de zonas inundadas (Baumann, 1999; Frazier, 2000) y en inventarios de zonas húmedas.

En este estudio se trata de evaluar la utilidad de las imágenes de satélite para la cartografía y seguimiento de las fluctuaciones de las lagunas peridunares y de la evolución temporal de los humedales del ecotono o área de contacto dunas-marisma durante el período 1988-2001 en el Parque Nacional de Doñana y su entorno. Este trabajo, realizado por el Servicio de Teledetección del IGME, se enmarca en el contexto del "Estudio del Impacto de la Sequía en los Acuíferos de Andalucía" que está llevando a cabo el IGME en el acuífero Almonte-Marismas, como acuífero del territorio de Andalucía, vinculado a espacios naturales protegidos.

En la primera fase del trabajo que aquí se presenta, se ha realizado la corrección geométrica y radiométrica de la serie temporal de imágenes disponible, creándose una base de datos que además de las imágenes incluye la información planimétrica e hidrográfica DGN 1:25000 del Instituto Geográfico Nacional. Asimismo se ha realizado el tratamiento e interpretación de las imágenes correspondientes al año 2001, adquiridas por el IGME.

## 2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es la evaluación de distintas técnicas de tratamiento digital de imágenes de satélite y de sensores aeroportados con el fin de establecer las más adecuadas para la cartografía de las lagunas peridunares permanentes y semipermanentes del sector de Santa Olalla, así como de las zonas de encharcamiento y zonas húmedas del contacto entre las arenas y la marisma (ecotono) y de sus variaciones durante el período 1988-2001.

Las marismas de Doñana representan uno de los enclaves húmedos con mayor valor ecológico de Europa. Sin embargo, los cambios acaecidos en el último siglo debidos a la transformación de ciertos sectores de la marisma, a las extracciones de aguas subterráneas para riego de uso agrícola así como el desarrollo de áreas de presión urbana muy próximas a estas zonas húmedas, plantean una problemática que está siendo objeto de diversos estudios y proyectos de investigación para perfeccionar el conocimiento del acuífero en estas zonas, de su funcionamiento y de la explotación real que se está haciendo del mismo. En el ámbito de este estudio, y en la búsqueda de indicadores que relacionen las manifestaciones de sequía en las zonas húmedas del acuífero Almonte-Marismas con la evolución de los niveles freáticos, las precipitaciones y los usos de las aguas subterráneas, se aborda la interpretación de imágenes de satélite y sensores aeroportados para la cartografía y seguimiento de la evolución de lagunas peridunares, de las zonas inundadas temporales en los suelos arenosos y de las zonas húmedas del ecotono presentes en este sector.

### 3. LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona seleccionada para evaluar la utilidad de estos métodos de teledetección se centra en el sector de Santa Olalla que comprende el conjunto de lagunas permanentes y semipermanentes, y temporales estacionales que se localizan en el margen nororiental del cordón de dunas móviles dentro de la Reserva Biológica de Doñana, así como las zonas de encharcamiento temporales estacionales que se disponen en paleodepresiones eólicas al norte de este sistema lagunar (figura 1).

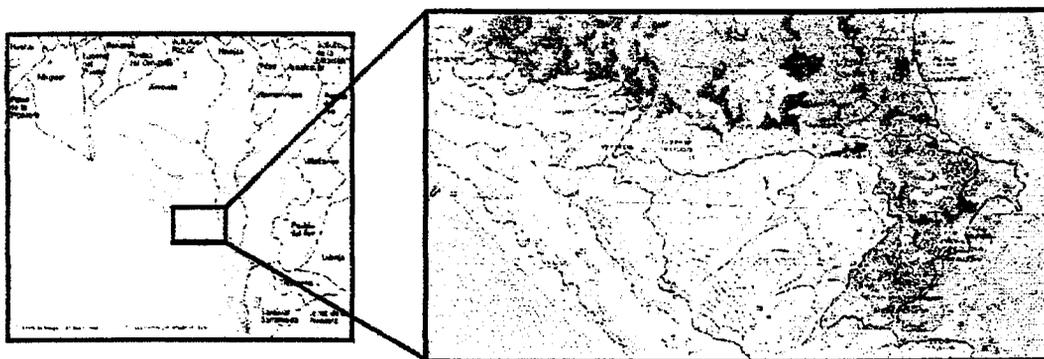


Figura 1. Situación del sistema lagunar de Santa Olalla  
(del Mapa Ecológico de Doñana, CMA, Junta Andalucía, 1998)

Asimismo se pretende evaluar la potencialidad de estas imágenes para la cartografía y detección de cambios de las distintas comunidades de vegetación higrófila que aparecen relacionadas con las lagunas y zonas húmedas, y que dependen tanto del régimen de lluvias como con las fluctuaciones del nivel freático del acuífero. Los estudios realizados en Doñana muestran que la profundidad del nivel freático y sus fluctuaciones es un factor condicionante en la distribución de los distintos tipos de vegetación higrófila (Zunzunegui et al., 1998).

Con la utilización de imágenes de satélite registradas durante el periodo 1988-2001 se pretende estudiar de forma sistemática las fluctuaciones de las lagunas y de las zonas de encharcamiento en los distintos periodos secos y húmedos que se han sucedido en este espacio de tiempo, así como la posible detección de los cambios producidos en la vegetación.

### 4. DATOS DISPONIBLES

#### ➤ Imágenes de satélite.

Se han utilizado imágenes que abarcan el periodo comprendido entre 1988 y 2001, en parte cedidas por la Conserjería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (\*), y que se detallan a continuación:

Satélite	Fecha de registro
LANDSAT 7	Enero 2001
	Febrero 2000
LANDSAT 5 *	Julio 1996
	Septiembre 1995
	Agosto 1990
	Febrero 1990
	Septiembre 1988
IRS *	Junio 1998

➤ **Base digital**

Se ha utilizado la planimetría e hidrografía de la DGN 1: 25.000 del Instituto Geográfico Nacional correspondiente a las hojas: 982, 983, 984, 999, 1000, 1001, 1002, 1017, 1018, 1019, 1033, 1034, 1047

➤ **Imágenes registradas por sistemas aeroportados:**

• **AMDC (Airborne Multispectral Digital Camera)**

Imágenes registradas por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) el 27 de abril de 2001. La resolución espacial es de 1 m, el recubrimiento de cada escena es de 2024 x 2041 m, y su resolución espectral cubre el rango entre 420 y 772 nm en cinco bandas.

• **ATM (Airborne Thematic Mapper)**

Imágenes registradas por el INTA el 4 de Octubre de 2001, con una resolución espacial de 3 m y un rango espectral de 420 a 1300 nm en 11 bandas.

## 5. CORRECCIONES GEOMÉTRICAS Y RADIOMÉTRICAS DE LAS IMÁGENES

En una primera etapa se ha realizado los siguientes procesos:

• **Correcciones geométricas:**

La corrección de las imágenes Landsat se ha realizado con respecto a la información planimétrica a escala 1:25.000 (IGN) y las imágenes IRS disponibles, previamente corregidas por la Junta de Andalucía. Se ha realizado la corrección de escenas completas, tomándose del orden de 80 puntos de control repartidos de forma uniforme en cada escena, efectuándose la transformación por el método de convolución cúbica con un polinomio de 2º grado, obteniéndose un error medio cuadrático del orden de un píxel (15 m). Las imágenes AMDC y ATM han sido corregidas del mismo modo (Figura 2).

• **Homogeneización radiométrica:**

En el análisis multitemporal hay que comparar imágenes registradas en fechas diferentes en las que varían las condiciones atmosféricas y de iluminación, lo que origina que para un mismo tipo de cubierta varíe el nivel digital (ND) de los píxeles correspondientes por lo que deben homogeneizarse dichos valores. El método



utilizado se ha basado en hacer una corrección relativa de los niveles digitales entre imágenes de distintas fechas. En primer lugar se elige la imagen de referencia, es decir, aquella de la serie temporal que tenga una mayor nitidez atmosférica. Para obtener píxeles de radiancia más o menos constante entre fechas y evitar una posible variación en la cobertura de los mismos, se eligen aquellos que estén situados en áreas de baja reflectividad (carreteras, cuerpos de agua,...) y los que se localizan en áreas de alta reflectividad (suelos abiertos, dunas,...).

De los niveles digitales de estos píxeles se estiman, para cada banda, unos coeficientes de sesgo y ganancia, que permiten corresponder los niveles digitales entre imágenes registradas en fechas distintas.:

$$ND_{c,k} = S_k ND_k + g_k$$

$$S_k = (ND_{cl,r,k} - ND_{os,r,k}) / (ND_{cl,c,k} - ND_{os,c,k})$$

$$g_k = (ND_{os,r,k} ND_{cl,c,k} - ND_{os,c,k} ND_{cl,r,k}) / (ND_{cl,c,k} - ND_{os,r,k})$$

$ND_{c,k}$  = Nivel digital corregido en la banda k

$ND_{os,r,k}$  = ND medio de los píxeles oscuros de la imag. de refer. en la banda k

$ND_{cl,r,k}$  = ND medio de los píxeles claros de la imag. de refer. en la banda k

$ND_{os,c,k}$  = ND corregido de los píxeles oscuros en la banda k

$ND_{cl,c,k}$  = ND corregido de los píxeles claros

Una vez realizadas las correcciones anteriores sobre las escenas completas, se han seleccionado las subescenas correspondientes al área de estudio en el sector de las lagunas peridunares de Santa Olalla, desde la Veta del Puntal, en el borde de la marisma, la laguna del Brezo, cerca del límite occidental del Parque Nacional.

## 6. TRATAMIENTO E INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES REGISTRADAS EN 2001

En una segunda fase del trabajo, se ha realizado el tratamiento digital e interpretación de las imágenes disponibles registradas durante el año 2001. Se ha trabajado con una imagen Landsat 7 ETM+ registrada el 20 de Enero de 2001, en la época más reciente de máxima extensión de la marisma y de los cuerpos de agua lagunares.

A lo largo del año 2001, el LABTEL Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) han registrado imágenes digitales aeroportadas con una cámara digital (AMDC), en Abril, y con el sistema multispectral ATM, en Octubre. El tratamiento e interpretación de estos datos así como los trabajos de campo han sido fundamentales para verificar los resultados obtenidos en el tratamiento de la imagen Landsat.

El método utilizado para la cartografía de los cuerpos de agua y de las zonas encharcadas se basa en el comportamiento espectral que presenta el agua en las distintas regiones del espectro electromagnético. El agua refleja la radiación en longitudes de onda cortas, dando el máximo en el azul, mientras que en el infrarrojo cercano y medio absorbe completamente la radiación por lo que estas bandas son las más adecuadas para delimitar de forma precisa el contacto agua-tierra. Por el contrario, las bandas del visible dan información sobre contenido de materiales en suspensión.



Figura 2. Serie temporal de imágenes a las que se han efectuado correcciones geométricas y radiométricas

### ♦ Imagen Landsat ETM+ (20/01/01)

En este estudio, se ha utilizado una imagen registrada por el nuevo sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) del satélite Landsat 7. Este sensor es más avanzado que los anteriores sensores ATM de la serie Landsat, registrando la radiación electromagnética en 6 bandas espectrales en el rango del visible e infrarrojo próximo, con una resolución espacial de 30 m, una banda en el infrarrojo térmico de 60 de resolución espacial y una banda adicional pancromática en el visible, con 15 m de resolución (Figura 3).

Banda	Rango espectral ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial (m)
1	0,450+0,515	30
2	0,525+0,605	30
3	0,630+0,690	30
4	0,750+0,900	30
5	1,550+1,750	30
6	10,40+12,50	60
7	2,090+2,350	30
PAN	0,520+0,900	15

Figura 3. Características de los datos registrados por el sensor ETM+

Las bandas espectrales registradas en el infrarrojo próximo proporcionan una información precisa sobre los cuerpos de agua debido a la total absorción de la radiación que este material origina en estas longitudes de onda.

En primer lugar, se han analizado las bandas individuales y las combinaciones de bandas que mejor discriminan el contacto de los cuerpos de agua. Una vez realizados los contrastes más adecuados, se ha llevado a cabo la fotointerpretación de los bordes obteniéndose una capa/vector correspondiente a los cuerpos de agua (mapa 1).

Posteriormente se ha realizado una segmentación de bandas. Este método simple se ha utilizado con el fin de evaluar la precisión de una técnica digital sencilla sobre una banda individual para delimitar la extensión de los cuerpos de agua. Se ha seleccionado como zona test el área de la lineación de las lagunas permanentes y temporales de Santa Olalla. Se ha analizado la estadística de los valores correspondientes a los cuerpos de agua con el fin de determinar que bandas o banda discriminan mejor el contacto suelo/vegetación-agua, comprobándose que el agua muestra variaciones considerables 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 (figura 4).

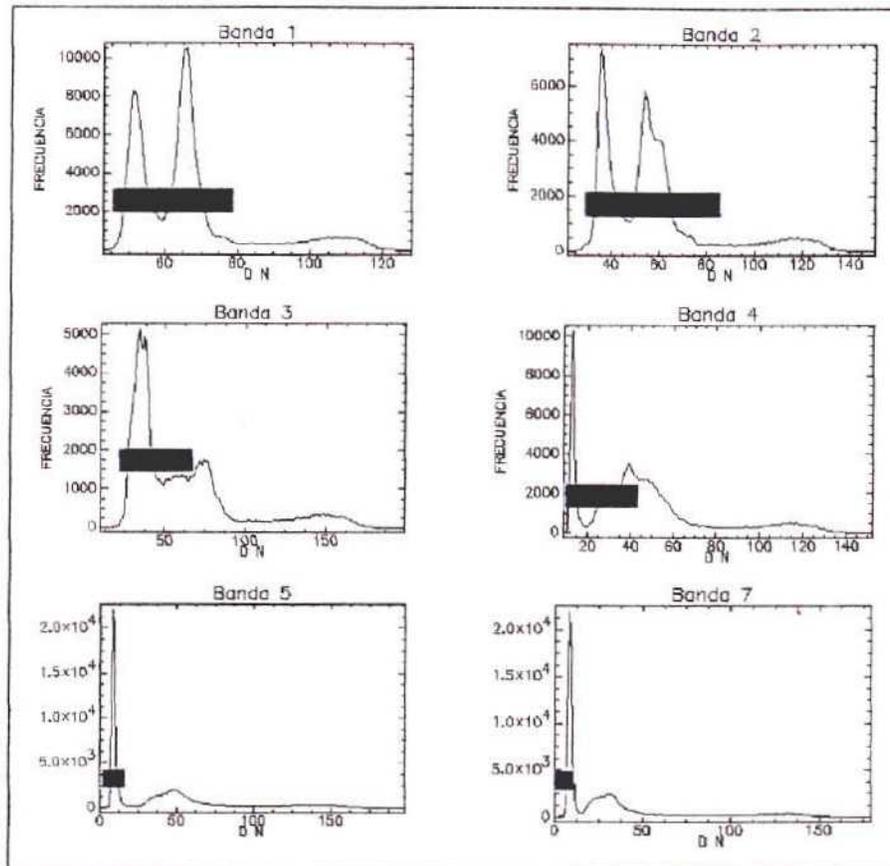


Figura 4. Histogramas de bandas individuales con indicación del rango de valores de los píxeles correspondientes a agua

La banda 5 es la que ofrece una mejor representación de los píxeles correspondientes a agua, no mezclándose con otro tipo de cubiertas. Sobre esta banda se ha seleccionado el rango de valores mínimo y máximo correspondiente al agua (DN 0-23), que se ha utilizado para generar una imagen preliminar de los cuerpos de agua netos: mar, marisma y lagunas y charcas con suficiente entidad espacial (figura 5). El análisis detallado de la imagen resultante muestra una excelente correspondencia con la cartografía de las lagunas.

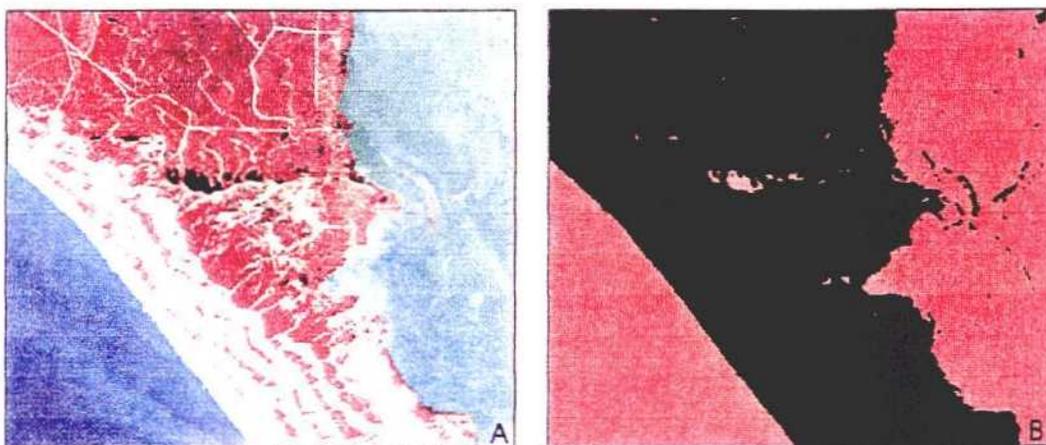


Figura 5. Imagen Landsat ETM+ (20/01/01). A: falso color TM431. B: segmentación banda 5

Otro método utilizado para extraer información selectiva de las imágenes es la clasificación supervisada de máxima probabilidad. Este procedimiento permite extraer la información contenida en todas las bandas del visible e infrarrojo cercano. La

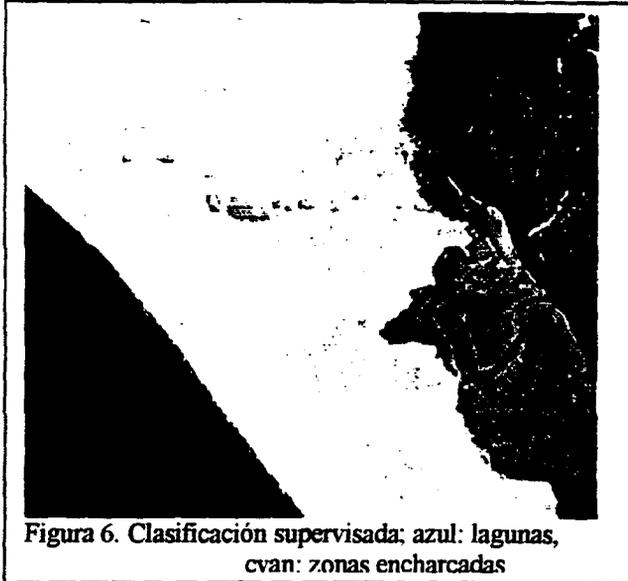


Figura 6. Clasificación supervisada: azul: lagunas,  
cyan: zonas encharcadas

clasificación supervisada presupone un conocimiento previo del área seleccionada, que debe ser suficientemente representativa de las diferentes categorías que se quieren establecer en la clasificación de la imagen. A partir de la interpretación de la fotografía digital y de los datos obtenidos del trabajo de campo, se ha establecido una primera categoría representativa de los cuerpos netos de agua y una segunda clase que representa píxeles localizados en zonas de borde y zonas encharcadas. Los píxeles correspondientes al agua del mar y a la de la marisma

también muestran una buena separabilidad aunque no se han tenido en cuenta en el resultado de la clasificación, que se muestra en la figura 6 y mapa 2. Estos resultados muestran que la clasificación supervisada de máxima probabilidad permite no solo la cartografía de las lagunas sino también la de las zonas encharcadas .

#### ♦ Imagen AMDC

La cámara AMDC es un sensor que proporciona imágenes digitales bidimensionales multiespectrales en el rango entre 400 y 800 nm. Las imágenes han sido registradas el 27 de abril de 2001 por el Laboratorio de Teledetección del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) durante una campaña de prueba de este sensor. La resolución espacial es de 1 m y el recubrimiento de cada escena es de 2024 x 2041 m.

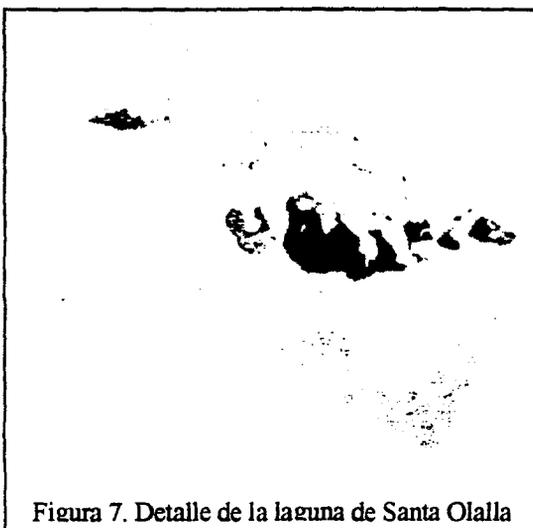


Figura 7. Detalle de la laguna de Santa Olalla

Estos datos se han utilizado como apoyo al trabajo de campo realizado en la fecha del registro de las imágenes. Por tratarse de un vuelo experimental para evaluar esta nueva cámara, no ha sido posible disponer de las cuatro bandas espectrales en que registra este sensor. Solo ha podido utilizarse la banda del infrarrojo cercano (738-772 nm), que por su excelente resolución espacial ha resultado muy adecuada para identificar de forma precisa los bordes de las lagunas, las zonas encharcadas y ciertos rasgos de la cubierta vegetal, aportando una información muy valiosa para clasificar la imagen Landsat. Se ha realizado la cartografía de las lagunas en esta fecha (figura 7 y mapa 3).

#### ♦ Imagen Daedalus ATM

Las imágenes registradas el 4 de Octubre de 2001, con el instrumento Daedalus-1268 (sensor multiespectral con 11 bandas entre 0.42 y 13  $\mu\text{m}$ ) tienen una resolución espacial de 3 m. Estas imágenes se han registrado durante la campaña para el seguimiento de la limpieza del valle del Guadiamar y han sido cedidas por el INTA. Simultáneamente, se ha registrado fotografía aérea convencional como apoyo a los trabajos de campo y a la corrección geométrica de las imágenes.

La línea volada cubre un sector de aproximadamente 10 km de largo por 1,5 km de ancho, desde el borde de la marisma, entre La Veta del Puntal y La Algaidilla, al este, hasta la laguna del Zahillo en el extremo noroccidental. Una vez realizadas las correcciones geométricas y radiométricas, se ha procedido en primer lugar a la vectorización del borde de las lagunas y de las charcas con suficiente entidad (figura 8 y mapa 4).

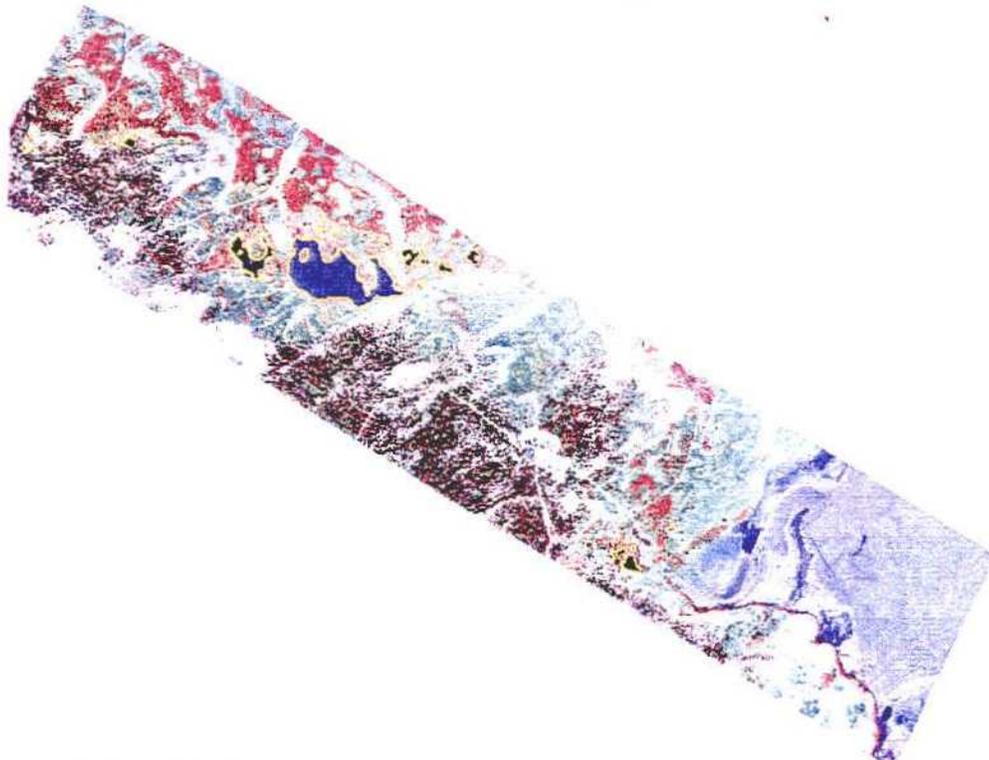


Figura 8. Imagen ATM 791 de la línea registrada el 04/10/ 2001 con cartografía de lagunas

En la sistemática utilizada para realizar la clasificación de la imagen, se ha utilizado como referencia el Mapa Ecológico de Doñana (op. cit.). Se ha tomado como referencia algunas de las unidades del Manto Eólico Húmedo de Dunas Fitoestables (cotos) y del Contacto Marisma/Eólico-Costero (Vera-Retuerta), estableciéndose “a priori” varias categorías, todas ellas relacionadas con los cuerpos de agua y las unidades vegetales asociadas a una mayor humedad en el suelo, tales como “pastizales perennes/juncales”, “carrizales” y “zonas encharcadas” que puedan ser indicativas de las fluctuaciones del nivel freático del acuífero, particularmente durante el estiaje. Para la verificación de los datos obtenidos en la clasificación digital preliminar se ha realizado trabajo de campo

en una fecha posterior a la de registro de la imagen. El trabajo de campo se ha basado en la observación 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 y en la zona de contacto de la marisma (figura 9). Esta zona es la franja correspondiente a la transición o "ecotono" entre la marisma y la zona arenosa, y representa la región de mayor productividad y fertilidad de Doñana. En ella conviven especies vegetales tanto de la

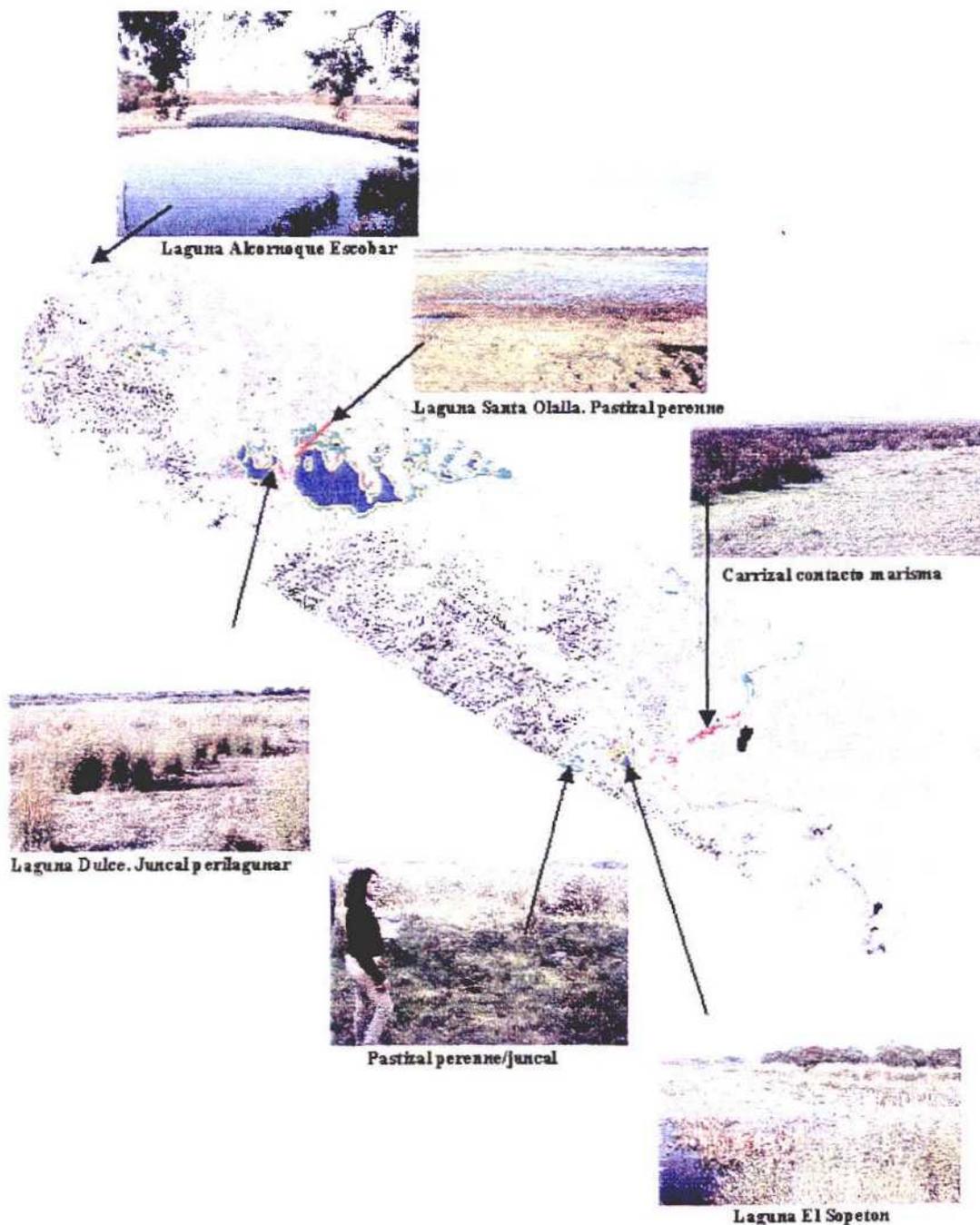


Figura 9. Clasificación digital de la imagen ATM sobre banda 8 (BN) con indicación de las clases consideradas en la clasificación: pastizales/juncal y carrizal



marisma como de las arenas. El afloramiento de la humedad filtrada por las arenas permite el desarrollo de juncales (*Juncus sp*), carrizales (*Phragmites australis*), pastizales perennes y especies higrófilas como lentisco (*Pistacea lentiscus L.*), zarzas (*Rubus sp.*) y brezos (*Erica sp.*).

En la zona correspondiente a las lagunas peridunares se observa como la distribución de las especies está en gran medida relacionada con la profundidad del nivel freático. La gradación de especies desde el borde de la laguna hacia el interior es la siguiente:

- Junto al borde se desarrollan pastos perennes (*Agrostis stolonifera L.*, *Holoschoenus vulgaris* Link., *Mentha pulegium L.*) y junqueras perilagunares (figura 9). Las especies pascícolas (foto del pasto de Santa Olalla) se desarrollan en las zonas encharcadas, y el carrizal y los juncos (*Phragmites australis*, *Juncus sp*) bordeando este pasto, en donde el encharcamiento es menor. El pasto perenne y las junqueras perilagunares se caracterizan por tener humedad durante todo el año (encharcamiento en la época invernal y afloramiento de humedad el resto del año).
- A medida que nos alejamos del borde, hacia zonas en las que se produce un ligero descenso del nivel freático, se localizan especies higrófitas como son los brezos (*Erica scoparia L.*, *Erica ciliaris L.*), la brechina (*Calluna vulgaris L.*) Hull., tojos (*Ulex minor* Roth.), cistáceas higrófilas como *Cistus salvifolius L.*
- En las zonas más secas aparecen especies xerófitas, que requieren un menor aporte de agua (el nivel freático ha descendido aproximadamente de 0.5 – 1 m) como es el caso de *Halimium halimifolium L.* (jaguarzo), *Rosmarinus officinalis L.* (romero), *Lavandula stoechas L. ssp. pedunculata* (Miller) Sap. & Rocier. (cantueso),...

Una vez realizadas las comprobaciones de campo, se ha ajustado la clasificación de la imagen ATM (mapa 5), estableciéndose que el pastizal permanente/juncal y el carrizal se clasifican con un porcentaje de acierto del 99%. En el caso de los cuerpos de agua y de los bordes encharcados se produce cierto grado de confusión con las sombras de los árboles, que muestran valores muy bajos en todas las bandas. Este problema se ha solventado realizando una máscara de la sombra de los árboles de gran tamaño, que se identifican bien en la composición en color (figura 8).

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La cartografía de las lagunas peridunares realizada a partir de imágenes registradas en distintas fechas a lo largo del año 2001 muestra las fluctuaciones de los niveles en este periodo, tal y como aparece en el mapa 6. La información que proporciona la imagen Landsat registrada el 20 de enero de 2001, no solo permite cartografiar los cuerpos de agua con precisión suficiente sino que además posibilita la discriminación de áreas encharcadas.

En el mapa mencionado se pone de manifiesto el elevado nivel de la mayor parte de las lagunas y de la gran extensión de zonas encharcadas, como corresponde a un comienzo lluvioso de este ciclo hidrológico. Sin embargo, en esta situación cabe mencionar el estado de desecación del Charco del Toro y de las charcas aledañas, situadas en el extremo occidental del cordón peridunar y próximas a Matalascañas.

La imagen AMDC registrada el 27 de abril muestra el descenso de niveles iniciado durante la primavera y se hace más patente en la imagen ATM registrada el 4 de octubre. En esta última fecha se ha podido cartografiar no solo el nivel de las lagunas sino también los pastizales, juncales y carrizales.

## 8. PERSPECTIVAS

La primera fase de este trabajo muestra que el tratamiento e interpretación de imágenes multiespectrales de resolución espacial moderada (imágenes Landsat) permite discriminar de manera precisa los contactos de los cuerpos de agua de las lagunas peridunares y de las zonas húmedas de Doñana.

El tratamiento digital e interpretación de la serie de imágenes Landsat disponible desde 1988 va a permitir establecer la cartografía de las fluctuaciones de las lagunas peridunares y de las zonas de encharcamiento así como la detección de cambios en la vegetación higrófila a lo largo de los últimos ciclos hidrológicos. Se pretende con ello aportar nuevos datos objetivos en el estudio de las manifestaciones de sequía en las zonas húmedas de Doñana.

## 9. AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Laboratorio de Teledetección del INTA la cesión de las imágenes AMDC y ATM, y a la Conserjería de Medio ambiente de la Junta de Andalucía las copias de parte de las imágenes Landsat e IRS.

## 10. REFERENCIAS

- Baumann, P., (1999). Flood analysis,  
*http: www.reseach.umbc.edu/~tbenja1/baumann/mod2.html.*
- Cuevas Gonzalo, J.M., (1998). Diversidad espacial de los usos del suelo en el Parque Nacional de Doñana. V Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, pp.591-600.
- Frazier, P.S., Page, K. J. (2000). Water body detection and delineation with Landsat TM data. Photogrammetric Eng. & Rem. Sensing, 66, 12 pp. 1461-1467.
- Montes, C. Borja, F., Bravo, M.A., y Moreira J.M., (1998). Reconocimiento biofísico de espacios naturales de Andalucía. Mapa Ecológico de Doñana). Conserjería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- 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, pp.151-160.

### 2.3 BASE DE DATOS

Se adjunta una base de datos en ACCESS cuya estructura se definió previamente de forma conjunta entre la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y el IGME, y que contiene de forma estructurada la información básica de las fichas individuales de cada unidad hidrogeológica. Esta base de datos, se acompaña con una serie de ficheros de texto y gráficos, que corresponden a determinados campos (tablas y gráficas de pluviometría, piezometría e hidrometría, archivos de texto con el comentario de las evoluciones de los indicadores y archivos de texto con las explicaciones sobre la afección de la sequía a cada ENP).

La base de datos se denomina **BASE DE DATOS SOBRE AGUAS SUBTERRÁNEAS Y ENP EN ANDALUCÍA**, y se incluye en el CD que se acompaña a la documentación de este proyecto.

#### 2.4 SISTEMA DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Se adjunta un SIG en ArcView con las coberturas referentes a las aguas subterráneas en Andalucía y su relación con los Espacios Naturales Protegidos. Contiene coberturas con las poligonales de cada U.H., los puntos de control de los parámetros seleccionados como indicadores, los Espacios Naturales Protegidos, los municipios, viario y red hidrográfica.

La información referida a cada unidad, en las distintas coberturas, se ha seleccionado de un modo independiente, de modo que permita activar a las unidades elegidas.

El SIG se entrega en un CD que se adjunta a la documentación de este proyecto.