



Las aguas subterráneas en Doñana: Aspectos ecológicos y sociales



Marisol Manzano
Carlos Montes
Emilio Custodio

Las aguas subterráneas en Doñana:
Aspectos ecológicos y sociales

EDICIÓN

Consejera de Medio Ambiente:

Cinta Castillo Jiménez.

Viceconsejero:

Juan Jesús Jiménez Martín.

Director Gerente de la Agencia Andaluza del Agua:

Juan Paniagua Díaz.

Directora General de Planificación y Participación:

Isabel Comas Rengifo.

Dirección facultativa:

José María Fernández-Palacios Carmona.

AUTORÍA

Coordinador:

Emilio Custodio.

Autores:

Emilio Custodio, UPC, FCIHS, Acad. Ciencias.

Marisol Manzano, UPCT.

Carlos Montes, UAM.

Colaboración:

Carlos Mediavilla, IGME.

Coordinación editorial:

Margarita Martínez Acevedo, Sacramento Usero Piernas.

Diseño gráfico y portada:

Antonio Flores, Curro Cassillas.

Fotografía:

Emilio Custodio. Marisol Manzano. Grupo FLUMEN-Dept. Ing.

Hidráulica/UPC. Archivo Consejería de Medio Ambiente

Junta de Andalucía: Javier Molina, Miguel A. Cano, Antonio Camoyán.

Héctor Garrido/CSIC. Javier Hernández Gallardo.

José María Pérez de Ayala.

Gráficos e ilustraciones:

Francisco Alcalá, Elena Custodio, Ignacio Palomo, Antonio Flores,

Curro Cassillas.

Fotomecánica e impresión:

Servigraf. Artes Gráficas

© de la presente edición:

Agencia Andaluza del Agua

(Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía)

© de los textos:

Los autores

Nº de Registro:

ISBN: 978-84-92807-19-2

Depósito Legal: SE-5981-2009

Las aguas subterráneas en Doñana: Aspectos ecológicos y sociales

Emilio Custodio, Marisol Manzano, Carlos Montes



Agencia Andaluza del Agua
CONSEJERÍA DE MEDIO AMBIENTE



Al hablar de Doñana estamos hablando del agua, el agua en su sentido más amplio. Las aguas que vemos, las superficiales, aquellas que discurren por arroyos, inundan las marismas y lagunas; y también las que no vemos, las subterráneas, con las que están íntimamente ligadas. Ambas forman parte del ciclo hidrológico si bien las aguas subterráneas constituyen el lado oculto de éste al circular invisibles bajo nuestros pies. Pero esto no significa que tengan menor valor sino todo lo contrario. Las aguas subterráneas en Doñana juegan un papel esencial para la vegetación y la fauna residente y conforma un variado paisaje que pasa de matorral a bosque denso, y de dunas a depresiones húmedas. La visión que tenemos de este territorio sería muy diferente sin la participación de estas aguas vivas ocultas que tan importantes manifestaciones tiene en el entramado de relaciones ecológicas y socioeconómicas de Doñana.

Los estudios hidrogeológicos en el Área de Doñana tienen una gran tradición. Tras más de 40 años de investigación es, probablemente, una de las zonas mejor conocidas de España desde el punto de vista de las aguas subterráneas. La obra, *Las aguas subterráneas en Doñana: Aspectos ecológicos y sociales* es la primera síntesis hidrogeológica de la zona. Dada la complejidad de esta ciencia y el gran interés general que despierta el agua en Doñana, se echaba en falta una publicación divulgativa que, sin prescindir del rigor necesario, posibilite la comprensión de la materia a un público más amplio que el especializado. Este hueco lo ocupa la presente obra. Porque el agua en Doñana no es sólo un recurso natural sino también un recurso socioeconómico y, por ello, la conservación de la Naturaleza no se puede separar de la dimensión humana.

Para concluir hay que decir que el agua sigue estando en el origen de todas las cosas, y también en Doñana, en su doble acepción ecológico natural y humana. De la integración armoniosa de ambas dimensiones dependerá nuestro futuro pues no hay sistema socioeconómico sostenible si se vulneran los principios ecológicos.

Cinta Castillo Jiménez
Consejera de Medio Ambiente

Índice

Abreviaturas y siglas	9	formaciones palustres de los mantos eólicos	87
		Redes de observación de las aguas subterráneas	89
Presentación	10	Medida de la recarga al acuífero	99
		Conclusiones	100
Capítulo I. Introducción	14		
Capítulo II. Características biofísicas y socio-económicas del Área de Doñana		Capítulo V. Influencia climática en la hidrología de Doñana	
El sistema socioecológico de Doñana	23	Introducción	103
El Gran Ecosistema Fluvio-litoral de Doñana como base biofísica del sistema socioecológico de Doñana	27	Temperatura	104
El contexto geológico regional como base del sistema acuífero de Doñana	31	Precipitaciones	106
Caracterización territorial y socioeconómica general del sistema socioecológico de Doñana	39	Evapotranspiración	109
		Insolación y vientos	113
		Características climáticas generales	113
		Conclusiones	115
Capítulo III. Los sistemas hídricos de Doñana y su sistema acuífero		Capítulo VI. Demanda de agua en Doñana y su evolución	
El ciclo del agua en el Área de Doñana	45	Conceptos básicos	117
El sistema acuífero de Doñana: aspectos hidrogeológicos	55	Consideraciones sobre el consumo de agua en el Área de Doñana en función del uso del territorio	118
El acuífero y el entorno de Doñana	63	Demanda de agua agrícola para regadío	120
Las manifestaciones del agua subterránea en el Área de Doñana	64	Demanda de agua para abastecimiento	127
Formaciones edáficas que tienen un papel relevante en el funcionamiento del acuífero	67	Demanda de agua para la vegetación y las formaciones palustres	129
Hidrosistemas de referencia	69	Utilización de fertilizantes	130
Conocimiento hídrico de Doñana	73	Conclusiones	131
		Capítulo VII. Funcionamiento hídrico del Área de Doñana en estado natural y balance del sistema acuífero	
Capítulo IV. Redes de observación hidrológica en el Área de Doñana y su zona de influencia		Evolución del conocimiento	133
Consideraciones generales	79	Aporte atmosférico de agua y sales al sistema hídrico	135
Redes hidrometeorológicas y de calidad atmosférica	81	Aspectos generales del funcionamiento de las aguas superficiales en la red fluvial	137
Red foronómica y de calidad del agua superficial	84	Consideraciones sobre el funcionamiento hidráulico de las marismas del Guadalquivir	138
Red de observación de aguas en marisma y			

Humedales diversos	140	La gestión hídrica en la Ley de Aguas	205
Recarga y descarga del sistema acuífero	144	La Directiva Marco del Agua	207
Recarga a los acuíferos del Área de Doñana	152	Condicionantes administrativos de la gestión hídrica	209
Balance hídrico de las aguas subterráneas	155	Necesidades de gestión de las aguas subterráneas y del agua en general en Doñana	210
Calidad natural de las aguas en el Área de Doñana	159	Conclusiones	212
Capítulo VIII. El ciclo perturbado del agua y del agua subterránea en Doñana		Capítulo XI. Instituciones, participación y corresponsabilidad para la gestión del agua en el Área de Doñana	
Introducción	165	Conceptos básicos para un cambio de paradigma, con aplicación a la gestión del agua en Doñana	215
Aportaciones atmosféricas	165	Instituciones con competencia o interés en el agua en el Área de Doñana	217
Aguas superficiales en cauces	166	Conclusiones	220
La marisma	169	Capítulo XII. Visión prospectiva del ciclo hídrico y de las aguas subterráneas en Doñana	
Modificaciones en las aguas subterráneas	170	Consideraciones generales	223
Los humedales	177	Consideraciones sobre el efecto del cambio global y climático pasado y futuro en la hidrología de Doñana	224
Balance hídrico modificado	178	Consideraciones sobre la sustentabilidad de la conservación y del desarrollo social en Doñana en relación con los recursos hídricos subterráneos	230
Calidad del agua subterránea en el contexto de la Directiva Marco del Agua	184	Conclusiones	233
Capítulo IX. Impacto de las extracciones de agua subterránea en el funcionamiento hidrológico de los humedales del Área de Doñana	187	Referencias	234
Capítulo X. Gestión de las aguas en el Área de Doñana		Glosario	240
Conceptos generales	197		
Un importante punto de arranque: el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana	199		
Aspectos de la gestión de las aguas superficiales fluyentes a Doñana	201		
Aspectos de la gestión de las aguas superficiales de la marisma y de los complejos palustres de los mantos eólicos	203		
Aspectos de la gestión de las aguas subterráneas	204		
Consideraciones sobre las redes de observación de interés para la gestión hídrica	205		

Abreviaturas y siglas

AAA. Agencia Andaluza del Agua.
AAM. Acuífero Almonte–Marismas.
CAP. Consejería de Agricultura y Pesca, JA.
CE. Conductividad eléctrica.
CEDEX. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.
CGS. Compañía General de Sondeos.
CHGN. Confederación Hidrográfica del Guadiana.
CHG. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.
CICYT. Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología.
CIED. Comisión Internacional de Expertos de Doñana.
CMA. Consejería de Medio Ambiente, JA.
CoCo. Comité Conjunto Hispano–Norteamericano.
CSIC. Consejo Superior de Investigaciones Científicas.
DAS. Directiva del Agua Subterránea (Europa).
DMA. Directiva Marco del Agua (Europa).
DITCG. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, UPC.
EBD. Estación Biológica de Doñana.
ETP. Evapotranspiración potencial.
ETR. Evapotranspiración real.
FAO. Food and Agriculture Organization.
FCIHS. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea.
FD21. Fundación Doñana 21.
GED. Gran ecosistema de Doñana.
IAA. Instituto Andaluz del Agua.
IARA. Instituto Andaluz de Reforma Agraria.
IGME. Instituto Geológico y Minero de España.
INC. Instituto Nacional de Colonización.
INM. Instituto Nacional de Meteorología.
INTA. Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
IRYDA. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario.
ITGE. Instituto Tecnológico y Geominero de España (hoy IGME).
JA. Junta de Andalucía.
MIMAN. Ministerio de Medio Ambiente.

MOPU. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo.
P. Precipitación
PAH. Plan Andaluz de Humedales.
PAM. Plan Almonte–Marismas, PTAAM.
POTC. Plan de Desarrollo Territorial Comarcal.
PDSO. Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana.
PNED. Parque Natural del Entorno de Doñana.
PNatD. Parque Natural de Doñana, PNED.
PND. Parque Nacional de Doñana.
PORN. Plan de Ordenación de los Recursos.
POTAD. Plan de Ordenación Territorial del Área de Doñana.
PRUG. Plan de Uso y Gestión.
PTAAM. Plan de Transformación Agraria Almonte–Marismas, PAM.
RBP. Reserva Biológica de Doñana, EBD.
SED. Socio–ecosistema de Doñana.
SGOP. Servicio Geológico de Obras Públicas.
UAM. Universidad Autónoma de Madrid.
UCM. Universidad Complutense de Madrid.
UPC. Universidad Politécnica de Cataluña.
UPCT. Universidad Politécnica de Cartagena.
WWF. World Wild Fund – Adena.

En esta relación no se incluyen las abreviaturas que aparecen sólo en un lugar concreto y se definen allí mismo.

Créditos de las fotografías

CMA, JA. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
EC. Emilio Custodio. UPC.
FLUMEN-UPC. Grupo FLUMEN. UPC.
HG/CSIC. Héctor Garrido/CSIC.
JMPA. José M^a Pérez de Ayala.
MM. Marisol Manzano. UPCT.
JHG. Javier Hernández Gallardo. EGMASA.

Presentación

Las aguas subterráneas en el Área de Doñana son una parte esencial del ciclo hidrológico y un recurso básico para atender a las necesidades y actividades relacionadas con el bienestar humano. Estas aguas subterráneas no se comenzaron a estudiar y desarrollar hasta la década de 1970, cuando se puso en marcha un importante plan de regadíos en sus arenas y aparecieron los primeros conflictos con la conservación de su singular y afamada Naturaleza, en especial de sus especies de aves y mamíferos más emblemáticas. La importancia de sus sistemas naturales se manifiesta en la gran extensión de áreas con mayor o menor grado de protección, su relevancia como reserva natural de Europa, su gran valor paisajístico y su biodiversidad. También va unido a la necesidad del desarrollo humano de esa extensa zona tradicionalmente deprimida bajo el punto de vista económico, y a la presión para asentar establecimientos turísticos. Todo ello ha atraído recursos de estudio ante la conciencia cada vez más generalizada de que se requiere una gestión integral para salvaguardar el gran valor ecológico de la zona y cubrir las necesidades humanas, pasando de una competencia depredadora a una sinergia y a una necesaria complementariedad. Esta es una tarea difícil, socialmente compleja, para la que se tiene poca experiencia, y en la que las aguas subterráneas juegan un papel clave. En un área de pluviometría moderada y muy variable, con acusadas estaciones secas y años de escasa lluvia, el acuífero supone un gran volante regulador que hace que las fluctuaciones a corto plazo pasen desapercibidas cuando en otras áreas próximas dependientes de las aguas superficiales se producen situaciones difíciles. Sin embargo en una visión a medio y largo plazo, o sea de lustros a varias décadas, es necesario que las interacciones entre el sistema hídrico, socioeconómico y ecológico sean sustentables.

Todo eso requiere conocimiento e información científica y técnica robusta e interdisciplinar con un detalle adecuado. Aquí se tratan los aspectos relativos a las aguas subterráneas, elemento clave, poco visible para el profano y poco conocido, así como su relación con las aguas superficiales. Este es el objeto de este libro.

En el año 2005 la Fundación Doñana 21, que había sido creada en 1997 como un nuevo modelo de agencia comarcal para llevar a cabo estudios y proyectos derivados de las recomendaciones del Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana, encargó una serie de estudios para crear la línea base de información necesaria para la elaboración del segundo Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana. Entre los estudios solicitados se encontraba una recopilación y análisis sobre el estado del conocimiento hidrológico de la Comarca de Doñana, que finalizó en 2006. Dicho documento está asequible en Internet (http://pds.donana.es/documentos_publicos.php) pero no se ha editado en papel, y por eso la Agencia Andaluza del Agua, de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, decidió promover este libro que utiliza información de dicho informe, aunque sensiblemente modificada, actualizada y puesta de forma asequible a no especialistas. El equipo redactor ha consistido en:

Dr. Emilio Custodio, Catedrático de Hidrología Subterránea, Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica (DITCG), de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, miembro correspondiente de la Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, miembro del equipo que preparó el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana, y director de un conjunto de estudios en el área desde 1980 como UPC o a través de la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea (FCIHS), Barcelona.

Dr. Carlos Montes del Olmo, Catedrático de Ecología del Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid (UAM), Presidente de la Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez para los espacios naturales, que ha realizado numerosos estudios limnológicos y socio-ecológicos en Doñana.

Dra. Marisol Manzano, Profesora Titular de Hidrogeología del Departamento de Ingeniería Minera, Geológica y Cartográfica de la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), Cartagena, que anteriormente formó parte del DICTG de la UPC, Barcelona, y que ha realizado numerosos estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos en Doñana, y que ha colaborado en el Proyecto Doñana 2005.

Adicionalmente se ha contado con la colaboración de *D. Carlos Mediavilla*, Hidrogeólogo de la Oficina de Proyectos en Sevilla del Instituto Geológico y Minero de España (IGME), con gran y larga experiencia en Doñana.

En el informe de la Fundación Doñana 21 antes referido la aportación del *Dr. Josep Dolz*, catedrático del Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental de la UPC, y colaborador del Proyecto Doñana 2005, ha sido muy importante y se ha utilizado abundantemente en este libro.

Este libro es el resultado de aportaciones y de revisiones de los autores, que han tratado de dar una visión lo más independiente posible, exponiendo las cosas tal como las aprecian en conciencia, y por eso se comentan también las deficiencias existentes y como se debería abordar su resolución. Sin embargo los autores son conscientes de las limitaciones de su tarea y de que pueda haber errores o malinterpretaciones, que se ha procurado que sean las menos posibles. Por lo tanto algunos aspectos contenidos en esta publicación pueden ser discutibles, no del todo exactos o algo desfasados, en especial por la gran dinámica socio-política del área. No se pretende la exactitud de una cifra concreta o de un valor local, pero sí la mayor veracidad del conjunto. La complejidad de Doñana no ha permitido una total actualización de los datos de base, lo que hubiese requerido un muy alto esfuerzo adicional de estudio, recopilación e inventario, que quedaban fuera de las posibilidades reales, más aún cuando las instituciones públicas con responsabilidades tampoco tienen ni actualizada ni del todo contrastada parte de esa información.

Cada capítulo ha sido redactado por uno o dos de los autores, y revisado y retocado por los otros, con la revisión final del coordinador. Así hay una implicación de todos ellos en el contenido.

Se agradece la colaboración y buena disposición de las instituciones para este trabajo, o en los que se basa, en especial de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía, de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, de la Agencia Andaluza del Agua, del Instituto Geológico y Minero de España (en especial de su oficina de proyectos en Sevilla), y de la Fundación Doñana 21, así como el acceso a los datos de otros grupos de las Universidades Politécnica de Cataluña, Politécnica de Cartagena y Autónoma de Madrid, así como el aporte de informaciones por parte de la Universidad de Huelva. En su inicio el *Dr. Manuel Ramón Llamas*, del Departamento de Geodinámica Externa de la Universidad Complutense de Madrid, anteriormente en la Universidad Autónoma de Madrid, impulsó los primeros trabajos hidrogeológicos de carácter científico, en parte en base a la gran labor previa asociada al Proyecto Guadalquivir y al Proyecto de Regadío Almonte–Marismas, y luego los puso a disposición de los que luego han seguido los estudios, animándoles en todo momento a seguir adelante.

A nivel local son muy numerosas las ayudas y colaboraciones recibidas, entre ellas de forma destacada las de los responsables y personal vinculado a la Estación Biológica de Doñana y al Espacio Natural de Doñana. Muchos son los nombres de personas a mencionar, pero cabe destacar el del *Dr. Javier Castroviejo*, que como director de la Estación Biológica de Doñana en su momento, animó y apoyó el inicio de los trabajos hidrogeológicos.

A título personal se agradece el apoyo del *Dr. Hermelindo Castro*, Profesor de la Universidad de Almería, y Director General del Instituto del Agua en el momento del inicio del libro, y de *D. José María Fernández-Palacios* Director Facultativo responsable de la edición. También se agradece el apoyo y comentarios de *D. Javier Serrano*, ex Comisario de Aguas del Guadalquivir y en la actualidad Director General de Dominio Público Hidráulico de la Agencia Andaluza del Agua, y de su equipo, y de *D. Mariano Palancar*, ingeniero de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. El *Dr. Francisco Borja*, de la Universidad de Huelva, y *Miguel Angel Bravo*, de la EBD, revisaron y aportaron datos para algunos de los capítulos.

La tarea ofimática la ha realizado *D. Jordi Sánchez Vila* y las de producción adicional de figuras *Dña. Elena Custodio* y *D. Ignacio Palomo*. El *Dr. Francisco Javier Alcalá* ha preparado a partir de bases de datos parte de la documentación gráfica, a las que hay que añadir las contribuciones de los equipos de apoyo a los autores. La empresa que ha realizado la publicación ha realizado una excelente tarea editorial y ha aportado una gran experiencia para la mejora y adecuación de la parte gráfica.

Emilio Custodio

Capítulo I



Área costera desde Torre de la Higuera hacia el oeste. Formaciones arenosas fluviomarinas con recubrimiento eólico estabilizado y el acantilado de erosión marina de El Asperillo—El Arenosillo. La superficie es una zona importante de recarga al acuífero. El acantilado y la playa son lugares de descargas difusas y concentradas.

Foto: JHG.

Introducción

La palabra Doñana evoca una imagen de Naturaleza razonablemente bien conservada, un gran espacio natural con una rica y variada diversidad de especies y paisajes, un paraíso para naturalistas y en especial un laboratorio para científicos de la Naturaleza. Además, algunos de sus ecosistemas mantienen especies emblemáticas, como el lince o el águila imperial, que tienen en un elevado riesgo de extinción, y otros tienen la amenaza de especies invasoras importadas. Pero Doñana es mucho más que eso, ya que la presencia humana más antigua conocida en el área tiene más de 5000 años, siendo la etapa Tartésica, en la primera mitad del primer milenio antes de Cristo, una de las de mayor desarrollo humano y económico, que se menciona en la Biblia. Hoy día existe una importante población humana que desarrolla actividades agrícolas, ganaderas y de turismo en el entorno del espacio natural protegido. Además, es un lugar de asueto de las grandes poblaciones vecinas, en especial de Sevilla, a lo que hay que añadir el Santuario de la Virgen del Rocío, destino de una multitu-

dinaria romería relacionada con la piadosa devoción mariana popular.

Los ecosistemas y la biodiversidad del Área de Doñana generan un importante flujo de servicios que contribuyen al bienestar de sus habitantes, aún no bien reconocido. Sufre el efecto pernicioso de visiones parciales y a corto plazo, a menudo depredadoras por parte de pobladores y gestores, cuando lo que se requiere es una visión amplia y a largo plazo, que busque la sustentabilidad socioecológica de este territorio tan singular, todo ello teniendo en cuenta la evolución humana y natural. Esto poco a poco va calando en pobladores, visitantes y autoridades con responsabilidad en la gestión de ese territorio, aunque hay que insistir en ello para que el daño no avance más y para que no sea cada vez más problemática la restauración.

Doñana ha sido tradicionalmente un territorio hostil al ser humano a causa de las extensas áreas inundables y palúdicas, y a lo inadecuado de sus terrenos arenosos para el cultivo. Por eso una buena parte del territorio se ha conservado frente

a la intrusión humana masiva desde hace pocas décadas, en que se ha introducido de forma intensiva y extensiva la tecnología moderna. Ésta es muy agresiva para la conservación de sus sistemas naturales si se la utiliza inadecuadamente y sin tener en cuenta el conocimiento científico de los procesos físicos y biológicos que determinan la estructura, funcionamiento y dinámica de sus ecosistemas acuáticos y terrestres. Así, se han creado extensos arrozales en lo que antes era marisma, campos de cultivo sobre arenas, asentamiento de poblaciones en áreas antes inhóspitas y atracción de turismo y estancias de fin de semana a playas antes de difícil acceso. De aquí la oportunidad de las medidas legales de protección y de los esfuerzos para que los habitantes locales y los visitantes tomen conciencia del enorme valor asociado a la Naturaleza de Doñana, así como de la necesidad de gestionar sustentablemente el aprovechamiento de los servicios que generan sus ecosistemas. Eso supone pasar de una actitud competidora a otra de complementariedad.

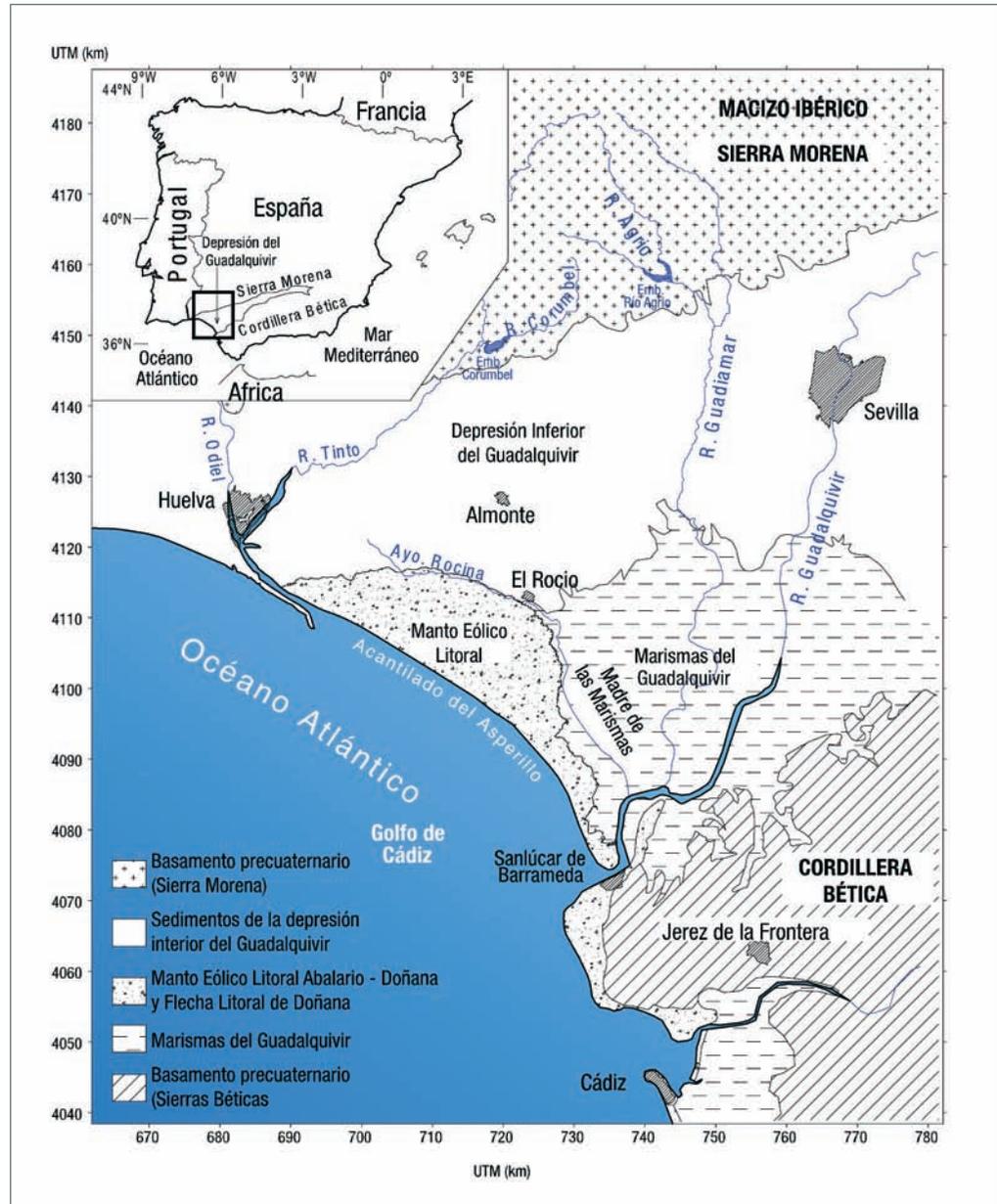
Muchos son los aspectos a considerar para entender Doñana: ecológicos, sociales, agrícolas, turísticos, culturales e incluso religiosos, y en todos ellos el agua aparece como un componente esencial. Las aguas superficiales son las más espectaculares y visibles para el profano, que fácilmente aprecia su magnitud e inmensidad en la marisma inundada en invierno y en su ausencia en verano, y tienen un papel clave en muchos de los valores ecológicos de Doñana. En cambio, las aguas subterráneas no son evidentes al profano pero son la esencia de la arquitectura de muchos de sus paisajes ya que condicionan numerosos aspectos de la vegetación de freatofitas, la existencia de lagunas, los aportes hídricos dulces y

de buena calidad a la marisma y el mantenimiento de hábitats húmedos todo el año. Además, son la única fuente de recursos de agua dulce en casi toda el Área de Doñana, un amplio espacio ubicado entre dos ríos, el Guadalquivir y el Tinto, pero aislada de los mismos.

Como las aguas subterráneas son un recurso esencial en el Área de Doñana, no visible pero parte integral del ciclo del agua, este libro se centra en las mismas, aunque considerando los aspectos de aguas superficiales que no pueden desligarse o que influyen sobre las aguas subterráneas. Así, se considera aquí su gran papel socioecológico y las complejidades asociadas a la gestión de las aguas subterráneas. Los aspectos relacionados con las aguas de la marisma tienen también una importancia capital, pero su papel socioecológico es distinto y requieren un tratamiento diferente, por lo que no son objeto de esta publicación.

En este libro se empieza presentando, en el *Capítulo 2*, las características biofísicas, socioeconómicas y de conservación del Área de Doñana, para luego pasar a presentar y documentar, en el *Capítulo 3*, los sistemas hídricos, con énfasis en las aguas subterráneas pero considerando también los sistemas superficiales relacionados. El conocimiento del medio se ha de fundamentar en observaciones lo más precisas y completas posibles, adecuadas a la problemática en cuestión, aspecto que se recoge en el *Capítulo 4*. Doñana es el resultado integrado de una naturaleza física (geología y geomorfología) descritas en los *Capítulos 2 y 3*, de unas condiciones climáticas que se exponen en el *Capítulo 5* y de una utilización y demanda de los recursos hídricos por el ser humano que se trata en el *Capítulo 6*.

Figura 1.1. Situación general de la Depresión Inferior del Guadalquivir, entre la Cordillera Bética y al Macizo Ibérico (Sierra Morena). Dentro de la Depresión del Guadalquivir destacan las arenas del manto eólico costero y las marismas del Guadalquivir.



La parte central del libro se dedica al funcionamiento del sistema acuifero, presentándose en el *Capítulo 7* lo que se conoce acerca de su funcionamiento en estado natural y después, en el *Capítulo*

lo 8, el funcionamiento actual, que es el resultado de acciones antrópicas, analizándose brevemente en el *Capítulo 9* el impacto ecológico de las extracciones de agua subterránea y de su utilización.

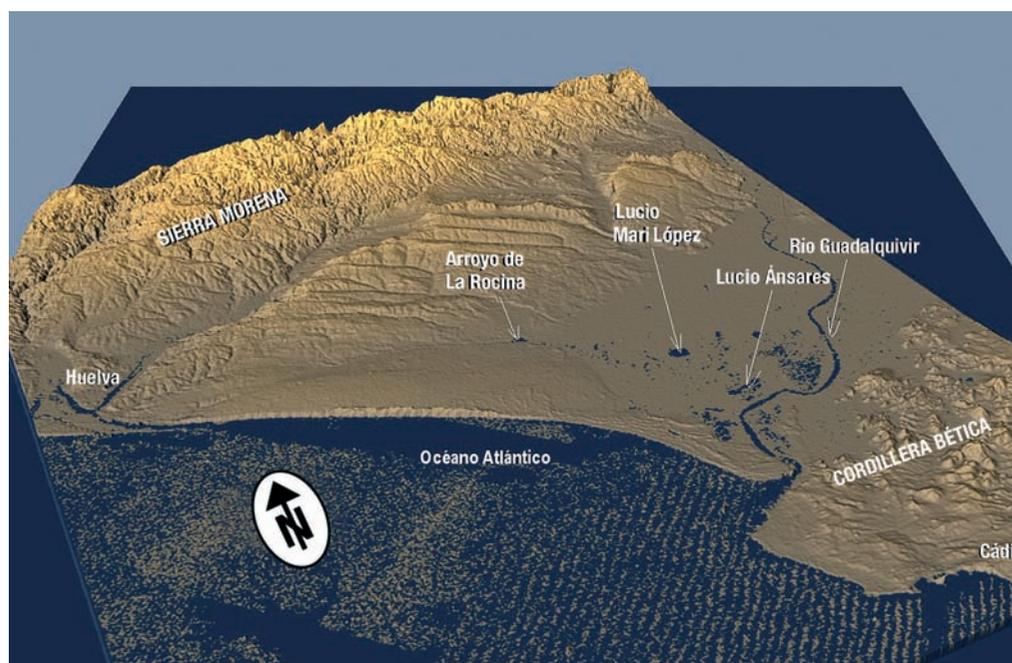


Figura 1.2. Perspectiva del Área de Doñana y sus proximidades según un modelo digital del terreno en el que se aprecia el encuadre entre Sierra Morena (Macizo Ibérico) (límite superior) y las estribaciones de las Cordilleras Béticas (lado derecho), con las formaciones sedimentarias al pie y la gran llanura del Valle del Guadalquivir, que se extiende hasta Huelva. Imagen cortesía de Ibáñez (2008).

La conservación y explotación sustentable de los recursos naturales de Doñana, y en concreto de las aguas subterráneas, requieren al mismo tiempo una gestión pública y corresponsabilidad de los habitantes del lugar, tema al que se dedica el *Capítulo 10*. Esto se debe realizar a través de instituciones apropiadas, tal como se expone en el *Capítulo 11*, para poder llegar a la visión prospectiva que se presenta en el *Capítulo 12*.

Este libro no busca ni intenta ser una recopilación de datos y estadísticas. Estas hay que buscarlas en otros trabajos, buena parte de los cuáles se relacionan en las referencias y en el *Apéndice Bibliográfico*. Pretende presentar una visión del agua subterránea en Doñana y de su relación con las aguas superficiales lo más acertada y fundamentada posible, pero también asequible al no especialista, que seguramente será el principal lector y el que con un interés general deseará cono-

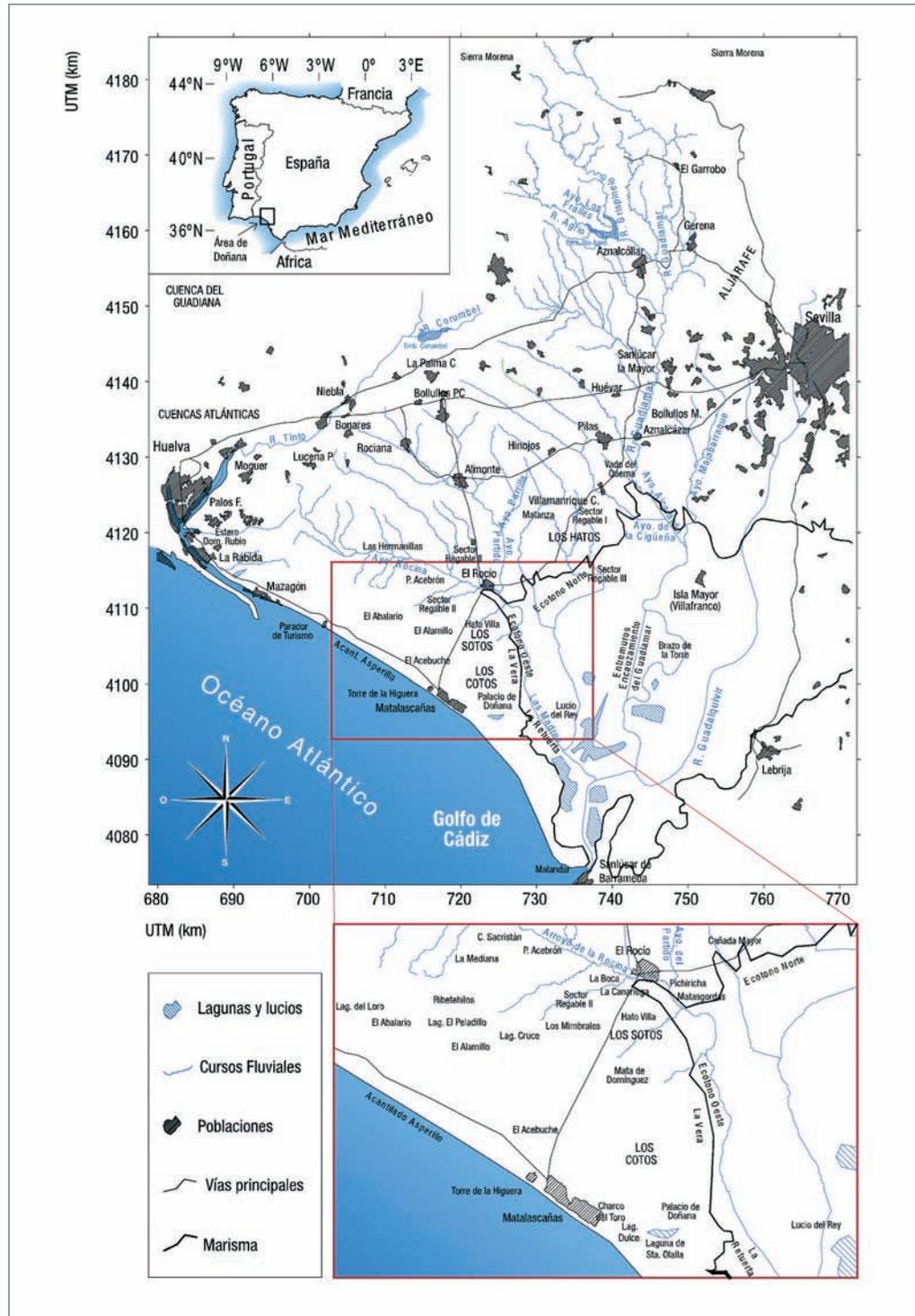
cer, con el adecuado detalle, los aspectos científicos y técnicos del agua subterránea, su socioecología y su gestión en el Área de Doñana. Para facilitar la lectura a los no especialistas, al final del libro se adjunta un *Glosario*, principalmente de términos hidrológicos e hidrogeológicos. Para introducir aspectos que no siempre son del dominio común, en varios de los Capítulos se incluyen cuadros sobre aspectos conceptuales.

Doñana se sitúa en el ámbito final de la depresión del Guadalquivir, entre Sierra Morena y la Cordillera Bética (*Figura 1.1*), como se muestra en perspectiva en la *Figura 1.2*

Es difícil definir un ámbito territorial que represente a Doñana, ya que hay que aunar criterios ecológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, administrativos y sociales, cada uno con sus condicionantes y apreciación de lo que es el área periférica de influencia. Inicialmente la designación Doñana

Figura 1.3.

Área de Doñana y su entorno con indicación de la mayor parte de las localidades geográficas que se mencionan en este libro. La figura al pie es un detalle del área El Abalarío-La Vera, a la que se hace frecuente referencia.





Vista de la marisma de Doñana en época de inundación.

Foto: CMA. JA.

se limitaba al Coto de Doñana, hoy en buena parte dentro del espacio de la Estación Biológica de Doñana, conociéndose las otras áreas del territorio con sus designaciones propias tales como marismas del Guadalquivir, arenas de Los Cotos, Los Sotos, arenas de El Abalarío, entorno de El Rocío, Los Hatos, etc. Al acuífero se le denominó Acuífero Almonte–Marismas (acuífero 27 del IGME), aunque hoy es más conocido como Acuífero de Doñana, que es la designación aquí adoptada.

Poco a poco la designación Doñana ha ido tomando cuerpo y se aplica no sólo a su territorio original sino a todo un entorno entre los tramos inferiores de los ríos Tinto y Guadalquivir, y entre la costa y una línea interior poco definida, que deja dentro las formaciones arenosas, que en muchos casos, por facilidad de definición, se extiende hasta la actual autovía Sevilla–Huelva. En este libro se usará la designación genérica **Área de**

Doñana para este territorio. En el *Capítulo 2* se desarrolla más este aspecto.

A lo largo del libro se mencionan numerosos nombres geográficos, que serán desconocidos para muchos de los lectores. Aunque cuando se introducen se procura ubicarlos en el territorio, no siempre es posible sin un exceso de intercalaciones que pueden dificultar la lectura. Para ayudar al lector, en la *Figura 1.3* se aporta la información toponímica que se considera más relevante.

Doñana ha sido un territorio con numerosos cambios desde que se inició su configuración hace 6000 años. Se conformó de forma similar a la actual hace 2000 años, con una marcada evolución física y biológica, y numerosas intervenciones humanas (Duque, 1977; García Novo y Marín, 2005), lo cual no descalifica sus importantes, abundantes y singulares valores naturales. Existe una fuerte dinámica de estudio, observa-

Vista de la marisma de Doñana en época seca.
Foto: CMA. JA.



ción, reconocimientos y disposiciones administrativas y normativas, en especial en las últimas dos décadas, con notables y muy recientes modificaciones de gestión. Así, lo que se recopiló en 2005 para el informe solicitado por la Fundación Doñana 21 (Custodio et al., 2006), y que en

buena parte es la base de este libro, está en parte ya obsoleto y se ha tenido que reformar, y es muy posible que parte de lo que se diga en este libro, cuando llegue al lector ya pueda tener desfases. Sin embargo permanece la esencia ecológica, física, hidrológica, hidrogeológica y de gestión.

Capítulo II



Vista de la barra arenosa costera en Noviembre de 2006. Al fondo la costa y en primer término la marisma inundada y La Retuerta. Los frentes dunares activos avanzan desde la costa hacia la marisma, intercalando entre los mismos corrales colmatados por vegetación.

Foto: HG/CSIC.

Características biofísicas y socioeconómicas del Área de Doñana

El sistema socioecológico de Doñana

La gestión sostenible de un territorio tiene que llevarse a cabo respetando las tramas espaciales del agua en el contexto de su ciclo. Esto requiere la consideración de ámbitos de estudio que trascienden las artificiales divisiones administrativas tradicionales (municipios, provincias, espacios protegidos, etc.) para incorporar límites no sólo con significado ecológico e hidrológico, sino también de alcance sociocultural.

Bajo esta perspectiva, durante milenios las sociedades humanas han modelado la Naturaleza y ésta a su vez ha condicionado el desarrollo de las sociedades humanas. Por esta razón la antigua dicotomía naturaleza–sociedad, desgraciadamente todavía vigente, que trata de justificar una gestión más o menos independiente de ambos sistemas, deja de tener sentido. La constatación de que la naturaleza, la cultura y la sociedad coevolucionan

a lo largo del tiempo deja la enseñanza de que las sociedades humanas no pueden desarrollarse aparte ni de parte, sino formando parte de la Naturaleza. Así, la conservación y el desarrollo no son dos procesos antagónicos sino que forman parte de un mismo proceso coevolutivo.

Por esta razón se utiliza el concepto de sistema socioecológico, entendido como un sistema integrado de humanos y Naturaleza, delimitado por criterios socioecológicos y definido como un sistema ecológico que se encuentra fuertemente ligado o afectado por uno o varios sistemas sociales (Berkes y Folke, 1998; Berkes et al., 2003).

El concepto de sistema socioecológico constituye una excelente herramienta para poder abordar los problemas ambientales con toda la complejidad que generan los procesos asociados al Cambio Global (Duarte et al., 2006). Se trata de un pro-

ceso emergente relacionado con los cambios ambientales que se derivan de la actividad humana y que, trascendiendo las escalas local y regional, modifican los procesos biogeofísicos esenciales que determinan el funcionamiento global del sistema Tierra. En último término, permite analizar y gestionar los estrechos vínculos que existen entre los servicios que generan los ecosistemas y el bienestar humano. En la construcción de estos vínculos el agua ha jugado y juega un papel esencial. Por tanto, al hacer referencia a Doñana como un sistema socioecológico se está haciendo hincapié en la necesidad de abordar las interacciones entre los sistemas naturales y los humanos desde una aproximación sistémica. Esto no invalida el argumento expuesto en el *Capítulo 1* de emplear a lo largo de éste libro el término de Área de Doñana para no entrar en el debate, siempre resbaladizo, sobre los límites político administrativos a considerar.

La consideración de Doñana como un sistema socioecológico hace necesario reconsiderar el concepto y la expresión espacial del término de Doñana tanto en general como en particular. Históricamente la denominación de Doñana se restringía a determinadas zonas o cotos de caza de los mantos eólicos que rodean por el oeste y noroeste a las marismas del río Guadalquivir (García Novo y Marín, 2005). Con la creación de la Reserva Biológica de Doñana (RBD) en 1964 y del Parque Nacional de Doñana (PND) en 1969, el nombre de Doñana adquirió naturaleza administrativa y fue difundiendo y haciéndose cada vez más un apelativo genérico del área que rodea a la marisma, de la propia marisma y de los terrenos circundantes con ocupación humana. Así se ha ido dibujando un área de influencia del Parque Nacional de Doñana y de su

entorno protegido, que ha acabado configurándose en un área socioeconómica natural que se extiende a grandes trazos desde la parte baja del río Tinto al río Guadalquivir, y desde el límite de los campos tradicionales de cultivo al Sur de la autovía Sevilla–Huelva hasta el mar. Por tanto, desde la creación del Parque Nacional de Doñana, y posteriormente del Parque Natural, para el sector conservacionista y para las personas foráneas a la zona la designación Doñana se refiere al territorio protegido por estas figuras legales. El resto es percibido y considerado, incluso por un instrumento de ordenación territorial como es el Plan de Ordenación del Territorio del Ámbito de Doñana (POTAD), de 2003, como *Entorno de Doñana*.

En 1993, y como consecuencia del Dictamen del Comité Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992) sobre el desarrollo del Entorno de Doñana, con el fin de buscar un ámbito de actuación para el Primer Plan del Desarrollo Sostenible de Doñana (PDSD) se creó el concepto artificial de Comarca de Doñana, también denominado Ámbito de Doñana, que no consideraba ni criterios ecohidrológicos ni socioculturales. Se asociaba a un territorio con una superficie de 2733 km² (COPTA, 2003), limitado por el litoral oriental onubense, el río Guadalquivir y el corredor Huelva–Sevilla que, con la autovía A–49, enlaza las dos aglomeraciones urbanas de mayor potencial económico de la zona. Este corredor se erige como su límite esencial al convertirse en el eje estructurador básico de su economía, ya que sobre el mismo se ha instalado el sistema urbano de la Comarca. Este eje también recoge las redes ferroviaria, de transporte por carretera, de energía eléctrica, de gasoductos y de telecomunicaciones

desde las cuales se derivan estas infraestructuras esenciales hacia el interior de Doñana (COPTA, 2003).

En total se incluyeron en la comarca de Doñana 14 municipios pertenecientes a tres provincias. En la provincia de Huelva había ocho: Almonte, Bollullos Par del Condado, Bonares, Hinojos, Lucena del Puerto, Moguer, Palos de la Frontera y Rociana del Condado. En la Provincia de Sevilla había cinco: Aznalcázar, Pilas, Isla Mayor, La Puebla del Río, Pilas y Villamanrique de la Condesa. En la Provincia de Cádiz tan solo se incluyó Sanlúcar de Barrameda. Éstos son los municipios elegidos para el primer Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana, que coincide con los elegidos para el segundo Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana. Para el POTAD su ámbito es también la Comarca de Doñana, pero sin incluir ningún municipio de la margen izquierda del Guadalquivir al considerar que la evolución de los usos del suelo y las comunicaciones entre

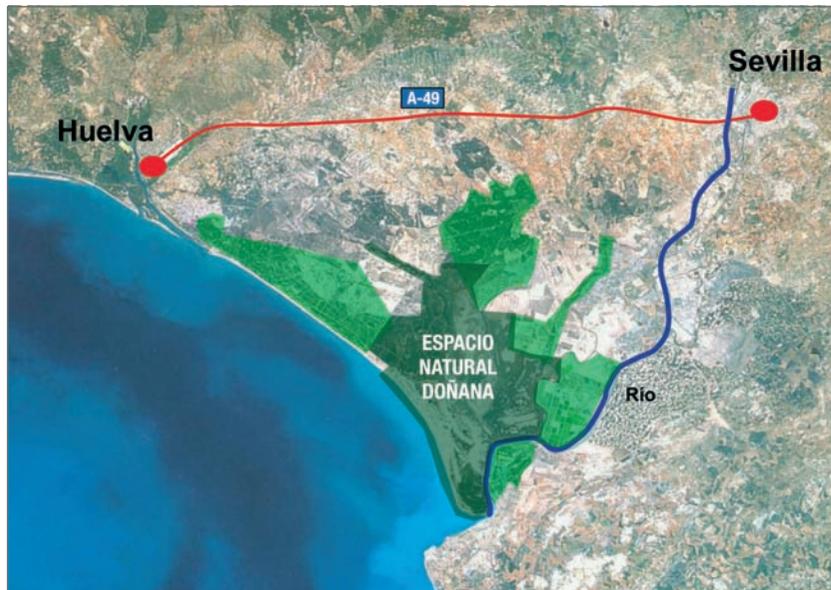
sus núcleos urbanos son muy débiles. Por esta razón se eliminó a Sanlúcar de Barrameda de la propuesta de modelo de ordenación territorial del Entorno de Doñana (COPTA, 2003).

En la *Figura 2.1* se da el encuadre general de la Comarca de Doñana o Ámbito de Doñana.

El significado de los límites del ámbito de actuación de cualquier modelo de desarrollo territorial no es baladí, puesto que tiene consecuencias de notable alcance. Es una de las razones que explican por qué no se alcanzaron buena parte de los objetivos de conservación planteados en el primer PDS, al aplicarse prioritariamente criterios de crecimiento económico para la delimitación de la Comarca de Doñana, sin dar la debida importancia a los criterios ecológicos y socioculturales. El PDS basó su campo de acción en una serie de municipios cuyos términos municipales incluyen un territorio en el que se pretende buscar un modelo de crecimiento económico compatible con la conservación de su singular biodiversidad y paisajes, olvidando otros municipios fuera de la Comarca que gestionan otros territorios que tienen influencia sobre Doñana. La actuación de estos municipios en cuanto a la administración de los aportes superficiales y subterráneos del ciclo del agua a la zona de Doñana es esencial, especialmente en relación con la gestión de las cuencas vertientes o las zonas de recarga del sistema acuífero de Doñana (*ver Capítulo 3*).

Así, por ejemplo, al no tener en cuenta el PDS en su concepto de Comarca de Doñana la cuenca del río Guadiamar, principal afluente a las marismas de Doñana, no se había considerado como un escenario posible la rotura del dique de contención de la balsa de estériles de la mina de

Figura 2.1.
Encuadre general de la Comarca de Doñana o Ámbito de Doñana que constituye el marco de actuación del PDS y del POTAD que incluye 14 municipios pertenecientes a las provincias de Huelva (8), Sevilla (5) y Cádiz (1).



La necesidad de una gestión integrada de las cuencas hidrográficas fue la lección aprendida más importante del vertido minero de Aznalcóllar.

Es bien conocido que la gestión integrada del agua hay que llevarla a cabo en el contexto de las cuencas hidrográficas, definidas como el conjunto de ecosistemas terrestres que drenan el agua de la precipitación hacia un sistema fluvial para terminar desembocando en el mar. Las cuencas constituyen la unidad mínima de interacción del ciclo del agua con los continentes y, por tanto, deberían ser la unidad mínima de observación, análisis y de la gestión del territorio. Obviar esta realidad trae consigo situaciones no deseadas como la que ocurrió en 1998 con la rotura del muro de contención de la gran balsa de estériles en las **minas de Aznalcóllar** ubicada en el tramo alto de la cuenca del río Guadiamar. Esta cuenca constituía el tributario más importante del balance hídrico de las marismas del Guadalquivir, y aunque desde hacía años las asociaciones ecologistas denunciaban los riesgos ecológicos que implicaba para las marismas protegidas de Doñana tener en su cabecera una de las balsas mineras más importantes de Andalucía, no existían medidas preventivas para evitar una catástrofe.



El 25 de Abril de 1998 se produjo el episodio que daría lugar a una de las mayores catástrofes ambientales de nuestro país y que generó una gran alarma social a nivel local, nacional e internacional. La rotura de la balsa de decantación originó un vertido al río Guadiamar de seis millones de hm³ de lodos piríticos y aguas ácidas con una elevada concentración de metales pesados, que recorrieron 62 km de los ríos Agrio y Guadiamar y contaminaron 4634 ha de cauce, llanura aluvial y marismas del Guadalquivir. De la superficie afectada por los lodos piríticos y aguas ácidas, 2656 ha pertenecían al Parque Natural de Doñana y 98 ha a las marismas del Parque Nacional.

Después de un primer año en el que un Plan de Medidas Urgentes, desarrollado por las administraciones central y autonómica, permitió la retirada de la mayor parte de lodos sedimentados y la vegetación contaminada, la depuración de las aguas ácidas retenidas en la marisma antes de ser vertidas al Guadalquivir en su tramo más bajo, así como la compra por la administración de todos los terrenos afectados. Con ello se abrió una ventana a la oportunidad de iniciar dos grandes proyectos de restauración ecológica apoyados por dos programas de investigación multidisciplinaria. Por un lado, la Junta de Andalucía puso en marcha el denominado Corredor Verde de Guadiamar con el fin de recuperar el papel que tenía la cuenca del Guadiamar como sistema de conexión entre los ecosistemas de Sierra Morena Occidental y los del Litoral de Doñana. Por otro, la administración nacional (Ministerio de Medio Ambiente) desarrolló el denominado Proyecto Doñana 2005 con la finalidad de restaurar la funcionalidad hidrológica de las cuencas vertientes a la marisma de Doñana.

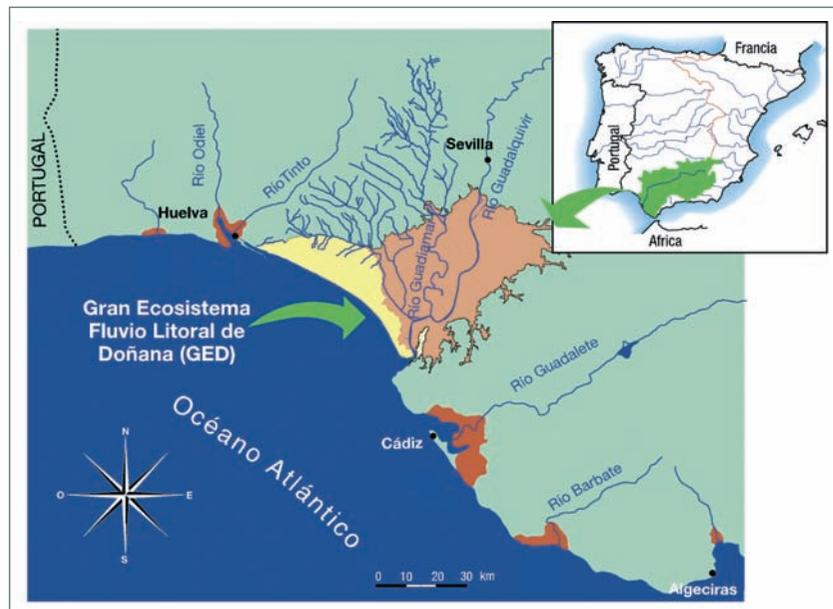
La Consejería de Medio Ambiente dió por superada la crisis socioecológica generada por el vertido minero cuando en el año 2003 la casi totalidad de la zona afectada se declaró Paisaje Protegido Corredor Verde del Guadiamar, integrándolo en la Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía (RENPA).

A pesar del largo camino recorrido hasta que los ecosistemas afectados hayan alcanzado un aceptable nivel de restauración y se hayan mitigado los efectos socioeconómicos del vertido, hasta hoy no existe un plan o estrategia de gestión integrada de las cuencas vertientes a la marismas protegidas de Doñana. Por lo tanto sus valiosos ecosistemas siguen siendo vulnerables a los efectos de una mala gestión de estas cuencas, como la contaminación de las aguas o los procesos acelerados de colmatación.

Aznalcóllar que aconteció en 1998. Como consecuencia de este accidente se vertieron al río Guadiamar seis millones de m³ de lodos piríticos y aguas ácidas que contaminaron una superficie de 4634 ha de cauce, llanura aluvial y marisma de Entremuros del Parque Natural (Arenas et al., 2003; Ayora et al., 2001). Ver Cuadro 2.1.

Entre los objetivos perseguidos por la creación de la Comarca de Doñana estaba el generar una identidad colectiva en el entorno del territorio protegido de los dos Parques existentes. Al menos hasta ahora, este objetivo no se ha conseguido. Por una parte sus habitantes se sienten más vinculados al municipio donde viven, y por

Figura 2.2.
El gran Ecosistema fluviolitoral de Doñana (GED) es el sistema de playa–duna–humedal–estuario más importante de la fachada sur atlántica ibérica. Su elevado dinamismo, el ser un punto de encuentro entre el mar, el continente y el río, y su condición de espacio terminal, al estar emplazado al final de la gran cuenca del río Guadalquivir, son las características más importantes que definen la integridad biofísica de este territorio. Tomada de Montes et al., (2007).



otra a la comarca histórica a la que pertenecen: Condado de Huelva, Condado de Niebla, Aljarafe sevillano, entorno metropolitano de Huelva, etc. Así, Doñana se percibe como algo ajeno, ligado a los espacios protegidos de la zona, poniendo de manifiesto la ausencia de unos criterios socioculturales en la delimitación de la Comarca de Doñana. Sin embargo, actualmente hay nuevas propuestas para tratar de activar unas señas de identidad de la Comarca de Doñana.

El Gran Ecosistema Fluviolitoral de Doñana como base biofísica del Sistema Socioecológico de Doñana

La propuesta alternativa al concepto Comarca de Doñana es considerar a este territorio como un sistema socioecológico. Cuando se habla del *socioecosistema de Doñana* (SED) se está considerando una gestión integrada y unitaria de las interaccio-

nes entre sus sistemas naturales y humanos, reguladas en gran parte por los aportes de aguas superficiales y subterráneas que conforman el ciclo del agua en el área. Especialmente se hace referencia a un territorio cuyos límites están definidos por criterios ecológicos (procesos hidromorfológicos y biofísicos) y sociales (político administrativos, económicos y culturales). El SED estaría por tanto conformado por una base biofísica denominada Gran Ecosistema Fluviolitoral de Doñana (GED) (Montes et al., 1998), cuyos ecosistemas terrestres y acuáticos, junto con la biodiversidad que albergan, se vinculan e interaccionan con un sistema social definido en términos de su capital humano, sociocultural y financiero. Este último incluye las grandes inversiones en construcciones.

Un gran ecosistema o ecorregión es el espacio mínimo, coherente desde el punto de vista de su origen y su evolución, lo suficientemente amplio como para que los procesos ecológicos y evolutivos que determinan la estructura, funcionamiento y dinámica de los ecosistemas que incluye, o sea su integridad ecológica, puedan expresarse espacialmente y operar en el tiempo dentro de sus límites.

El GED constituye uno de los complejos fluviolitorales más importantes y de mayor valor ecológico de la Unión Europea. Está ubicado en la zona del Bajo Guadalquivir y se encuentra asociado, por un lado a las áreas costeras planas y dinámicas del litoral de El Abalario y por otro a la desembocadura del río Guadalquivir. Constituye el mejor representante del sistema playa–duna–humedal–estuario que caracteriza a todo el litoral sur atlántico ibérico (Montes et al., 1998). Ver Figura 2.2.

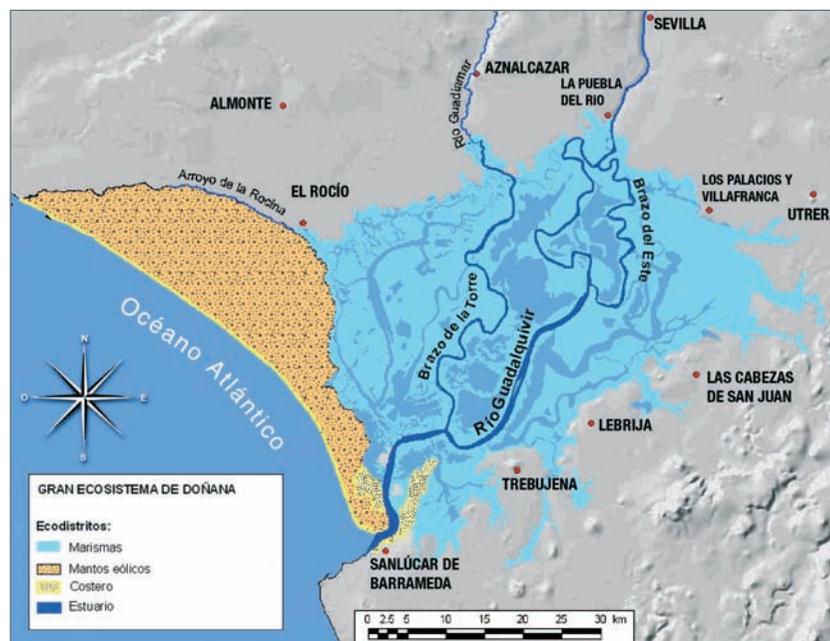
El GED constituye ese espacio mínimo con límites que tienen significado ecológico, que es co-

herente desde el punto de vista de su génesis y evolución al estar íntimamente ligado a la dinámica del litoral de El Abalarío y la dinámica fluvio-marreal del estuario del río Guadalquivir. Es, por tanto, un espacio vinculado a la presencia del mar.

Como se detalla en el apartado de Geología, su origen se inicia con la aparición de una gran ensenada litoral asociada a la desembocadura del río Guadalquivir al finalizar el último periodo glacial, hace unos 11.000 años. Es la consecuencia del último ascenso del nivel del mar, que alcanzó un máximo de algo más de 1 m sobre el nivel medio actual del mar hace unos 6000 años (Zazo et al., 2008). Su configuración actual se alcanzó hace unos 2000 años. La evolución de la zona ha seguido un proceso de continentalización, actualmente muy avanzado, que está condicionado por grandes aportes fluviales de sedimento y por una dinámica litoral que favorece el desarrollo de playas en forma de flecha litoral, lo que ha hecho que la ensenada se haya ido aislando paulatinamente del mar formando albuferas. Las playas, dunas y marismas de Doñana deben ser concebidas como tres manifestaciones de un mismo proceso de la dinámica fluvio-litoral, que durante los últimos miles de años ha interactuado de una forma integrada y unitaria.

El GED abarca una superficie aproximada de 2200 km² y engloba cuatro ecosistemas de rango menor, denominados **ecodistritos** (Figura 2.3): ecosistema de arenas eólicas de El Abalarío–Doñana (dunas), ecosistema de las marismas del Guadalquivir (humedal), ecosistema costero de Doñana (playas) y ecosistema fluvial del estuario del Bajo Guadalquivir (Montes et al., 1998).

El ecodistrito costero posee una superficie aproximada de 38 km², ocupando alrededor del



1,7 % del GED. Está constituido por una franja de unos 80 km de ecosistemas de playas, cuya integridad ecológica está ligada a la hidrodinámica marina actual del sector occidental del Golfo de Cádiz. También forman parte de este ecodistrito los ecosistemas de playas antiguas asociadas a las diferentes fases de progradación (avance del terreno en el mar) de los 25 km de las flechas litorales de Doñana y los 12 km de la flecha de La Algaida, en la margen izquierda del río Guadalquivir.

El ecodistrito del estuario del Bajo Guadalquivir, con una superficie aproximada de 36 km², supone alrededor del 1,6 % del GED. Actualmente constituye los cauces del Bajo río Guadalquivir y del Brazo de la Torre, que están sometidos al régimen de mareas marinas. La actuación de las mareas, de forma sinérgica con el régimen de caudales del río Guadalquivir, deter-

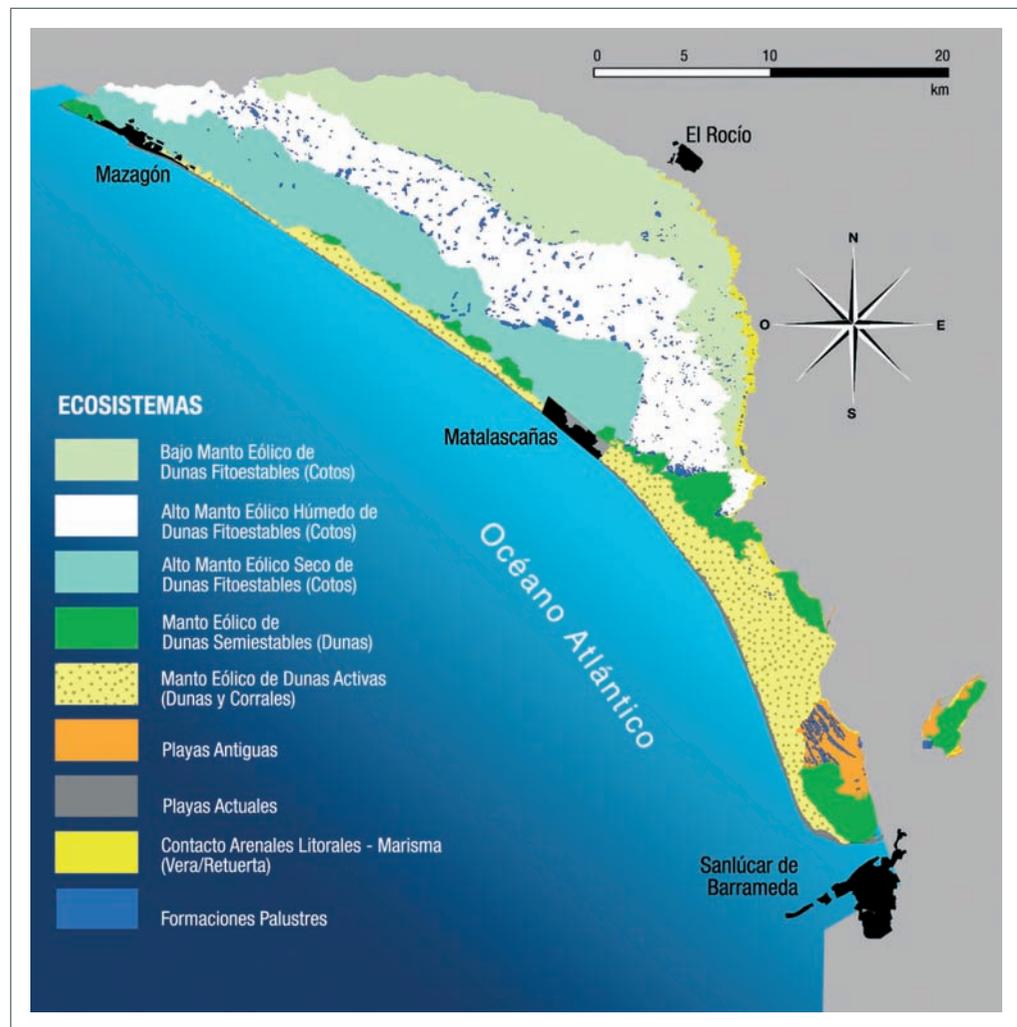
Figura 2.3.

Reconstrucción del Gran Ecosistema fluvio-litoral de Doñana (GED) antes de las grandes transformaciones a las que fue sometido desde la mitad del siglo XX. Está formado por cuatro ecosistemas a escala de ecodistrito: ecosistema eólico de El Abalarío–Doñana (dunas), ecosistema de marismas del Guadalquivir (humedal), ecosistema costero de Doñana (playas) y ecosistema fluvial del Bajo Guadalquivir (estuario). El GED constituye la base biofísica del sistema socioecológico de Doñana. Tomado de Montes et al., (2007).

Figura 2.4.

El sistema dunar de Doñana, caracterizado como Manto Eólico Litoral de Doñana, está constituido por cinco unidades eólicas definidas por episodios geomorfológicos diferentes. Sobre este manto eólico se ubica un rico y variado complejo palustre. Varios de sus tipos de formaciones palustres dependen de los aportes de las aguas subterráneas del acuífero de Doñana.

Tomada de Montes et al., (2007).



mina la integridad ecológica de este singular ecosistema.

El ecodistrito eólico se corresponde con un conjunto de dunas activas, semiestables y fitoestables (es decir, con vegetación bien establecida). Se extiende por una superficie aproximada de 498 km² y supone alrededor del 23% del GED. Se trata de un sistema dunar en la línea de costa, al que Borja y Díaz del Olmo (1994) han caracterizado geomorfológica y paleogeográficamente

como mantos eólicos litorales. Esta compleja formación de arenas eólicas de origen marino está formada por cinco unidades eólicas (Figura 2.4) que se diferencian por su génesis y diferente grado de estabilidad. El *Bajo Manto Eólico* es de carácter exorreico (las aguas de escorrentía superficial vierten hacia el exterior) y en él se desarrolla el sistema de cañadas de la margen derecha del arroyo de La Rocina y su continuación en La Madre de las Marismas, dentro del Parque Na-

cional. Al *Alto Manto Eólico Húmedo* se le asocia preferentemente el Complejo Palustre de El Abalarío. El *Alto Manto Eólico Seco* es propio de los ambientes de sabinares o “naves”. También se distinguen dos unidades recientes, de evolución histórica: *Manto Eólico de Dunas Semiestables* y *Manto Eólico de Dunas Activas*, conocidas también como dunas móviles. Los diferentes grados de fitoestabilidad determinan la integridad ecológica de sus ecosistemas. Ésta viene condicionada por procesos activos de generación de suelo, los cuales están supeditados fundamentalmente a la existencia de flujos de agua subsuperficiales (descarga rápida del agua de lluvia infiltrada en terreno, circulando a muy poca profundidad) y subterráneos (de agua que proviene de la zona saturada del terreno cuando ésta está más o menos cercana a la superficie; (ver Capítulo 3), lo que permite un régimen hidromorfo (Montes et al., 1998).

El ecodistrito de marismas del Guadalquivir se refiere al ecosistema de mayor extensión, con aproximadamente 1663 km². Es un gran humedal que abarca alrededor del 75% del GED. Antes de su reciente transformación agraria poseía un régimen básicamente fluvio-pluvial y un hidropereodo temporal estacional al quedar, muy aislado del efecto de las mareas marinas, debido a su avanzada evolución geomorfológica e intervenciones antrópicas. Litológicamente está formado por limos y arcillas que provienen del aporte de los ríos que desembocaban en la gran albufera y que la fueron colmatando conforme ésta se iba cerrando por la progresión de la barra costera de orientación noroeste–sudeste. Se pueden distinguir dos tipos de marismas según su antigüedad y evolución geomorfológica: una marisma externa,



de génesis subactual, con carácter mareal y muy escasa representación, asociada a las márgenes de los tramos finales de los principales canales fluviales (Guadalquivir y Brazo de la Torre), y una marisma interna fluvio-pluvial, que abarca la mayor parte de la extensión de la marisma actual con partes antiguas (de menos de 6000 años) y partes más recientes. Aunque paisajísticamente se muestra como una gran llanura aparentemente homogénea, presenta una elevada productividad estacional y una gran heterogeneidad espaciotemporal condicionada por su micromodelado. En detalle, esto determina la duración de la inundación y también de la concentración salina, que está condicionada globalmente por dos gradientes de salinidad orientados N–S y E–O. Por tanto, la heterogeneidad de su microtopografía y los gradientes generales de salinidad de sus suelos son los que determinan la integridad ecológica general de sus ecosistemas y explican su elevada diversidad y productividad biológica (Montes et al., 1998; Clemente et al., 2004).

Vista aérea de la barra arenosa costera entre la playa (lado inferior derecha) y la marisma inundada (parte superior), con los sucesivos frentes de dunas y los “corrales” de vegetación intermedios.

Foto: JMPA.

Cuadro 2. 2

Tabla de los tiempos geológicos para orientar la geología del Área de Doñana y edad de los eventos geológicos relevantes para la zona

Era	Periodo	Época	Edad (Ma) ^(a)
Cenozoica	Cuaternario	Holoceno	0,0115 ^{(b)(1)}
		Pleistoceno	1,8
	Terciario	Plioceno	5,3 ⁽²⁾
		Mioceno	23 ⁽³⁾
		Oligoceno	34
		Eoceno	56
		Paleoceno	65
Mesozoica	Cretácico	Superior	100 ⁽⁴⁾
		Inferior	145
	Jurásico	Superior	161
		Medio	176
		Inferior	200
	Triásico	Superior	228
		Medio	245
Inferior		251	
Paleozoica	Pérmico	299	
	Carbonífero	359	
	Devónico	416	
	Silúrico	444	
	Ordovícico	488	
	Cámbrico	542	

(a) Edad de inicio de la época o periodo (límite inferior) en millones de años (Ma). Según la Comisión Internacional de Estratigrafía (www.stratigraphy.org). Valores redondeados.

(b) 11.500 años

Eventos relevantes para Doñana:

(1) ~6000 años; estabilización del nivel del mar y dominio de las condiciones de relleno del estuario.

(2) inicio de la continentalización en todo el valle del Guadalquivir.

(3) sedimentación en cuenca marina profunda.

(4) grandes movimientos que elevan lo que hoy son las Cordilleras Béticas, seguidos de la formación de grandes fosas, como la del valle del Guadalquivir.

El contexto geológico regional como base del sistema acuífero de Doñana

La geología del área de Doñana y su entorno ha sido y sigue siendo estudiada por organismos públicos e investigadores cuyos trabajos han aportado conocimientos a un nivel de detalle que ex-

cede los objetivos y el ámbito de esta publicación. Aquí se realiza una síntesis de los aspectos geológicos relevantes para entender las características hidrodinámicas e hidroquímicas de las aguas subterráneas, así como el funcionamiento del acuífero, los cuales se exponen en el *Capítulo 3*. La información geológica más detallada puede en-

contrarse, entre otros, en IGME (1974–1980); Rodríguez Ramírez (1998); Rodríguez Ramírez et al. (1996, 1997); Rodríguez Vidal et al. (1993); Salvany y Custodio (1995); Salvany et al. (2001); Somoza et al. (1996), Zazo et al. (1996, 1999a, 1999b, 2005, 2008).

Los materiales sobre los cuales se encuentra el Área de Doñana, y que forman también el sistema acuífero (*ver Capítulo 3*), son de origen detrítico sedimentario y ocupan el Bajo Guadalquivir, en el extremo suroeste del valle de este río. En conjunto tienen una edad que oscila entre el Plioceno Superior (unos 2 millones de años, o quizás algo más) y el Cuaternario (entre 1,8 millones de años y la actualidad). Los sedimentos del Bajo Guadalquivir, poco consolidados en general, rellenan una depresión que está bordeada por rocas duras bastante más antiguas: al norte las rocas metamórficas del Macizo Ibérico, de edad paleozóica, y al sur las rocas sedimentarias consolidadas de las cordilleras Béticas, de edad mesozóica a terciaria (*Figura 2.5*). Para las designaciones de las eras y periodos geológicos, *ver Cuadro 2.2*.

Los sedimentos que forman Doñana consisten principalmente en gravas, gravillas, arenas, limos y arcillas, con todas las texturas intermedias entre éstas, si bien las gravas y gravillas son escasas en la parte aflorante. Vistos en conjunto, estos sedimentos se depositaron en ambientes que oscilan entre litoral somero (playa sumergida y emergida, estuario, delta) y claramente continental (llanura de inundación, aluvial, eólico). Su principal procedencia es la denudación del borde sur del Macizo Ibérico (Sierra Morena), el cual está situado a unas pocas decenas de kilómetros al norte de Doñana, aunque buena parte de los sedimentos arenosos más someros proce-



den del retrabajamiento de depósitos costeros anteriores por las corrientes marinas litorales y el viento, tanto emergidos como sumergidos (IGME, 1974–1980). Dado que este macizo está formado por rocas metamórficas antiguas (paleozóicas) de composición mayoritariamente silíceas, los sedimentos resultantes, desde el Plioceno hasta la actualidad, son también de composición preferentemente silícea, dominando en orden de abundancia decreciente el cuarzo, las arcillas y los feldespatos sódicos y potásicos. Los carbonatos están ausentes o son escasos, y en general se reducen a restos de fauna marina (conchas) en materiales de ese origen, allí donde no han sido eliminados por disolución.

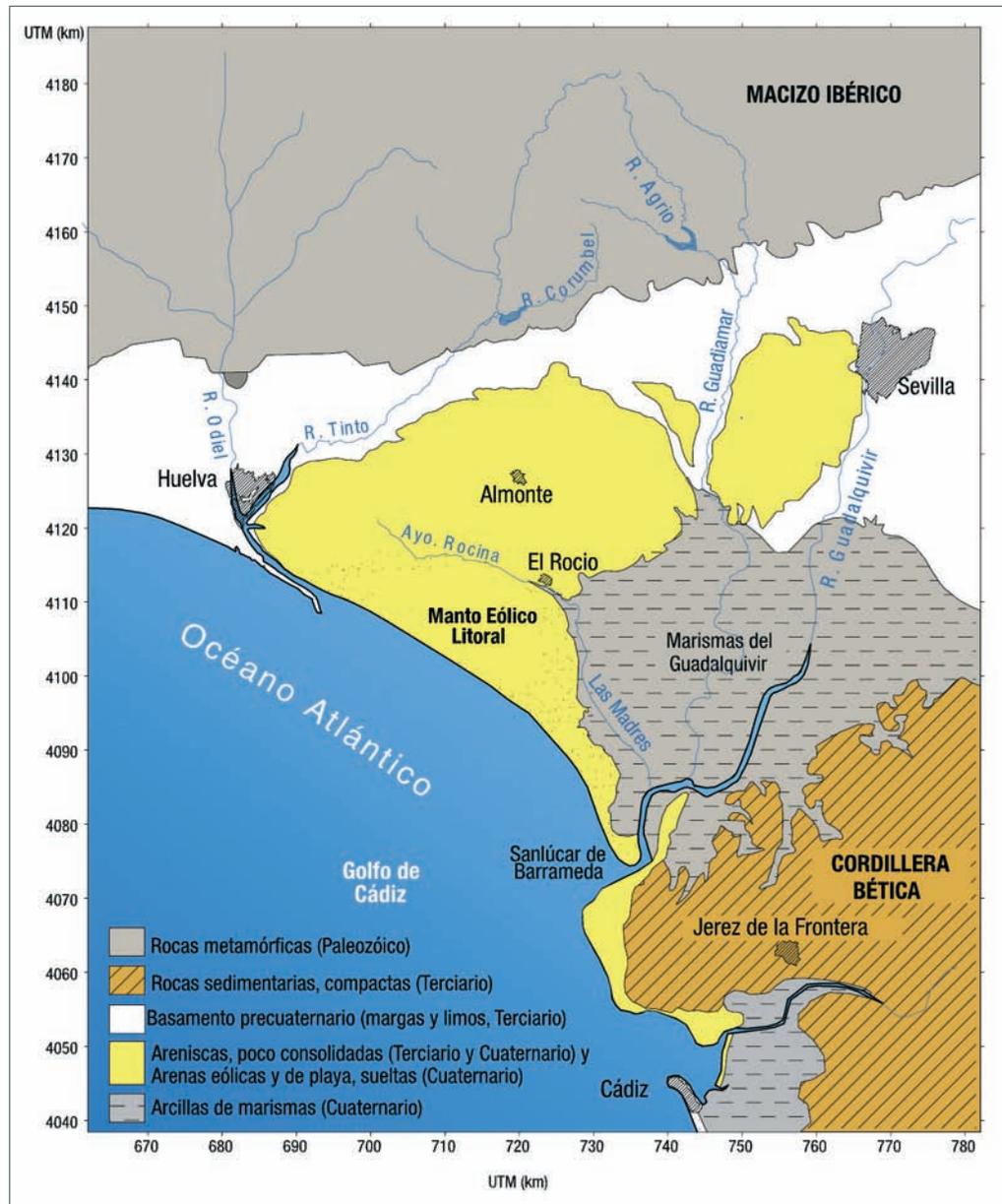
Buena parte de estos sedimentos forman capas que están apiladas fundamentalmente en vertical, aunque también las hay en contacto lateral unas con otras. En conjunto forman un extenso paquete que se acuña hacia el interior del continente y se es-

Acantilado costero de El Asperillo, en retroceso lento por abrasión marina, y vegetación al pie que depende de los rezumes de agua.

Foto: MM.

Figura 2.5.

Mapa geológico regional simplificado. Los materiales que forman la base física del Área de Doñana constituyen el relleno sedimentario más reciente de la parte más baja de la Depresión del Guadalquivir, y procedían principalmente del borde del Macizo Ibérico (al norte). En el Terciario existía una fosa marina que se fue rellenando con sedimentos finos (margas azules y limos) y se fue haciendo cada vez menos profunda. A partir de Plioceno Superior la zona está ya emergida.



pesa hacia el océano (Figura 2.6). Este paquete de sedimentos pliocuaternarios reposa sobre un espeso substrato de margas azules de hasta 2000 m de potencia (Rodríguez Ramírez, 1998), depositadas en ambiente sedimentario marino, entre el

Mioceno Superior (hace unos 11,2 a 5,3 millones de años) y el Plioceno Inferior (hace unos 5,3 a 3,4 millones de años) (Sierro, 1985), y está cubierto por un espesor variable de limos arcillosos y arenosos de edad pliocena. Estos limos afloran en el

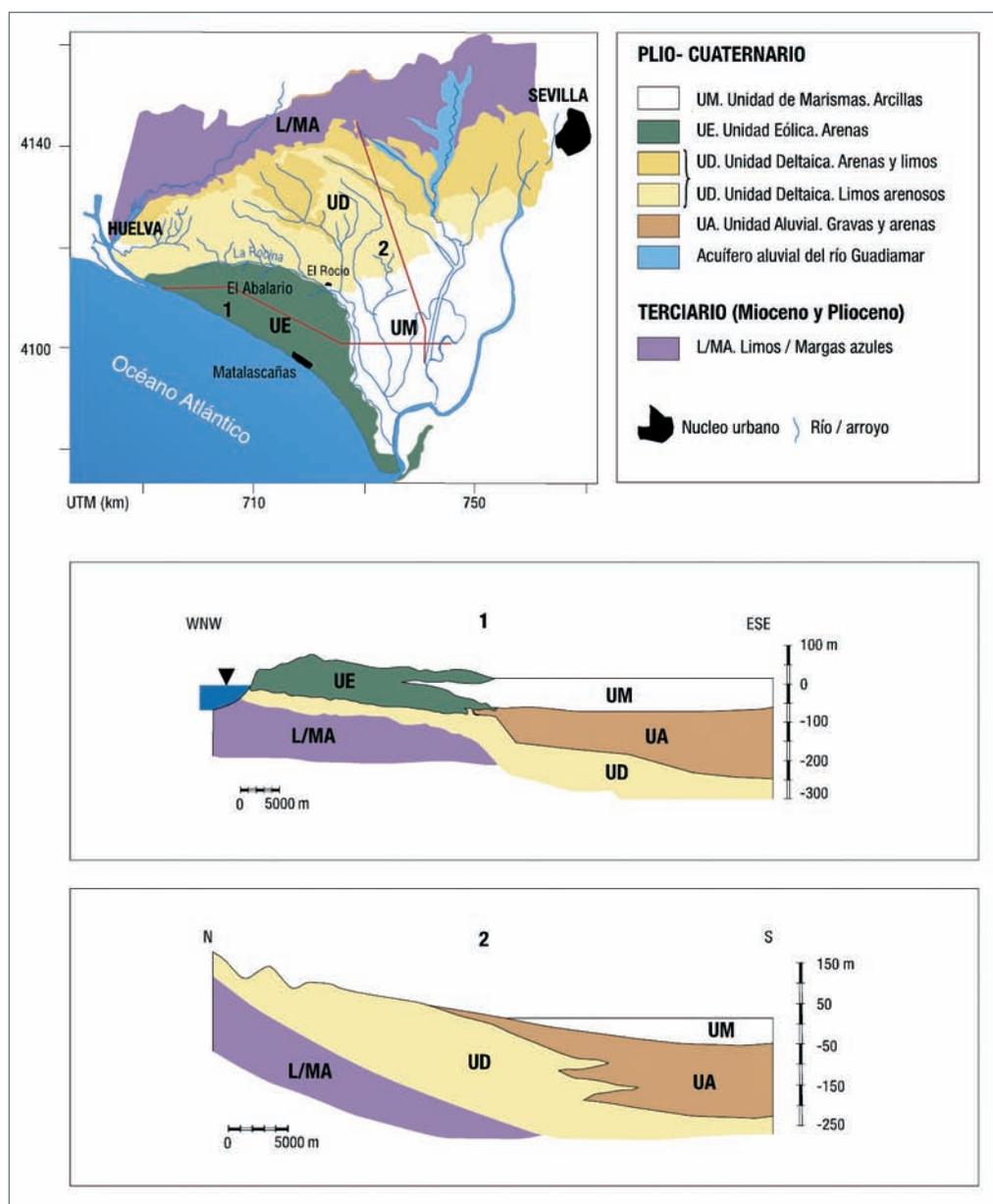


Figura 2.6. Geología del Área de Doñana. Sobre las margas azules y limos del Mioceno y Plioceno se formaron los deltas costeros de los cursos fluviales procedentes del Macizo Ibérico, dando lugar a los depósitos de gravas, arenas y limos de la Unidad Deltaica (Plioceno Superior–Pleistoceno). Los deltas hicieron progradar el continente, de forma que la línea de costa estaba bastante más al sur que hoy en día. Al alejarse la costa el ambiente se hizo más continental y hacia el sureste se depositaron gravas y arenas de llanura aluvial (Unidad Aluvial). Estos sedimentos también llegan hasta más allá de la costa actual. Al finalizar la última glaciación (hace unos 11000 años) el nivel del mar, que estaba unos 120 m más bajo que el actual, empezó a subir rápidamente y hacia el sureste se formó un gran estuario. La ubicación de estuario se debió en buena medida a la subsidencia (hundimiento generalizado) de esa parte de la costa. El estuario se ha ido rellenando con sedimentos finos (arcillas y limos) de ambiente marino intercalados con algunos niveles de arenas aportados por los cursos fluviales que desembocaban en él. Hace unos 2000 años el estuario ya tenía un aspecto cercano al actual, aunque desde entonces ha sido aislado del océano y abierto de nuevo al mismo varias veces por distintas razones. Mientras en el sector este había ríos y luego un estuario, el sector oeste se fue elevando y sobre los materiales deltáicos se depositaron arenas de playa, luego arenas aluviales y finalmente arenas eólicas procedentes de la erosión de los acantilados costeros hacia el oeste. En ciertos momentos de estabilidad se formaron lagunas costeras que acumularon arcillas y materia orgánica, hoy convertida en turba.

borde norte del Área de Doñana, siguiendo aproximadamente el trazado de la autopista Huelva–Sevilla, mientras que las margas azules subyacentes a los limos afloran algo más al norte. Las margas son sedimentos típicos de cuencas ma-

rinas profundas, mientras que los limos son característicos de medios sedimentarios marinos menos profundos, tanto menos cuanto más arenosos. Por tanto, la secuencia sedimentaria “margas debajo” a “limos encima” indica que entre el Mioceno Su-



Acantilado costero entre Torre de la Higuera y Torre del Loro. El cortado está en arenas, encima de las cuales se inicia el campo de dunas estabilizadas y semiestabilizadas del área de El Abalarío.

Foto: EC.

perior y el Plioceno Inferior se produjo un progresivo aumento de la influencia sedimentaria de materiales procedentes del continente.

El techo del conjunto formado por margas y limos se hundió hacia la costa, alcanzando profundidades de unos 150 m al oeste de Matalascañas y de más de 250 m entre esta población y la desembocadura del río Guadalquivir (Salvany y Custodio, 1995). Las causas de esta inclinación diferencial entre el sector este y el oeste parecen ser variadas. Probablemente se trata de una confluencia de procesos ocurridos en distintas épocas geológicas, tales como la flexión de la litosfera (corteza terrestre) debido a la formación de las Cordilleras Béticas durante el Neógeno, subsidencia isostática (hundimiento local de la costa para compensar el aumento de peso creado por los nuevos relieves), cambios eustáticos globales (movimientos verticales del nivel del mar) y tectónica regional reciente, durante el Cuaternario.

Sobre los limos arenosos del Plioceno Inferior se depositaron arenas y gravas en un am-

biente deltaico y de llanura aluvial. Estos materiales son del Plioceno Superior y/o del Pleistoceno (Zazo et al., 2005), y resultan del desarrollo y jerarquización de la red fluvial al imponerse un ambiente plenamente continental. En el sector suroccidental del Área de Doñana, entre el borde oeste de la marisma y El Abalarío, las gravas se encuentran a profundidades crecientes hacia la costa (hasta unos 80–100 m) y forman un nivel de pequeño espesor, como mucho de una decena de metros. Hacia el norte y noroeste de la marisma los sedimentos deltaicos y aluviales no están recubiertos por otros materiales, y consisten en arenas y arenas limosas cuyo espesor conjunto es variable, aunque en general no supera los 30 m.

Durante el Pleistoceno (entre hace 1,6 millones de años y 10.000 años) ocurrieron varios episodios generalizados de ascenso y descenso del nivel del mar, vinculados a fuertes cambios climáticos a escala del planeta conocidos como glaciaciones. Durante la última glaciación (denominada Würm en Europa, en especial la alpina, que tuvo su máximo hace unos 18.000 años y culminó hace unos 10.000 años), en el Golfo de Cádiz el nivel del mar estuvo unos 125 m más bajo que el actual (Lario, 1996; Somoza et al., 1996; Zazo et al., 2008). En esas condiciones la red fluvial se encajó en los materiales preexistentes, erosionando y arrastrando hacia la franja costera del momento grandes volúmenes de sedimentos. El depósito de estos sedimentos dio lugar a los niveles de arena de ambiente fluvial, marino somero y eólico que afloran en el acantilado de El Asperillo–El Arenosillo. Zazo et al. (2005, 2008) han estudiado la existencia de un paleosuelo rubefactado (enrojecido) de edad pleistocena y de un horizonte consistente en

una costra de óxidos de hierro de edad holocena, ambos aflorantes en el acantilado de El Asperillo, los cuales se asocian a episodios más húmedos y templados dentro del contexto climático general de la época.

En el sector comprendido entre la línea de costa actual y otra línea interior definida aproximadamente por Mazagón, El Rocío y la desembocadura del río Guadalquivir, sobre las formaciones arenosas fluviales se ha acumulado durante el Cuaternario un extenso manto de arenas eólicas, originadas en parte por la abrasión marina de los acantilados ubicados al oeste de la zona (*ver Figura 2.3*) y explicación del concepto de ecodistrito eólico en el apartado anterior). Estos depósitos, formados en varias etapas, forman en conjunto un recubrimiento eólico que tiene espesores variables entre menos de un metro y algunos metros. La forma geométrica general es la del recubrimiento de un domo geográfico con cúspide en el poblado de El Abalarío. Este manto eólico tiene una especial relevancia para la recarga a los acuíferos (*capítulos 3 y 7*). Las formaciones eólicas ubicadas entre Matalascañas y la desembocadura del Guadalquivir forman un largo cordón litoral de dunas activas que separan la marisma de Doñana de la línea de costa.

Respecto al sector suroriental de Doñana, lo que hoy es aproximadamente la marisma fue una depresión abierta al mar durante la mayor parte del Cuaternario (Zazo et al., 1995; 1999b). En esta zona, sobre los limos arenosos del Plioceno Inferior y las arenas litorales del Plioceno Superior se encuentran depósitos de gravas, gravillas, arenas y conglomerados originados por el río Guadalquivir y por otros ríos y arroyos menores que desembocaban en el mismo estuario desde la ori-

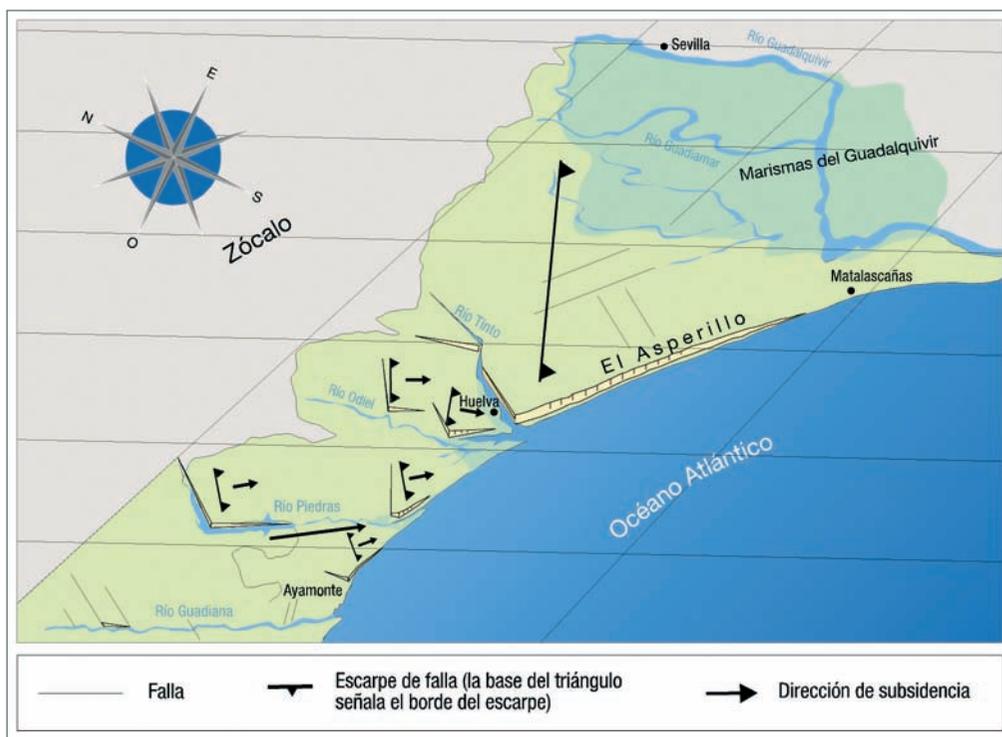
lla norte. El trazado del río Guadalquivir era similar al actual aunque con su tramo final desplazado hacia el SE, bordeando el pie de las Cordilleras Béticas (Rodríguez Ramírez, 1998). Los sedimentos aluviales forman cuerpos lenticulares (con forma de uso o lenteja) muy elongados y con espesores inferiores a 20 m, intercalados con niveles de limos y arcillas. Se han identificado varias secuencias de gravas, arenas y limos superpuestas en vertical. Forman depósitos progradantes (que avanzan sobre los materiales ya existentes) desde el borde norte de la marisma hacia el interior de la misma (Salvany et al., 2001). No obstante, hacia la zona costera los depósitos de gravas y arenas disminuyen y dominan los cuerpos de arenas finas, limos arenosos y arcillas de ambiente de estuario.

Como se ha dicho en el apartado anterior, tras la última glaciación, que finalizó hace unos 11.000 años, el nivel del mar comenzó a ascender y alcanzó su posición máxima, cercana a la actual, hace unos 6000 años (Lario, 1996; Zazo et al., 1999b). En Europa occidental esta elevación se denomina Transgresión Flandriense. El ascenso no fue continuo sino que hubo estabilizaciones y pequeñas regresiones durante las cuales se formaron distintos cuerpos progradantes de arenas, la mayor parte de ellos hoy sumergidos en el mar (Somoza et al., 1996). Tras la estabilización del nivel del mar la línea de costa empezó a linearizarse mediante erosión de los acantilados, deriva litoral de arena y formación de playas, cordones y flechas litorales frente a los entrantes. A espaldas de estos cordones de arena, en lo que hasta entonces había sido un estuario abierto, se desarrollaron albuferas que evolucionaron hacia marismas mareales y fluviales que han llegado

Figura 2.7

Esquema ilustrativo de la tectónica y la morfología de la costa atlántica entre el río Guadiana y Matalascañas. A consecuencia de la formación de fallas de orientación NE-SW y NW-SE, durante el Cuaternario (quizás antes) la costa quedó fragmentada en bloques. Posiblemente por la conjunción de diversas razones, estos bloques comenzaron a hundirse (subsistencia) hacia el SE y a elevarse hacia el NW, de forma que en los sectores hundidos se desarrollaron costas bajas inundables (estuarios y marismas) y en los elevados se formaron escarpes a cuyos pies se instalaron algunos cursos fluviales. Otros se instalaron a lo largo de las fallas de orientación NW-SE.

Fuente: Modificado de Flores (1994).



hasta nuestros días, aunque ya en fase avanzada de colmatación natural y antrópica.

La tectónica cuaternaria es aún activa y ha fracturado la costa desde el Algarve portugués hasta el río Guadalquivir, dando lugar a bloques elevados delimitados por fallas de dirección NO-SE y NE-SO (Figura 2.7). Estos bloques han basculado hacia el sureste, dando lugar a elevaciones topográficas de orientación NE-SO, a las cuales se ha adaptado la red hídrica superficial, y zonas deprimidas al sureste de las mismas, sobre las cuales se han instalado zonas inundables y marismas. Este basculamiento es responsable de la morfología del frente costero actual, con sucesivos frentes acantilados que disminuyen de altura de oeste a este. Algunas fallas son visibles en el acantilado de El Asperillo, que se extiende unos

35 km entre Matalascañas y Mazagón, como la de la Torre del Loro (Zazo et al., 1981, 2005, 2008).

A modo de síntesis, y para dar apoyo a la consideración del funcionamiento del sistema acuífero que se describe en los capítulos 3 y 7, la geometría, litología y origen de las formaciones sedimentarias que constituyen el substrato geológico sobre el cual se encuentra Doñana se pueden resumir así (ver Figura 2.4):

- Los materiales que forman la zona sobre la cual se asienta Doñana son un conjunto de sedimentos de edad variable entre pliocena superior y cuaternaria. Este conjunto de materiales se apoya sobre un substrato geológico formado por margas azules del Mioceno y limos arenosos del Plioceno, todos ellos formados en ambiente marino.

Sobre las margas y limos aparecen gradualmente limos, margas y arenas finas de origen deltaico y edad entre pliocena y pleistocena. Forman la Unidad Deltaica de Salvany y Custodio (1995), que corresponde a las unidades Limos Basales y Arenas Basales de IGME (1982). Se trata de los aportes dejados por la red fluvial pliocena desarrollada en los relieves del Macizo Ibérico. La Unidad Deltaica está más desarrollada en el sector norte del Área de Doñana que en el oeste.

□ Hacia el este, bajo la marisma, la parte superior de la Unidad Deltaica es substituida por niveles de gravas de ambiente aluvial y edad entre pliocena y cuaternaria. Esta Unidad Aluvial (según designación de Salvany y Custodio, 1995) se desarrolla casi exclusivamente bajo la marisma, donde alcanza el centenar de metros de espesor, pero su extensión lateral es limitada. Hacia el sur se va intercalando con capas de sedimentos mucho más finos (arenas, limos y arcillas) de plataforma marina y estuario, y parece desaparecer antes de la línea de costa actual (no hay muchos sondeos profundos en esta costa). En la marisma la Unidad Aluvial está recubierta por una capa bastante homogénea, de 50 a 70 metros de espesor, de limos y arcillas de edad cuaternaria (Pleistoceno Medio y Holoceno, según Zazo et al., 1999b) y origen estuárico y mareal, denominada Unidad de Marismas por Salvany y Custodio (1995). La Unidad de Marismas está separada del océano por el cordón arenoso de Matalascañas–Malandar, también de edad cuaternaria.

□ En el sector suroeste del Área de Doñana la Unidad Deltaica está muy poco desarrollada



(menos de 15 metros de espesor) y la Unidad Aluvial parece estar ausente, al menos en forma de depósitos de grava. Sobre la primera se acumuló un potente depósito (entre 20 y 80 metros) de arenas de tamaño medio, procedentes en su mayor parte de la plataforma continental y de los relieves de la costa onubense–algarvía. Aunque el conjunto es denominado Unidad Eólica por Custodio y Salvany (1995), estas arenas tienen distintos orígenes: las más profundas son de origen litoral (playa sumergida), las intermedias de playa emergida y también de origen aluvial (por esta razón se suele aludir a las mismas como arenas fluviomarinas o fluviodeltaicas), y las más someras son de origen eólico. En realidad buena parte de estas arenas han sido retrabajadas a lo largo de la historia geológica, pasando de un ambiente sedimentario a otro distinto en periodos posteriores. Las capas más someras, depositadas por el viento durante distintos episodios eólicos a lo largo del Cuaternario (Borja y Díaz del Olmo, 1994; CMA, 1998; Zazo et al., 1999a,

Dunas costeras activas en el Corral de los Inglesillos. Los restos del revestimiento de un pozo manual muestran los sucesivos recrecimientos que se realizaron para evitar ser sepultado por el paso de la duna.

Foto: EC.

2005), forman el denominado Manto Eólico Litoral de Doñana. Con una extensión de casi 500 km² constituye el segundo mayor manto eólico de Europa occidental. En el seno de esta Unidad Eólica, y desde aproximadamente el poblado de El Abalarío hasta la marisma, aparece una capa de arcillas marinas con niveles de gravilla y arenas que se desarrolla hacia el este hasta enlazar con las arcillas de marisma. Se trata de una pulsación de la línea de costa hacia el oeste (Lozano, 2004). Su papel es muy relevante pues condiciona el flujo de agua subterránea, como se expone en los *Capítulos 3 y 7*.

Caracterización territorial y socioeconómica general del sistema socioecológico de Doñana

Vegetación arbórea en un "corral", con el frente de un tren de dunas detrás.
Foto: EC.

Además de su gran valor ecológico por la singularidad de sus ecosistemas, lo que ha hecho que Doñana sea uno de los patrimonios naturales más importantes de la Unión Europea, el



GED posee un gran valor social, en especial para la población local. Las funciones de sus ecosistemas suministran un flujo muy importante de servicios de abastecimiento (especies con valor comercial, cinegético, pesquero, acuicultura, ganadería, agua para abastecimiento urbano y agrícola, madera, alimentos, turba, minerales, etc.), de servicios de regulación (control de la erosión, de inundaciones, depuración y almacenamiento de aguas, fertilización del suelo, sumidero y fuente de nutrientes, asimilación de residuos, etc.) y culturales (espacio para ocio, educación, turismo, ciencia, etc.) que, en su conjunto, determinan el bienestar de su población. Por esta razón el GED, si mantiene su funcionalidad, constituye un capital natural, es decir, un conjunto de componentes bióticos y geóticos y de procesos biofísicos que suministran servicios, o lo que es lo mismo, beneficios a la sociedad.

Bajo esta conceptualización del valor social de sus ecosistemas terrestres y acuáticos, incluido el acuífero de Doñana, se requiere que los sistemas biofísicos, económicos y socioculturales se analicen y gestionen desde una perspectiva integrada e integradora, como ofrece el marco de los socioecosistemas, en los que los sistemas ecológicos y los socioeconómicos están fuertemente acoplados. En este contexto, los modelos de gestión deben centrarse prioritariamente en las interrelaciones de los subsistemas sociales y naturales, adquiriendo un papel esencial las tramas territoriales relacionadas con las aguas superficiales y subterráneas.

Los límites político administrativos del SED pueden identificarse con los límites de los municipios que tienen capacidad de gestionar una mayor o menor parte de la superficie de su base biofísica

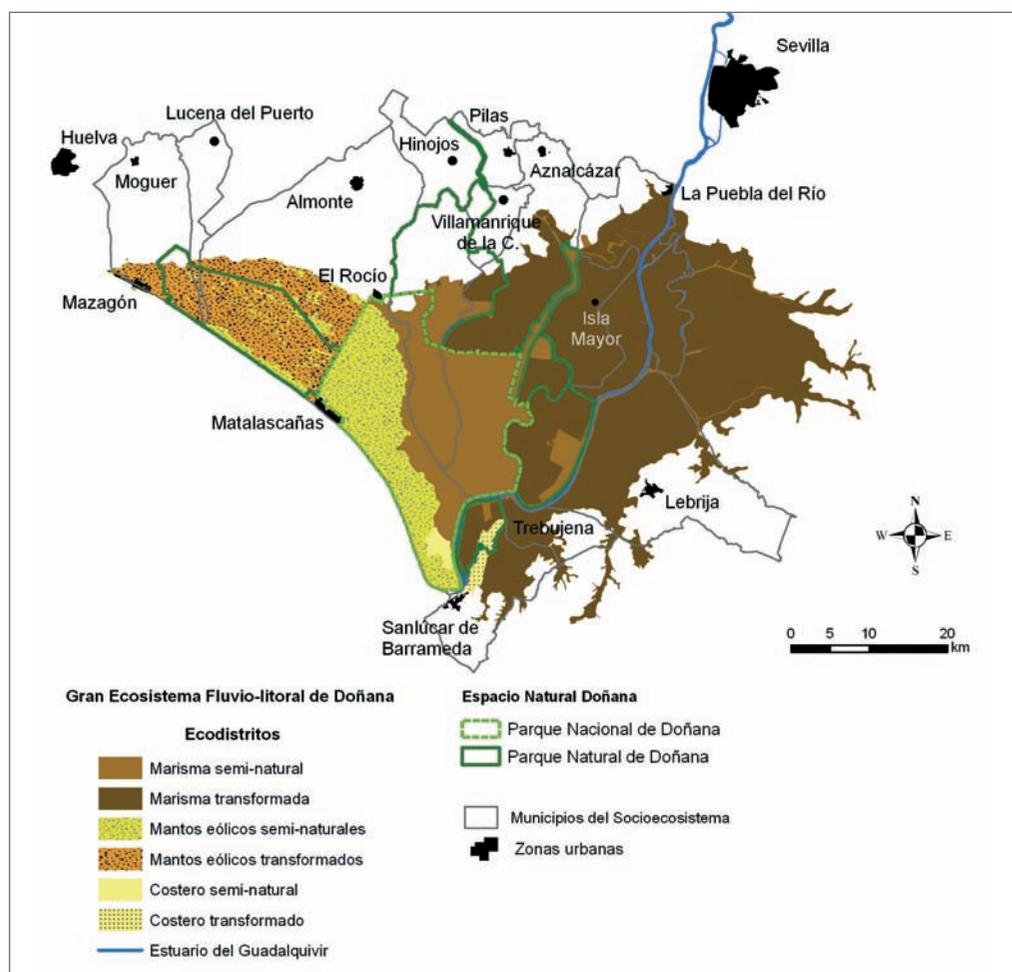


Figura 2.8.

Expresión cartográfica de Doñana conceptualizada como un sistema socioecológico constituido por su base biofísica o Gran Ecosistema Fluvio-litoral de Doñana y un sistema social, definido por los límites de los municipios afectados, con el que interacciona de forma interdependiente. También se considera una zona de influencia socioecológica definida por los municipios con mayor influencia en la gestión de las cuencas hidrográficas vertientes a la marisma y las áreas de recarga del acuífero.

Tomada de Montes et al., (2007).

(Figura 2.8). Montes et al. (2007) también definen una zona de influencia socioecológica que en cierta medida constituye una zona de amortiguación de los impactos que pudieran generarse por la alteración de los componentes superficiales y subterráneos del ciclo del agua en la zona. De esta forma se incluirían municipios cuyos términos municipales no están en el GED, pero sus hidrosistemas de referencia, ya sea sus cuencas hidrográficas o las áreas de recarga del acuífero, sí que lo están o afectan al mismo (ver Capítulo 3).

En total el SED incluye 12 municipios de las provincias de Huelva (Almonte, Hinojos, Lucena del Puerto, Moguer), Sevilla (Aznalcázar, Isla Mayor, La Puebla del Río, Lebrija, Pílas, Villamanrique de la Condesa) y Cádiz (Sanlúcar de Barrameda, Trebujena) en donde viven aproximadamente 174.000 personas con una densidad de población de 56 habitantes/km².

A principios del siglo XX todavía podía hablarse de que el SED mantenía un elevado nivel de conservación de su capital natural, o lo que

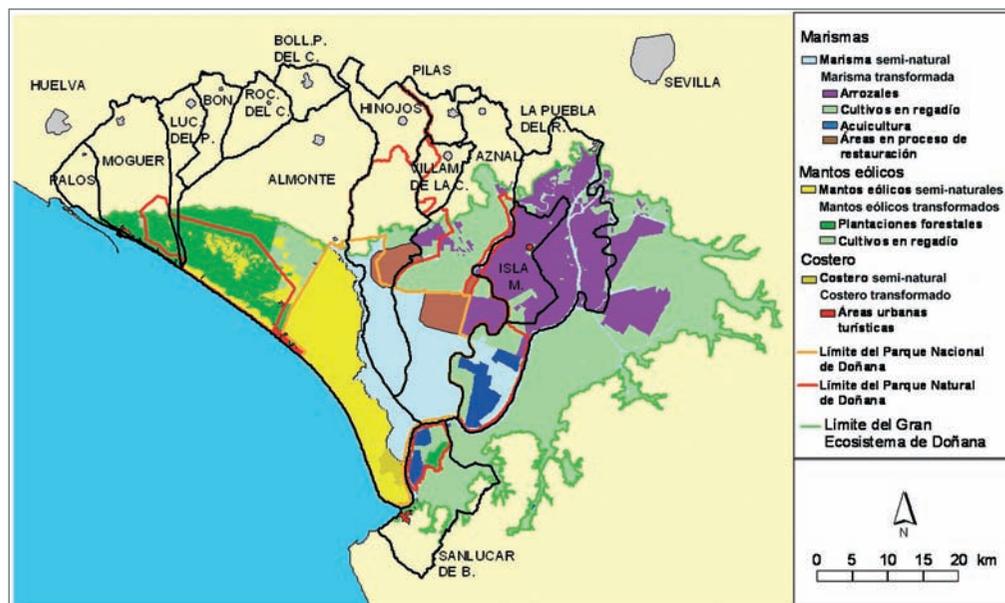
es lo mismo, la capacidad de generar un rico y variado flujo de servicios a su población al no haber sido alterado significativamente el ciclo del agua en la zona (Ojeda y del Moral, 2004). Las marismas mantenían una presencia humana mínima dedicada a usos productivos extensivos, como la caza, la pesca o la ganadería. Los mantos eólicos eran considerados improductivos para la agricultura, explotándose los servicios generados por sus bosques repoblados de pinos, la caza y la ganadería extensiva. Los usos agrícolas tradicionales de secano, como el cereal, la vid o el olivar, se realizaban fuera del SED, en el Condado, donde se concentraba un poblamiento rural que explica la densidad de núcleos urbanos en el borde norte de las marismas (Figura 2.8).

A partir de la segunda mitad del siglo XX se pusieron en marcha en el SED grandes proyectos de desarrollo forestal, agropecuario y turístico que

sin duda han incrementado el nivel adquisitivo de sus habitantes, hasta alcanzar niveles de renta y empleo por encima de la media andaluza y española. Pero esta considerable mejora económica y social no ha sido sin costes. A la entrada en el siglo XXI se observa que se han transformado en cultivos de arroz, de regadío y de secano el 72% de las marismas de Doñana, el 50% de sus mantos eólicos en plantaciones forestales de eucaliptos y pinos y en cultivos en regadíos que están casi en exclusiva dedicados al fresón, y el 9% de sus playas en urbanizaciones (Ojeda Rivera, 1987; Cruz Villalón, 1988). Ver Figura 2.9.

La fama internacional adquirida por Doñana, básicamente por la singularidad de su fauna de vertebrados, generó un fuerte movimiento para la conservación de la superficie de ecosistemas no transformados por las políticas forestal, agropecuaria y turística. Esto derivó en

Figura 2.9
Distribución espacial de los usos del suelo generales del Gran Ecosistema Fluvioitoral de Doñana.
Se ha transformado alrededor del 68% de la superficie original, básicamente en cultivos intensivos, y una pequeña fracción de su litoral en urbanizaciones.
Tomada de Montes et al., (2007).



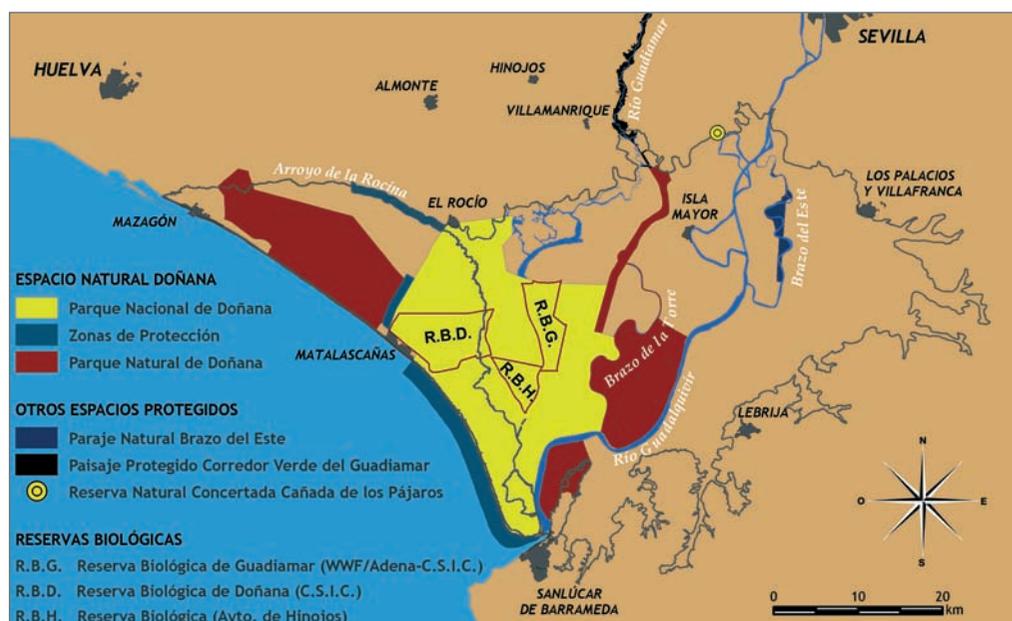


Figura 2.10.

Para evitar la intensa transformación de los ecosistemas de los mantos eólicos y de la marisma que ha tenido lugar desde la segunda mitad del siglo XX cuando se iniciaron los grandes proyectos de desarrollo forestal, agropecuario y turístico se ha protegido aproximadamente el 43% de la superficie del GED básicamente con la declaración de un Parque Nacional y Natural, pero han quedado fuera de esta protección sus hidrosistemas superficiales y gran parte de la zona de recarga del acuífero.

diferentes medidas de planificación ambiental, general y sectorial, prioritariamente pivotada en la declaración de espacios protegidos, que han condicionado la evolución de su estructura territorial y de usos del suelos (COPTA, 2003).

Como se ha dicho anteriormente, en 1969 la administración ambiental nacional creó el Parque Nacional de Doñana y en 1989 la administración regional creó el Parque Natural de Doñana. Ambos espacios, que comprenden una superficie de 118.086 ha en el año 2009, han unificado su administración bajo la gestión de la Junta de Andalucía con el nombre de Espacio Natural de Doñana. Constituye la base fundamental de la Doñana Protegida. También existen otros espacios protegidos aledaños a Doñana de menor tamaño, como las áreas de Preparque, la Reserva Natural del Brazo del Este y el Paisaje Protegido del Corredor Verde. En la actualidad, aproximadamente el 43% del SED se encuentra protegido

por diferentes figuras legales (Figura 2.10). El SED posee designaciones internacionales de protección como Reserva de la Biosfera, Sitio Ramsar, Patrimonio de la Humanidad o Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA).

Dunas costeras activas con vegetación de pinos.

Foto: CMA. JA.



① Aspecto de la superficie de alteración del Plioceno marino tal como se encuentra bajo el recubrimiento eólico cuaternario en el área de La Vera.

② Nivel de acumulación de finos en el fondo de una laguna temporal. El horizonte ha sido roto para acceder al agua freática (zacallón), que se encuentra hoy día por debajo del fondo lagunar. En estas condiciones la laguna recibe agua por retención de la precipitación y también por descarga de flujos hipodérmicos.

③ Formación de concreciones de hierro en la franja de oscilación capilar y aspecto alveolar de varios nódulos unidos iniciando una litoplinita.
Fotos: MM.



En resumen, el resultado final de la interacción, no coordinada, de las tres políticas de desarrollo (forestal, agropecuaria, turística) y la de conservación (fundamentada básicamente en la declaración de espacios protegidos) ha configurado un territorio desarticulado, configurado por sectores productivos y de conservación muy diferentes y desconectados espacial, social y económicamente. Esto ha supuesto una bipolarización entre los usos productivos y los relacionados con la conservación de sus ecosistemas y la biodiversidad. En esta configuración espacial del SED la gestión de las componentes superficial y subterránea del ciclo del agua en la zona ha jugado y juega un papel crítico ya que el agua constituye la base estratégica del desarrollo socioeconómico del SED, pero también del mantenimiento de la integridad ecológica de sus principales ecosistemas.

De hecho, la reorganización actual de la configuración espacial de los usos del suelo se está realizando en función de la disponibilidad de aguas superficiales o subterráneas, buscando una coexistencia aparentemente encontrada entre la conservación de ecosistemas y la biodiversidad y el desarrollo económico. Esto supone un gran avance conceptual que debe traducirse, dado un tiempo razonable, en mejoras significativas de la vinculación e integración de las actividades socioeconómicas con la conservación de los ecosistemas.

Capítulo III



Vista de una laguna en época de aguas altas en la alimentación hídrica de El Abalarío. Esta laguna se debe en buena medida a descargas de agua subterránea.

Foto: CMA. JA.

Los sistemas hídricos de Doñana y su sistema acuífero

El ciclo del agua en el Área de Doñana

Doñana no es concebible sin hacer referencia al agua, que es el sustento y el motivo de su importancia como un espacio natural de gran valor ecológico. Además es un recurso clave para la población residente y visitante. De aquí que de entre los muchos valores locales a considerar y valorar, que se deben gestionar racionalmente, se haga siempre especial referencia al agua y su ciclo como condicionantes esenciales y fundamentales.

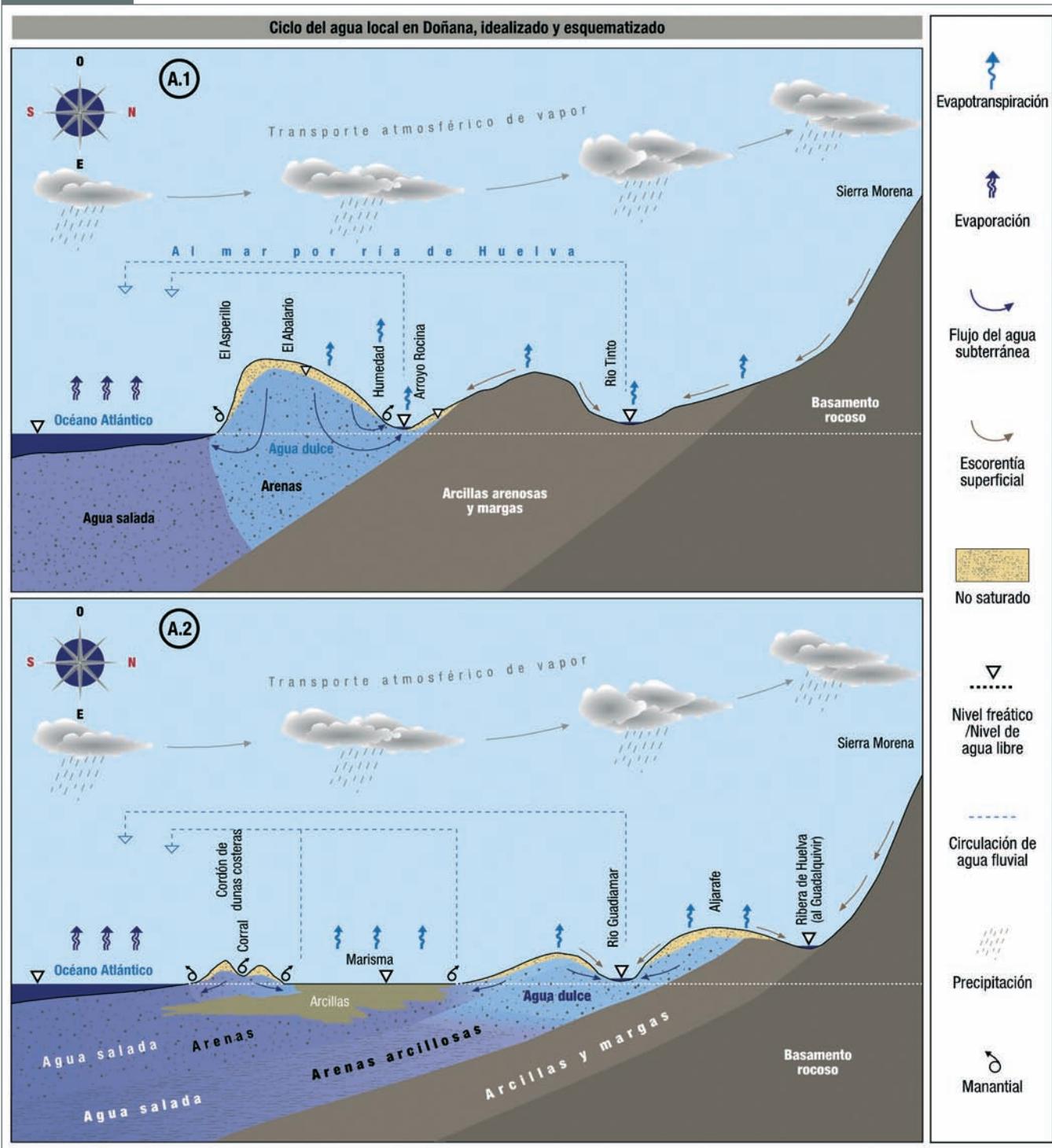
Los procesos del agua en el medio natural están integrados en el ciclo del agua, que es la continua transferencia de agua por desplazamiento del vapor atmosférico desde las áreas de evaporación, principalmente el océano pero no exclusivamente, a las áreas continentales e insulares, donde da origen a la precipitación. Esta precipitación se evapora de nuevo en parte, directamente (evaporación) o a través de la vegeta-

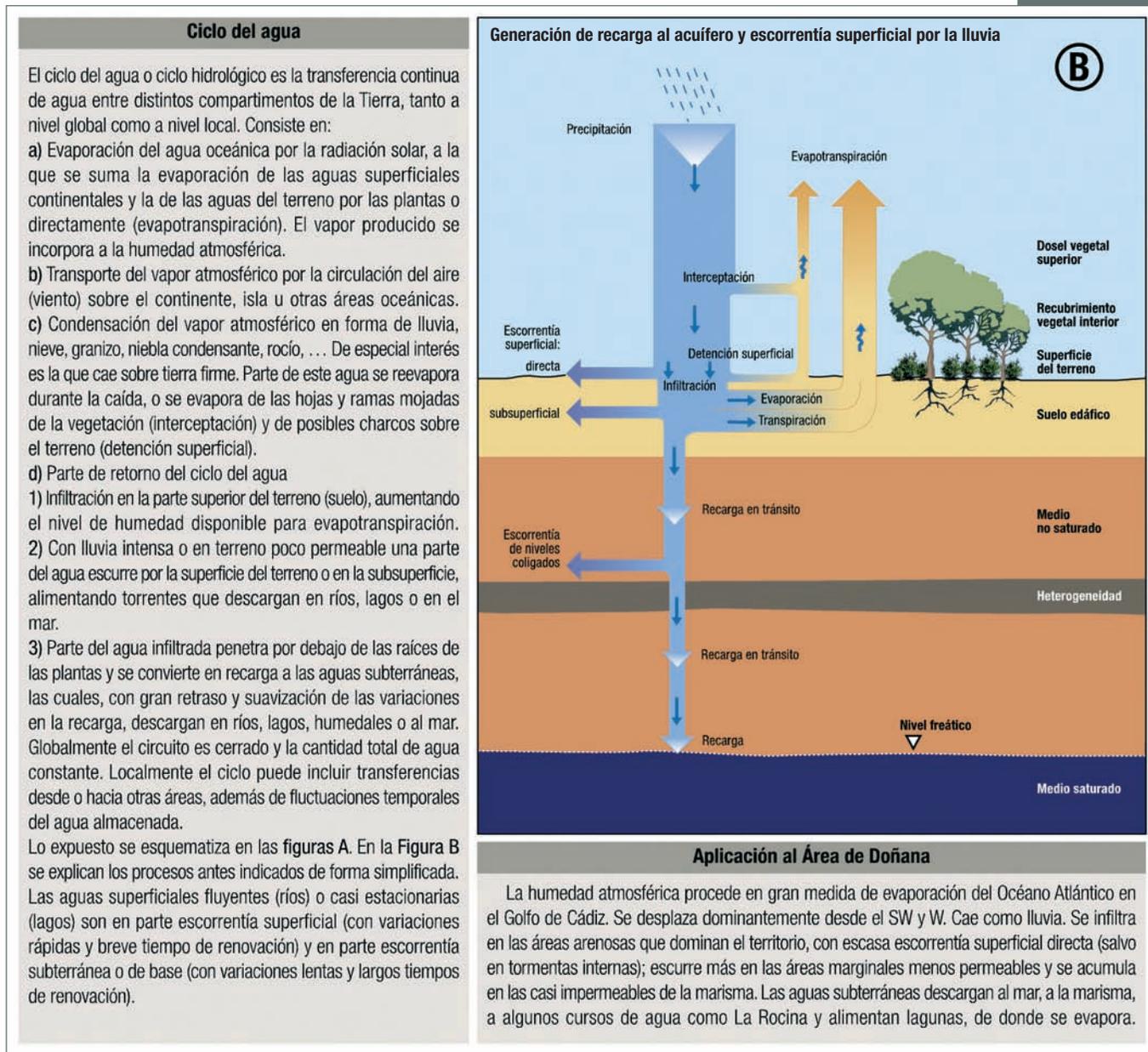
ción (transpiración). El resto (precipitación neta) vuelve al océano y lagos interiores, bien sea por la superficie (agua superficial), bien sea por los poros y fisuras del terreno (agua subterránea), con intercambios entre ambos. En el *Cuadro 3.1* se explica el ciclo del agua y su aplicación local al Área de Doñana.

El agua en el terreno es el resultado de la penetración (infiltración) de la precipitación atmosférica y de aguas superficiales. Como explica el *Cuadro 3.2*, este agua en parte se acumula y fluye por la zona superior del terreno (suelo edáfico), de donde puede ser extraída por las raíces de la vegetación. El resto se acumula en el medio saturado.

El agua del medio saturado es el agua subterránea que se acumula y fluye por acuíferos y acuitardos, según se explica en el *Cuadro 3.3*. El

Cuadro 3.1 (a)





conjunto de terrenos saturados por los cuáles fluye el agua se denomina sistema acuífero, como el existente en el Área de Doñana.

El agua que reciben estos sistemas acuíferos, que se llama recarga, luego se descargará en ríos,

humedales y el mar, o se transpirará si es tomada por plantas capaces de llegar y succionar agua del medio saturado. Estas plantas se denominan freatofitas. En el Cuadro 3.4 se describe qué es la recarga.

El agua en el terreno

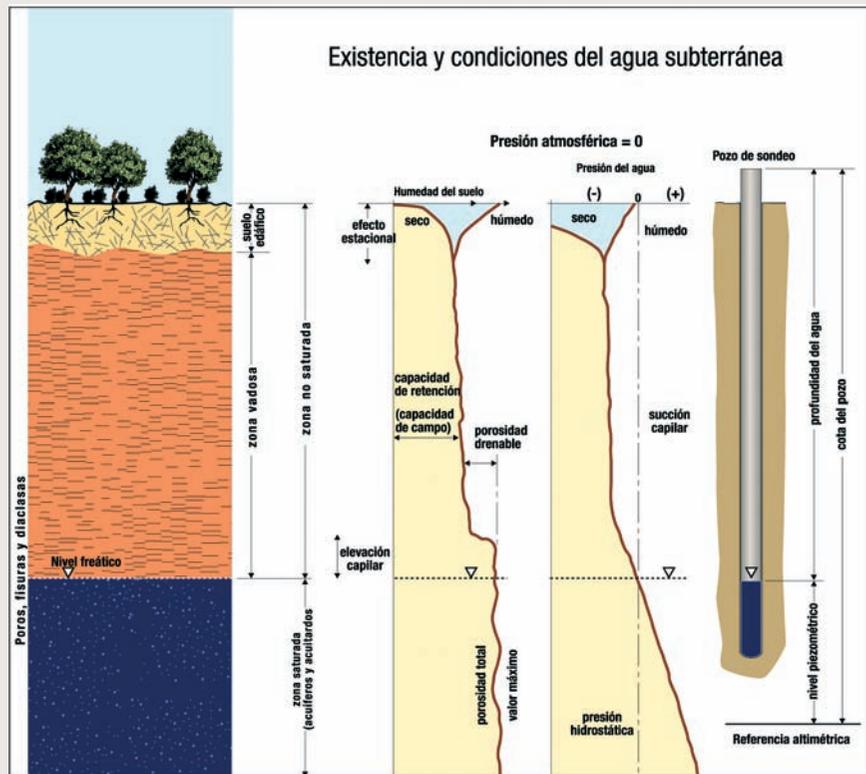
El terreno tiene poros y fisuras, los cuáles pueden estar totalmente ocupados por agua –medio saturado– o sólo parcialmente –medio no saturado o vadoso–, siendo el resto aire en conexión con la atmósfera exterior. En el medio saturado, por debajo de un límite superior que está a presión atmosférica, llamado nivel freático, el agua está a presión hidrostática. Por encima del nivel freático, en el medio no saturado, el agua está sometida a esfuerzos capilares y de tensión superficial que equivalen a tener una presión menor que la atmosférica (esta situación se denomina succión). Este agua no fluye hacia las perforaciones ya que está en succión respecto a la presión (igual a la atmosférica) del interior de la perforación, pero circula hacia el nivel freático si es desplazada desde arriba por nueva agua procedente de la parte superior, o sea de la base del suelo edáfico (aquella parte del suelo en que están las raíces de las plantas). Esto se esquematiza en la figura.

La parte superior del medio no saturado, donde están las raíces de las plantas –suelo edáfico– es donde la vegetación puede extraer, por efecto osmótico, la humedad que necesita y que se transpira por las hojas. La humedad del suelo edáfico varía entre un valor máximo no drenable, llamado capacidad de retención, y un valor mínimo, llamado punto de marchitez, por debajo del cual las plantas ya no pueden extraer el agua.

Si en el medio no saturado existen intercalaciones de terreno de baja permeabilidad suficientemente extensas, éstas pueden retener el agua de infiltración tras las lluvias, formando un cuerpo de terreno saturado de agua en el seno de la zona no saturada. Estos cuerpos suelen ser temporales y duran entre unas semanas y algunos meses, aunque a veces son permanentes, aunque variables. Se denominan acuíferos colgados. Los acuíferos colgados pueden descargar en manantiales locales, temporales o semipermanentes, y suelen originar o mantener humedales.

Aplicación a Doñana

En Doñana el medio no saturado es en general poco potente (espeso), desde cero (en humedales, lagunas) hasta unos pocos metros, de modo que la recarga al medio saturado es en general relativamente rápida (ver Cuadro 3.4). Hay plantas cuyas raíces están siempre en el medio no saturado y dependen de la estacionalidad de las lluvias, como las que forman el monte blanco. Otras plantas tienen las raíces lo suficientemente profundas para llegar a la zona capilar –parte saturada por elevación capilar por encima del nivel freático– y aún a la zona saturada, y por lo tanto no sufren la estacionalidad en la disponibilidad de agua salvo que haya grandes fluctuaciones del nivel freático. Son plantas freatofíticas, como las que forman el monte negro, y los eucaliptus introducidos por el hombre en el área –hoy parcialmente erradicados–.





Arriba, vista del bosque de ribera de La Rocina (marzo 1990). Debajo, descarga de agua subterránea en La Vera, al arroyo de La Caquera, junto a la Casa de Los Guardas (abril 1991). Fotos: EC.

En el Área de Doñana destacan claramente los tres componentes principales del ciclo hidrológico. El más fácil de apreciar y el que tiene mayor impacto en el visitante es el agua superficial, tanto por su presencia cuando inunda temporalmente la vasta extensión de la marisma del



Guadalquivir, como por su ausencia al dejar una amplia llanura seca en verano. Se trata principalmente de agua de lluvia caída localmente y de agua que escurre temporalmente desde las cuencas vertientes a la marisma, que en parte están fuera del Área de Doñana. Buena parte de los aportes exteriores proceden o procedían de la cuenca alta y media del río Guadamar y de los reboses del río Guadalquivir. Ambos aportes están hoy controlados antrópicamente, hasta cierto punto, mediante obras de ingeniería hidráulica, como el embalse del río Agrío en la cabecera del río Guadamar o las canalizaciones del río Guadalquivir. En la *Figura 3.1* se muestran los principales cursos fluviales y las cuencas vertientes al Área de Doñana.

Otra componente importante es el agua subterránea, ya que gran parte del territorio que rodea a la marisma son arenas más o menos permeables que están saturadas de agua hasta las proximidades de la superficie del terreno. Sus características se comentan con detalle más adelante.

El tercer componente importante del ciclo del agua en Doñana, a menudo no tenido en cuenta, es el agua edáfica, también llamada por divulgadores actuales como agua verde (Falkenmark y Rockström, 2006; Llamas, 2005), en contraposición al agua movilizable (agua azul) y al agua degradada (agua gris). El agua edáfica es el agua contenida en la parte superior del suelo y disponible para las plantas, que la toman y transpiran. Es esencial para la existencia y el ciclo vital de la vegetación natural y también para los cultivos de secano. Depende totalmente de la precipitación atmosférica, o en su caso del aporte artificial (riego) que pueda hacerse a partir de agua movilizable. El agua edáfica no es converti-

Aguas subterráneas, acuíferos y sistemas acuíferos

Podrían llamarse aguas subterráneas a todas las que se encuentran bajo la superficie del terreno, pero esta denominación se reserva para los medios saturados, incluidos los acuíferos colgados. Así pues, son aguas subterráneas las situadas por debajo del nivel freático.

Si el medio saturado permite un movimiento más o menos lento del agua que contiene se le llama **acuífero** (medio permeable). En un acuífero es posible captar, mediante pozos, caudales de agua subterránea de interés en el contexto local. Cuando el movimiento del agua es muy lento al medio saturado se le denomina **acuitardo** (medio semipermeable). En un acuitardo no es posible captar mediante pozos caudales de agua subterránea de interés en el contexto local. Cuando el agua contenida es prácticamente inmóvil al medio saturado se le llama **acuicludo** (medio impermeable, aunque puede contener importantes cantidades de agua). Si el medio no contiene agua se trata de un **acuífugo**.

En la naturaleza el medio subterráneo es heterogéneo, tanto en sentido horizontal como en sentido vertical, de modo que coexisten acuíferos, acuitardos y acuicludos. El conjunto, en especial el de los acuíferos y acuitardos, se llama sistema acuífero, término que incluye las conexiones con las aguas superficiales. Un acuitardo situado encima o bajo un acuífero, dada la gran superficie de contacto entre ellos, puede tomar o ceder importantes cantidades de agua a los acuíferos, con flujo predominantemente vertical, y contener una fracción importante del total de agua subterránea almacenada.

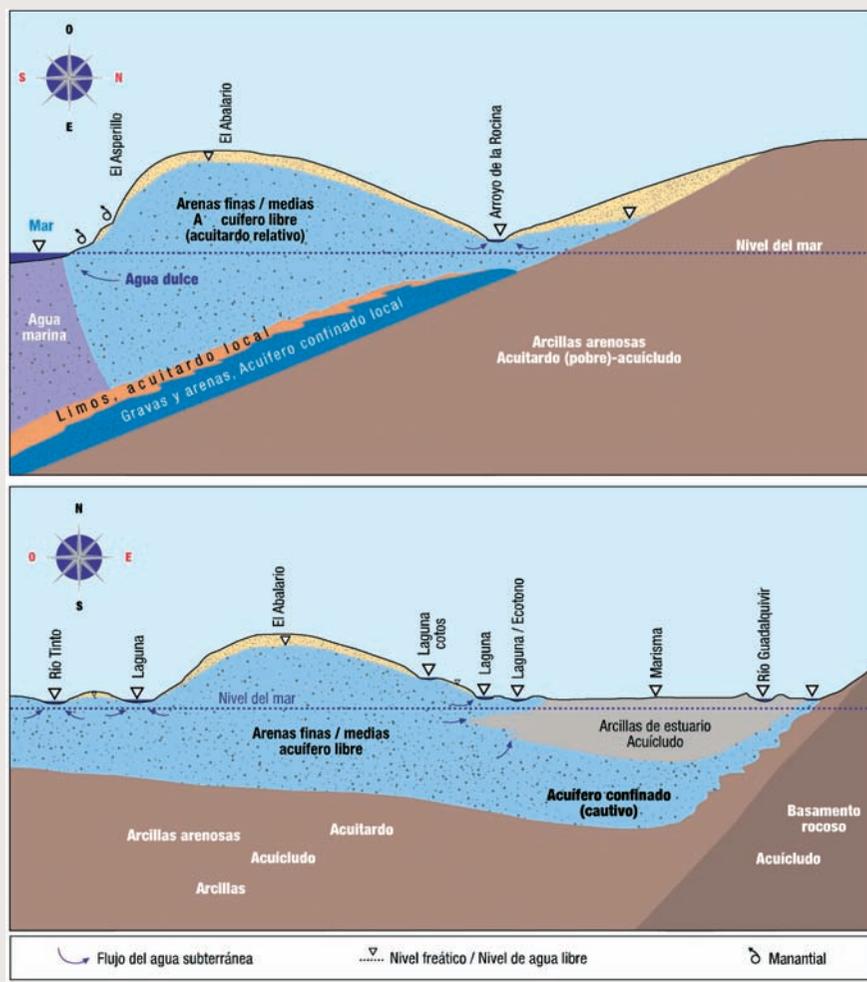
Se llaman reservas (almacenamiento) de agua subterránea de un acuífero, acuitardo o sistema acuífero, al total de agua contenida, o sea el volumen de material sólido por su porosidad. Este valor es uno o varios órdenes de magnitud mayor que la cantidad de agua que se renueva anualmente por recarga–descarga. Ello permite suavizar o incluso hacer imperceptibles las fluctuaciones estacionales, y aún las de una secuencia de periodos secos y húmedos.

Se llama **acuífero libre** o **acuífero freático** a aquel que está limitado superiormente por la superficie freática (en la cual el agua está a la presión atmosférica) y recibe directamente la recarga por la lluvia o por infiltración de aguas superficiales, si ello es posible.

Se llama **acuífero cautivo** o **acuífero confinado** a aquel que por encima de su techo tiene una formación de baja permeabilidad y la presión allí es superior a la atmosférica. Por lo tanto, al efectuar una perforación en un acuífero cautivo el nivel del agua en la misma se sitúa por encima del techo del acuífero, pudiendo incluso llegar a surgir por encima de la superficie del terreno si la presión es suficiente (se denomina **acuífero / pozo surgente**). Cuando la formación a techo o en la base del acuífero es un acuitardo, por el mismo puede entrar o salir cierta cantidad de agua y entonces se habla de un **acuífero semi-confinado**.

Aplicación al Área de Doñana

En Doñana, gran parte del territorio fuera de la marisma es un acuífero libre y recibe recarga directa de la lluvia. Pero en ciertas áreas, como en el sector de arenas situado entre la marisma y El Abalarío, existe una capa de arcillas profunda intercalada con otros sedimentos, la cual recubre un nivel permeable de gravas. Estas gravas constituyen un acuífero semiconfinado y el recubrimiento de arcillas constituye un acuitardo. Sobre el acuitardo existen arenas finas de menor permeabilidad que las gravas inferiores, que según se consideren pueden calificarse de acuífero pobre o de acuitardo, pues se trata de términos relativos. En la marisma hay un gran espesor de arcillas, a modo de acuicludo, que recubre un acuífero cautivo profundo, el cual enlaza lateralmente con el acuífero libre del resto del territorio. Todos estos sedimentos están en contacto entre sí y el agua que contienen puede pasar de unos sectores a otros, aunque se mueva a distinta velocidad en zonas distintas. Por ello el conjunto se considera un sistema acuífero.



Recarga a los acuíferos

La recarga a los acuíferos es la cantidad de agua que llega a los mismos por flujo vertical desde la superficie del terreno –acuíferos libres– o por transmisión lateral desde otros acuíferos, o desde la zona del terreno donde afloran, como es el caso de los acuíferos cautivos (*ver Cuadro 3.3*). En el caso de acuíferos libres se puede hablar de recarga difusa, como la que se produce por la precipitación, y recarga concentrada, la cual se debe a la infiltración de ríos, canales, lagos, etc. Si hay regadío, éste equivale a un aumento artificial de la precipitación sobre el terreno agrícola. No toda el agua aplicada en el riego (más la lluvia) se evapotranspira, existiendo un exceso que se recarga (excedente de riego). En el caso de extensiones grandes de terreno la recarga por excedentes de riego ocurre de forma difusa.

Hay que distinguir entre el agua infiltrada que llega a la base del suelo edáfico (profundidad de las raíces) y la que llega al nivel freático (zona superior de la franja saturada), ya que se necesita un tiempo para la transferencia vertical entre una y otra zona. Esta transferencia supone un retraso y una suavización de las fluctuaciones de la precipitación. El efecto hidráulico de la recarga (aumento de humedad en la zona no saturada que acaba traducándose en un aumento del nivel freático) depende de las propiedades hidráulicas del medio vadoso, la profundidad de dicho nivel freático y la estratificación, y puede tardar entre días y meses. Pero físicamente el agua se mueve mucho más despacio, y esto tiene interés para evaluar los procesos de contaminación distribuidos, como los agrícolas, y también para entender la disponibilidad (para los ecosistemas) del agua que está en tránsito vertical por la zona no saturada.

En ausencia de fisuras funcionales, suponiendo que la nueva agua recargada desplaza el agua vadosa existente (flujo de pistón, o movimiento similar al que se produciría si el agua fuese empujada por un pistón), el tránsito puede durar de meses a muchos años. Si H = espesor de la zona no saturada, con h = humedad volumétrica media de esa zona vadosa y R = recarga, el tiempo de tránsito vale $t=H\cdot h/R$.

Aplicación al Área de Doñana

Dando valores a las variables H , h y R en la expresión anterior que sean razonables para las condiciones del Área de Doñana, se obtiene información que es útil para entender cómo cabe esperar que se comporte el medio. Por ejemplo, en las zonas con el nivel freático muy cerca de la superficie del terreno (entre 0,1 y 1 m) el tiempo de tránsito por la zona no saturada del agua (y de los solutos, incluyendo los contaminantes, que no se adsorban en el terreno, ni precipiten ni se degraden) es corto, entre dos meses y algo menos de dos años. Estas condiciones son asimilables a zonas del manto eólico cercanas a la marisma y a La Rocina. Si el nivel freático está a 10 m de profundidad el tiempo de tránsito está diferido a unos 16 años, lo que hace que tanto el efecto de recuperación de niveles freáticos tras la recarga como la incorporación de contaminantes a la zona saturada se observen con retraso. Si el nivel freático estuviese a 100 m de profundidad el agua tardaría 100 años en llegar a la zona saturada, lo que significa que la aparición en el agua de un hipotético contaminante que viajase a la misma velocidad que el agua no sería observada por la misma generación humana que lo generó, sino por otra posterior.

ble en agua disponible para otros usos, pero no por eso deja de ser esencial al territorio y a sus valores naturales y de aprovechamiento económico.

El agua contenida en los productos agrícolas, pratenses y forestales, no ya como agua sino como alimento, es un recurso humano y ganadero que se puede usar en otros lugares, y al cual se denomina agua virtual (Allan, 1993).

Existen grandes diferencias entre estas vías naturales del ciclo hidrológico que se deben con-

siderar y aprovechar, tanto para la actividad humana de obtención de agua y de uso del territorio, como para la protección del medio natural. Esto se refleja en la *Tabla 3.1*. De ella merece la pena destacar que el componente con mayor capacidad de almacenamiento de agua y mayor distribución espacial, la parte subterránea del ciclo hídrico, es también el que tiene una menor renovabilidad y una mayor variabilidad espacial y temporal en la tasa de renovación. Esto debe ser

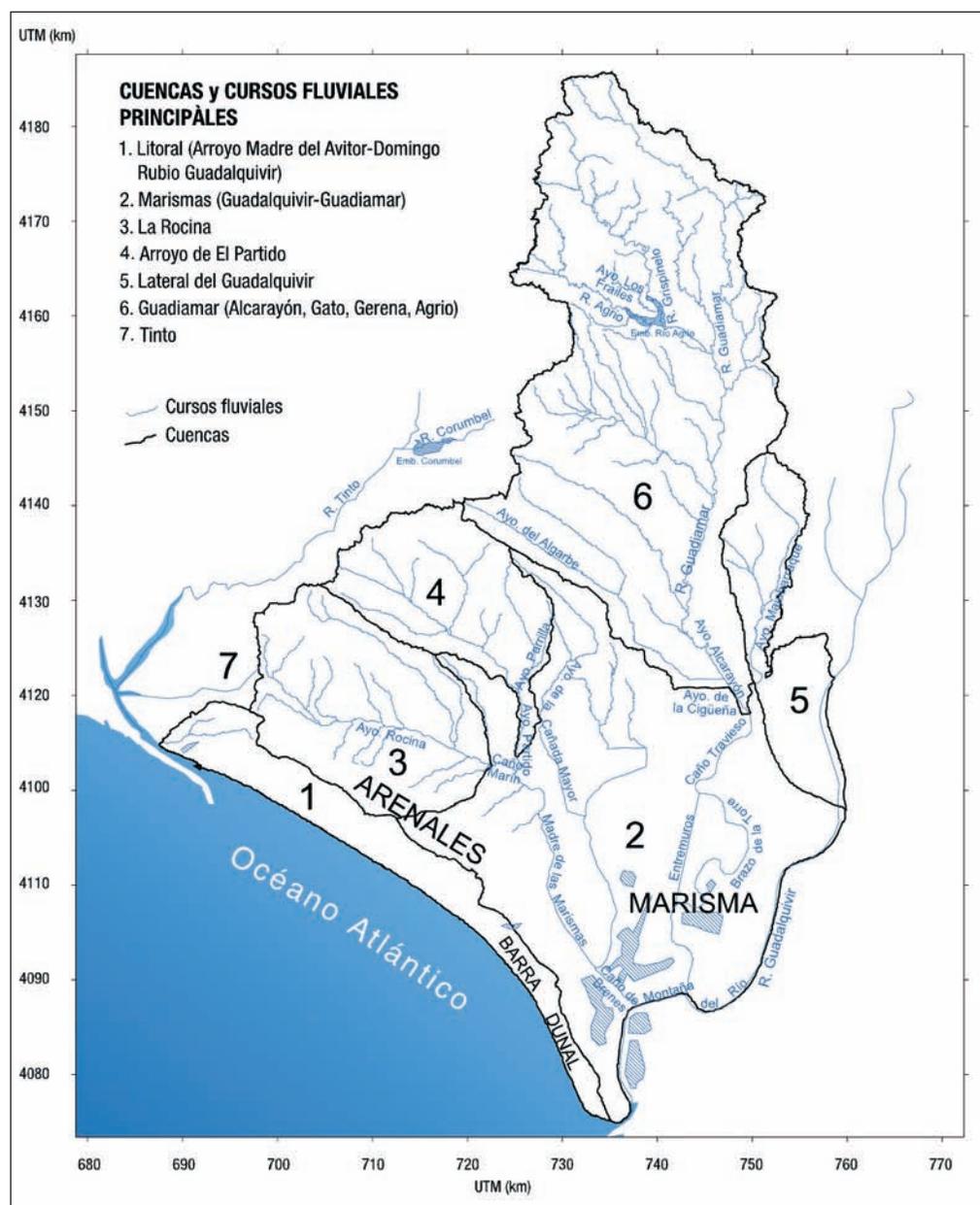


Figura 3.1.

Cursos fluviales y sus cuencas vertientes al Área de Doñana. No incluye las cabeceras y márgenes externos de los ríos Guadalquivir y Tinto, que son los que cierran el contorno lateral. Las zonas 1, 2, 3 y 4 están dentro del Área de Doñana, la 7 lo está parcialmente y la 6 es mayoritariamente externa y la 5 externa.

tenido en cuenta en la gestión. En la *Tabla 3.2* se muestra el destino del agua continental aportada por la precipitación.

La variabilidad pluviométrica estacional e interanual afecta mucho a las aguas superficiales

y edáficas, que menguan o desaparecen en periodos secos. Esto da origen a serios problemas humanos en épocas de sequía. Por el contrario, las aguas subterráneas están mucho menos afectadas, dado el gran volumen asociado, salvo que se trate

Tabla 3.1. Características de las vías continentales del ciclo hidrológico en el Área de Doñana.

Vía	Renovabilidad / Variabilidad	Almacenamiento natural	Territorialidad
Superficial	alta (días a meses)	pequeño (salvo lagos)	localizada
Edáfica	alta (meses)	moderado	extensiva
Subterránea	baja (años a muchos años)	muy grande	extensiva

Tabla 3.2. Destino del agua continental aportada por la precipitación al Área de Doñana. Valores medios, variables de un año a otro, en porcentaje respecto a la lluvia. Se excluye la marisma.

Agua en el ciclo hidrológico	origen	% de la precipitación sobre arenas:		Destino	Uso humano directo
		eólicas	fluviomarinas		
Superficial	Lluvia	<5	5–10	Escurrentia a la marisma y lagunas	No
Edáfica	Lluvia	65–80	80–90	Mantener la vegetación	No
Subterránea	Lluvia	15–30	5–10	Descarga en arroyos, lagunas y manantiales	Intenso

Caño descargado agua subterránea en el ecotono de La Vera. El color rojizo es debido a la generación de óxidos férricos por oxidación del ión ferroso disuelto en el agua. Este ión ferroso procede de la disolución de la pátina ferruginosa de las arenas en las áreas de recarga donde hay abundante materia orgánica.

Foto: CMA. JA.



de aluviales o acuíferos de reducido tamaño o manifestaciones marginales de las aguas subterráneas. Así, en áreas próximas a Doñana, y en la propia Área de Doñana, las sequías suponen mermas serias en caudales (tributarios a la marisma, río Guadiamar, incluso el río Guadalquivir) y en

manifestaciones hídricas (lagunas, marismas continentalizadas, vegetación no freatofítica).

Estas sequías pueden pasar casi desapercibidas en áreas con explotación de aguas subterráneas y sus manifestaciones varían poco (manantiales y rezumes). Sin embargo, el almacenamiento asociado a las aguas subterráneas no es infinito, y por lo tanto una extracción intensiva prolongada, además de suponer una redistribución de las descargas naturales a cauces, lagunas y áreas freatofíticas, puede ir haciendo decrecer las reservas almacenadas de forma continuada, como se comenta en el *Capítulo 8*. Por ello surge la necesidad de considerar la sustentabilidad de esas explotaciones a medio (años) y largo (décadas) plazo.

La respuesta de los acuíferos a fluctuaciones climáticas y a perturbaciones antrópicas del equilibrio hidrodinámico (como son las extracciones) es en general lenta o muy lenta. En el caso del sistema acuífero del Área de Doñana el tiempo medio de respuesta es de décadas (*ver Capítulo 8*),

lo que quiere decir que las fluctuaciones se amortiguan en gran manera, que el efecto de una sequía prolongada puede no hacerse aparente hasta el final de la misma o incluso modificar un periodo húmedo siguiente, o que el impacto de unas extracciones no se haga patente hasta transcurridas algunas décadas.

Entre las vías superficial y subterránea del ciclo hidrológico existen conexiones, que en el Área de Doñana consisten principalmente en descargas de agua subterránea. El agua subterránea alarga el hidropериодо (frecuencia de aparición y permanencia del agua) de las zonas encharcadas y encharcadizas, que mantienen habitats húmedos permanentes para refugio de la fauna residente y que sustentan una flora característica. Estos son aspectos que eran mal conocidos antes de la década de 1980 y que fueron en buena parte ignorados o menospreciados en los planes de desarrollo agrícola y territorial de la zona. Dado que a efectos prácticos la recarga actual es la misma que entonces –salvando pequeñas diferencias por cambios en la vegetación y por descenso del nivel freático–, como se expone en el *Capítulo 8*, el agua subterránea que se extrae y no vuelve al acuífero –que es la mayor parte de la utilizada en el regadío y la destinada a usos urbanos que luego se vierten a cauces y no se reinfiltan, terminando en el mar– es detráida de la descarga natural, y por lo tanto no está ya disponible para su función ecológica. Aquí nace un conflicto de intereses, con características e intensidad que varía de un lugar a otro del territorio del Área de Doñana, y cuya apreciación social ha ido cambiando a lo largo del tiempo.

Lo anteriormente expuesto se centra en el aspecto “cantidad” de agua. Sin embargo, el as-



pecto de “calidad”, o de composición química y físico química de las aguas, es también de importancia clave por cuanto afecta a la vegetación, a la fauna y al propio ser humano, como se comenta en los *Capítulos 7 y 9*. Un aspecto relevante, pero aún mal conocido y preocupante, es el impacto de la actividad humana en la calidad del agua. La agricultura y la población aportan nutrientes y contaminantes al sistema hídrico superficial, directamente o a través de la descarga de los sistemas subterráneos, en este último caso con una aparición que puede estar muy diferida en el tiempo y modificada, dando la falsa impresión de que tras una cierta actuación no sucede nada negativo.

Otro aspecto de la calidad de las aguas superficiales, muy importante para el funcionamiento de los ecosistemas, es la generación y aporte de sedimentos. El arrastre de sedimentos, que en buena parte es debido a prácticas agrícolas y a cambios en la cobertura vegetal del terri-

Vista de la Laguna de Santa Olalla (abril 1989).Foto: EC.

torio, produce turbidez y deteriora las condiciones de la vida acuática. El impacto es mayor en la parte superficial del ciclo hídrico y también en la altamente productiva zona hiporreica, que es la franja de un cauce que se encuentra justo por debajo de la superficie del terreno, donde intercambian agua y solutos los flujos superficiales y los subterráneos. Además, se modifica el territorio (pérdida de terreno aguas arriba en las cuencas, pérdida de cauces y cubetas aguas abajo) y los procesos hídricos que ocurren en ese territorio (aumento de la arroyada superficial, fragmentación de cubetas y relleno de las mismas, desconexión entre masas de agua, etc). Esto tiene un serio impacto en las áreas llanas de marisma. Como ejemplo, el arrastre de arenas por el arroyo del Partido procedentes del área de transformación agrícola de su cuenca está creando un delta interno que está próximo a aislar la marisma de El Rocío del resto de la marisma, al estrangular el paso del arroyo de La Madre de las Marismas.

Laguna Redonda, al oeste de El Abalarío. Recibe agua de lluvia, ya que el nivel freático está deprimido por los bombeos de Mazagón–Moguer. Antes era freática. Foto: EC.



El sistema acuífero de Doñana: aspectos hidrogeológicos

El sistema acuífero de Doñana está formado por el conjunto de todos los materiales arenosos, de gravas y también de limos y de arcillas que se detallan en el apartado de geología (*Capítulo 2*), con espesores que oscilan entre nullos cerca del borde norte hasta algo más de 150 m en la zona costera central. Físicamente se extiende desde la franja Rociana–Almonte–Villamanrique de la Condesa hasta el mar, y desde aproximadamente el río Tinto hasta la margen izquierda del río Guadalquivir, donde se reduce ya solo a una estrecha faja al pie de los afloramientos de materiales arcillosos del Mioceno Subbético y otros terrenos más antiguos del borde oriental de la depresión del Guadalquivir (Salvany y Custodio, 1995). La extensión total es de unos 2600 km², lo que significa que se trata de un sistema de grandes dimensiones. Su funcionamiento se detalla en los *Capítulos 7 y 8*.

Desde el punto de vista de la gestión oficial, tradicionalmente ha sido conocido como Acuífero 27 (antigua nomenclatura del IGME) y actualmente es designado acuífero 0551, en la parte que corresponde a la Demarcación del Guadalquivir, que es la parte más grande, y acuífero 0414 en la parte que corresponde al Distrito Tinto–Odiel–Piedras, que es una pequeña sección en el sector occidental del acuífero. Esto se debe a que los límites del sistema acuífero no coinciden con los de una cuenca hidrográfica única, pero no significa que la gestión esté segmentada. En la práctica, comúnmente se le denomina Unidad o Acuífero Almonte–Marismas, o simplemente Acuífero de Doñana, tendiéndose

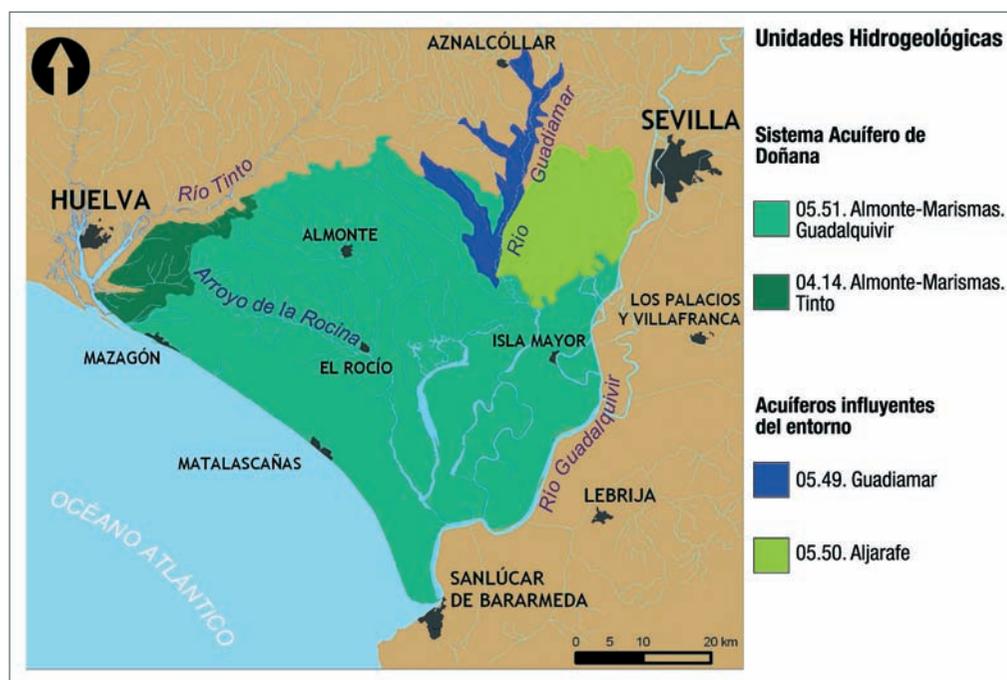


Figura 3.2.

Designación de las diferentes unidades hidrogeológicas en Doñana según lo establecido por el IGME (1998). Se trata de una designación hidrogeológica simplificada para los trabajos de la Administración.

04 hace referencia a la Cuenca del Guadiana y 05 a la Cuenca del Guadalquivir. El acuífero de Doñana tiene dos sectores con distinta designación, 0551 y 0414, por encontrarse cada uno vinculado a la Administración de una de esas cuencas originariamente. El acuífero del Aljarafe (unidad 0550) tiene un origen y composición geológica similares al sector norte del acuífero de Doñana, pero no está conectado hidráulicamente con éste (al menos en superficie), aunque sí influye sobre la marisma.

El acuífero aluvial del río Guadalquivir transfiere una pequeña fracción de agua al de Doñana justo antes de entrar a la marisma, debido a que los bombeos agrícolas mantienen deprimidos los niveles piezométricos del acuífero de Doñana. La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir ha mantenido esta misma nomenclatura en su definición de masas de agua subterránea para dar cumplimiento a los objetivos de la Directiva Marco del Agua. El sector del acuífero antes gestionado por la Confederación del Guadiana lo es hoy por la Agencia Andaluza del Agua y pertenece al Distrito Tinto-Odiel-Piedras.

hacia ésta última denominación. La Figura 3.2 indica los límites de las diferentes unidades hidrogeológicas y su denominación.

Oficialmente el Acuífero de Doñana tiene como límite oriental el río Guadalquivir, aunque en realidad, como se acaba de exponer, los sedimentos que forman parte del relleno del antiguo estuario se extienden un poco más al este. El límite oficial excluye esa franja oriental porque ahí el acuífero es pobre y contiene esencialmente agua salobre y salina. No obstante, se trata de una zona poco conocida por la escasa existencia de sondeos y, en parte debido a la existencia de agua salina, y en mayor medida a la dificultad de acceso.

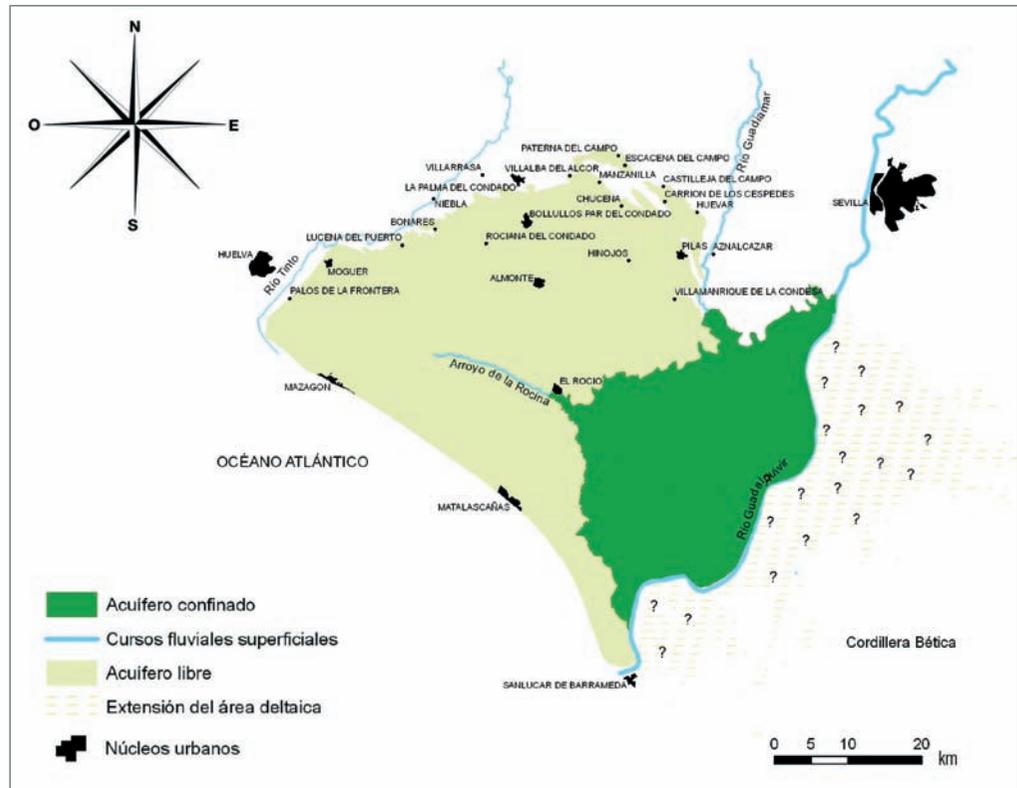
La parte del sistema acuífero formada por sedimentos esencialmente arenosos en su superficie (*materiales de las unidades Deltaica y Eólica*, ver el

apartado de geología en el Capítulo 2) recibe directamente la recarga de la lluvia y se comporta como un acuífero libre. La parte del sistema acuífero formada por arenas y gravas (materiales de la Unidad Aluvial) recubiertas por arcillas (Unidad de Marisma) está confinada (ver Figura 3.3). Dos tercios de la extensión total (1744 km²) corresponden a acuífero libre y un tercio (884 km²) corresponde a acuífero confinado.

No todo el sector de acuífero libre es un buen acuífero (calificativo que se aplica al terreno que transmite el agua a velocidad suficiente como para que sea extraíble por bombeo), sino sólo la parte situada al sur de la franja entre Villamanrique de la Condesa y El Rocío y desde el arroyo de La Rocina al mar y hasta Moguer. En el área de El Abalarío la parte inferior del acuífero contiene capas de arenas gruesas, gravilla y gravas,

Figura 3.3

Acuífero de Doñana y extensión de las áreas de comportamiento libre y confinado bajo la marisma. Por el este el límite administrativo es el río Guadalquivir, aunque éste no influye en el acuífero por discorrir sobre un grueso paquete arcilloso de marismas. Los sedimentos de estuario y marisma se extienden por el lado izquierdo del Guadalquivir, pero la parte acuífera se limita a una pequeña franja que es menos permeable y en buena parte contiene agua salada, razón por la cual no se incluye en el Acuífero de Doñana. La mitad norte del área libre del Acuífero de Doñana es de pobres características hidráulicas debido a la escasa permeabilidad de los materiales y al pequeño espesor del acuífero. En cambio sí existe una buena red de cursos fluviales que la atraviesan de noroeste a sureste casi por completo (ver Figura 3.1).



que son las que aprovechan principalmente los pozos, como muestra la Figura 3.4. Esas arenas gruesas, gravillas y gravas están bajo las arenas finas–medias fluvio-marinas de la parte intermedia y profunda de la Unidad Eólica y se comportan como un medio débilmente semiconfinado, siendo el semiconfinante las arenas fluvio-marinas. Algo similar sucede dentro de las propias arenas eólicas en el área situada entre El Abalarío y el contacto arenas–marismas, incluyendo a Matalascañas, donde un nivel arcilloso las divide en dos capas, quedando la inferior con carácter semiconfinado.

En su extremo nororiental los materiales del Acuífero de Doñana entran en contacto con los sedimentos del valle aluvial del río Guadiamar y

con los de las formaciones arenosas del Aljarafe, los cuáles constituyen acuíferos distintos (ver Figura 3.2).

La recarga al sistema acuífero se produce casi exclusivamente por infiltración difusa de la lluvia local. En las zonas irrigadas también existe infiltración de los retornos de riego, en cantidad pequeña respecto al aporte de la lluvia, y en las poblaciones existe algo de infiltración de aguas procedentes de pérdidas en las redes de distribución. Pero como en ambos casos se trata de aguas extraídas localmente del acuífero, esta infiltración no genera una contribución neta a la recarga del acuífero. Sólo en el sector nororiental del acuífero existe una pequeña contribución de agua subterránea de origen no atmosférico di-

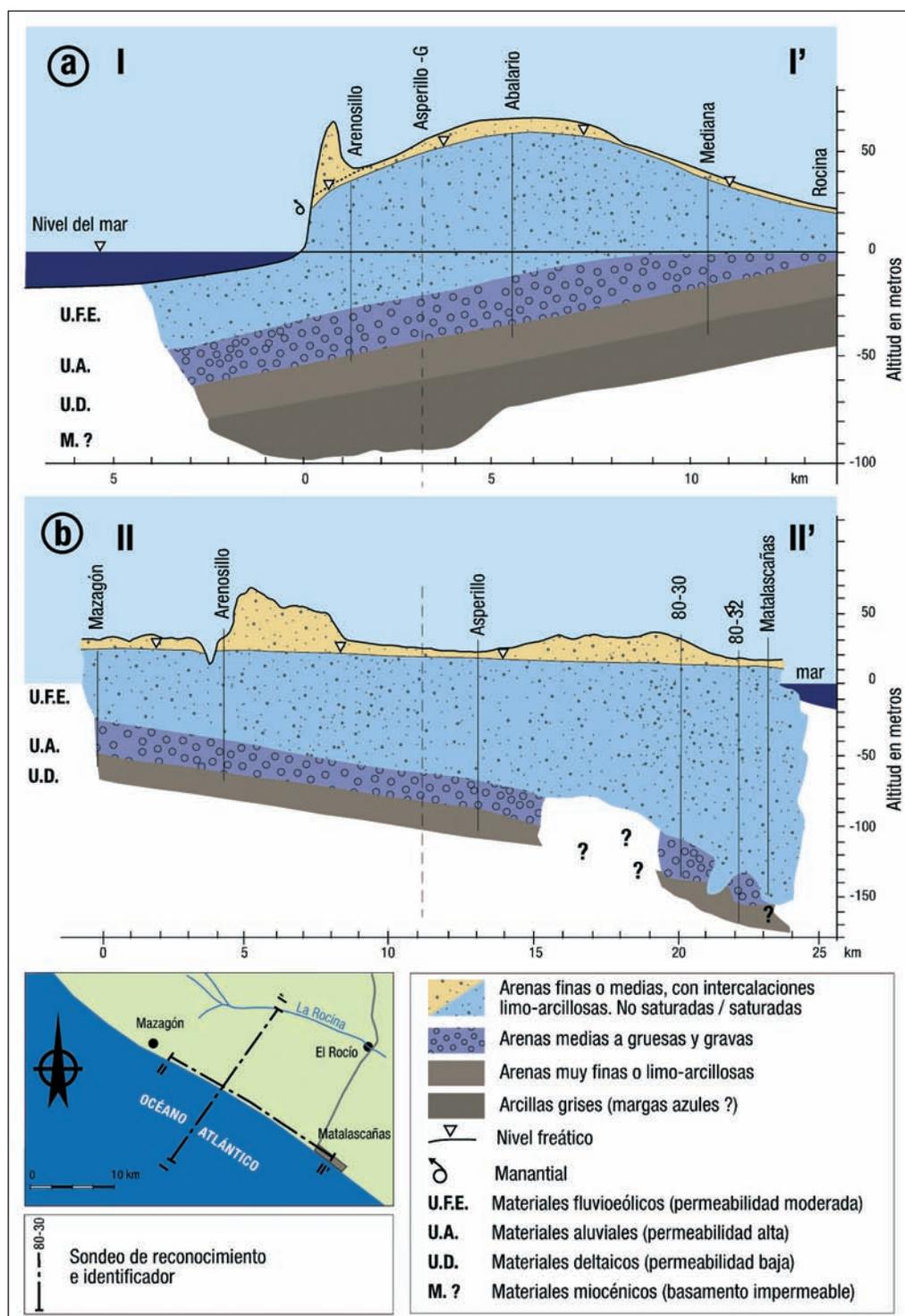


Figura 3.4.

Secciones hidrogeológicas por El Abalarío (a) y a lo largo de la costa entre Mazagón y Matalascañas (b). Según Trick y Custodio (1994). Bajo las arenas finas fluvio-marinas, con recubrimiento de arenas eólicas, existen capas de arenas gruesas y gravillas más permeables, que se disponen sobre limos y margas azules que forman el substrato del acuífero. Las arenas tienen algunas capas intercaladas arcillosas. Esta disposición hace que el acuífero, que es libre en general, en detalle tenga un comportamiento diferenciado: la parte superior de las arenas constituye un acuífero libre de características hidráulicas pobres, las cuales otorgan semiconfinamiento a la parte inferior, que funciona a corto plazo como semiconfinada bajo arenas o bajo las capas arcillosas intercaladas. Así, el comportamiento a corto plazo (hasta meses) es diferente del comportamiento a largo plazo (años), cuando todo el conjunto se manifiesta como libre, y los descensos piezométricos profundos se repercuten en descensos del nivel freático.



Detalle de la costra ferruginosa desarrollada en el techo de las arenas pliocenas. La imagen es del acantilado de El Asperillo en el entorno de la Torre del Oro. La costra hace de horizonte poco permeable y favorece la descarga de agua subterránea por encima de ella, a veces en forma difusa y a veces concentrada en manantiales. Foto: EC.

recto, ya que en esa zona las intensas extracciones en las capas de arena y gravas del acuífero de Doñana (Unidad Aluvial) favorecen la transferencia de agua desde los sedimentos aluviales del río Guadamar, en contacto con los de Doñana en su tramo inferior, antes de entrar en la marisma (UPC, 1999).

El acuífero descarga continuamente al mar a lo largo de la costa, al río Tinto y sus afluentes y a La Madre del Avitorejo (salvo perturbaciones por las extracciones) por su borde noroccidental, a los arroyos principales que hay sobre la superficie del mismo (La Rocina y sus afluentes, El Partido y sus afluentes, La Mayor, del Algarbe, de Pilas,..), y a los ecotonos o franjas de contacto entre las arenas y la marisma, tanto de forma concentrada (caños, algaidas y ojos) como difusa (rezumes). Además, el acuífero alimenta extensas superficies vegetales con freatofitas, tanto naturales (monte negro y los bosques en galería que aún subsisten) como introducidas (principalmente eucaliptos allí donde no han sido erradica-

dos), y mantiene el agua de numerosas lagunas temporales y algunas permanentes, entre las cuáles destaca el conjunto Dulce–Santa Olalla–Las Pajas. Estas descargas naturales de agua subterránea, junto con los caños, cañadas, algaidas y arroyos asociados, son un elemento esencial para explicar la riqueza ecológica de Doñana. Desde hace unas pocas décadas existe también una importante descarga artificial mediante pozos, la cual constituye un recurso básico para la población estable, la agricultura de regadío y el turismo, pero ha modificado notablemente el ciclo natural del agua, con consecuencias importantes tanto sociales como ecológicas, como se expone en los *capítulos 8 y 9*.

El funcionamiento de un acuífero se caracteriza por un pequeño conjunto de variables que informan sobre la facilidad de los materiales que forman la matriz del acuífero para transmitir el agua a su través. Estos parámetros son: permeabilidad, porosidad drenable y transmisividad. La permeabilidad indica la facilidad con la que los materiales del acuífero dejan fluir el agua, y depende principalmente del tamaño de grano de los materiales del terreno y de la porosidad conectada. La porosidad total determina la capacidad de un terreno para almacenar agua, y la porosidad eficaz indica la facilidad de un terreno para dejar pasar el agua por gravedad (suele ser menor a la porosidad total, pues con frecuencia hay poros aislados o mal conectados que no permiten el drenaje). La transmisividad indica la facilidad del medio acuífero para transmitir el agua horizontalmente, y es igual a la permeabilidad por el espesor de medio saturado. Como las tres variables dependen básicamente de las características del medio sólido y éste suele variar espacialmente,

también el valor de esas variables cambia en el espacio para un mismo acuífero. Eso implica, entre otras cosas, que para usarlas en cálculos que representen la realidad hay que conocer su valor en distintos lugares de un acuífero, tanto en el espacio como en profundidad.

Las características hidráulicas del sistema acuífero de Doñana han sido estudiadas desde finales de la década de 1960 y mediados de la década de 1970, durante el estudio de los recursos hidráulicos del Bajo Guadalquivir realizado por FAO–Gobierno Español y después durante el desarrollo del Plan de Transformación Agraria Almonte–Marismas (PTAAM). En los pozos que fue construyendo el IRYDA se hicieron ensayos de bombeo cuidadosamente planificados y desarrollados, lo cual ha permitido reinterpretarlos posteriormente con técnicas más sofisticadas y obtener información adicional a la de aquél momento. No obstante, dado que el objetivo de los sondeos era la explotación, su diseño con múltiples zonas de admisión de agua a distintas profundidades del terreno proporciona una información promedio de las características hidráulicas del medio, pero no datos discretos de las distintas capas del acuífero. No obstante, es información útil como marco de referencia. La conservación, con mayor o menor adecuación, de testigos de sedimento de estos sondeos también ha permitido reinterpretar la estructura del acuífero y su variabilidad espacial desde un punto de vista hidrogeológico (Salvany y Custodio, 1995). Posteriormente se realizaron nuevos ensayos en pozos y sondeos con ocasión de recopilaciones (IGME, 1982; 1992) y de diversas tesis doctorales, los cuáles se recogen principalmente en Trick (1998) y Trick y Custodio (2004). La



mayoría de estos ensayos de bombeo se realizaron en sondeos diseñados con un solo tramo filtrante y distintas profundidades, como se muestra en el *Cuadro 4.2 del Capítulo 2*. Por primera vez esto ha permitido disponer de información hidráulica relativa a posiciones concretas del acuífero. Toda la información se ha reunido para la realización de los diferentes modelos numéricos de simulación del flujo de agua subterránea a escala del sistema acuífero existentes, realizados por el IGME (1995) y por la UPC (1999).

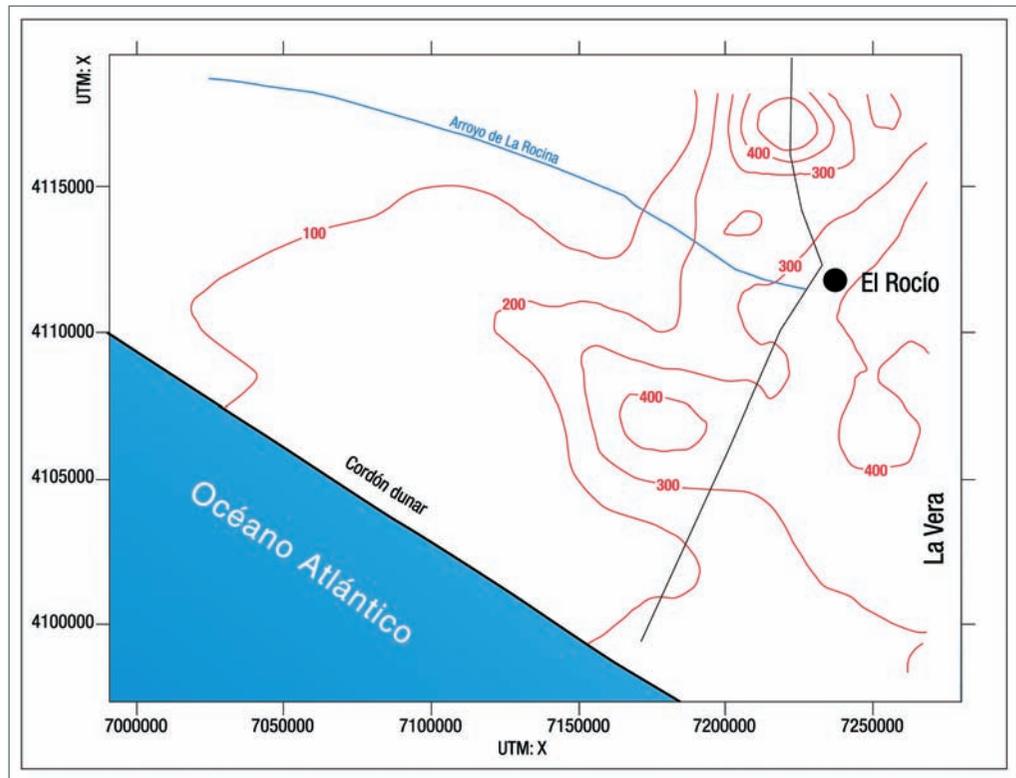
La porosidad total de las arenas está alrededor de 0,30 y 0,35, con una porosidad drenable que varía entre 0,10–0,15 para las arenas con una fracción de sedimentos finos (aumenta la retención de agua) y 0,15–0,25 para las arenas eólicas, que tienen tamaños de grano muy homogéneos (disminuye la retención). La permeabilidad puede variar entre 0,05–0,1 m/día para las arenas fluvio-marinas hasta 1 m/día para las arenas eólicas, y entre 10 m/día para las arenas gruesas y gravillas profundas y 30 m/día para las gravas que se encuentran en el entorno de El

Bloque de litoplintita arrancado del terreno cerca del límite occidental de la zona regable al sur de La Rocina. Este material se ha utilizado para formar la base de apoyo de edificaciones, como el Palacio del Acebrón, en La Rocina. La litoplinta consiste en arenas cementadas con óxidos férricos, dejados por el agua ascendente del terreno cuando el ión ferroso (Fe^{2+}) que contiene se precipita por efecto del oxígeno que se difunde desde la atmósfera.

Foto EC.

Figura 3.5

Mapa de transmisividades hidráulicas, en $m^2/día$, para las capas de arenas gruesas, gravillas y gravas confinadas bajo capas de arcillas, del área situada entre La Vera y la parte occidental de El Abalarío, incluyendo el entorno de El Rocío (modificado de Trick, 1998). La transmisividad hidráulica es el producto de la permeabilidad por el espesor del acuífero e indica la facilidad de movimiento horizontal del agua subterránea. Si se considera la transmisividad de todo el espesor acuífero (no sólo de las capas confinadas, que son las más permeables) se obtienen valores sólo algo mayores ya que las arenas que recubren a las capas profundas son poco a moderadamente permeables.



Rocío y en la parte confinada bajo la marisma. Desde el punto de vista de su calificación como acuífero, los materiales con los valores menores se pueden considerar como pobres, las arenas eólicas como moderadamente buenas y las gravas como buenas. En la *Figura 3.5* se muestra la distribución de la transmisividad hidráulica en el sector central del acuífero, entre El Abalarío, El Rocío y el océano. Se observa que los valores de transmisividad crecen desde el borde occidental y noroccidental de la marisma hacia el sector de acuífero confinado bajo ésta. Esto se debe al efecto conjunto de dos factores: la permeabilidad de los sedimentos que forman el acuífero crece en ese sentido, pues las arenas eólicas dan paso, bajo la marisma, a arenas gruesas y gravas aluvia-

les; y el espesor saturado también crece en ese sentido, ya que las capas de sedimentos se hunden hacia el sureste y el espesor total de acuífero aumenta.

En cuanto a las características hidroquímicas del Acuífero de Doñana, como se detalla en el *Capítulo 7* en la parte de funcionamiento libre del manto eólico, las aguas subterráneas son dulces y muy poco mineralizadas. La conductividad eléctrica está entre 150 y 300 $\mu S/cm$ y el contenido en cloruro entre 35 y 40 mg/L , con una cierta acidez (pH entre 5,5 y 6,5) debido a la naturaleza predominantemente silíceas de las arenas, con ausencia de carbonatos y otros minerales fácilmente hidrolizables, excepto en capas profundas en las que el flujo natural del agua subterránea

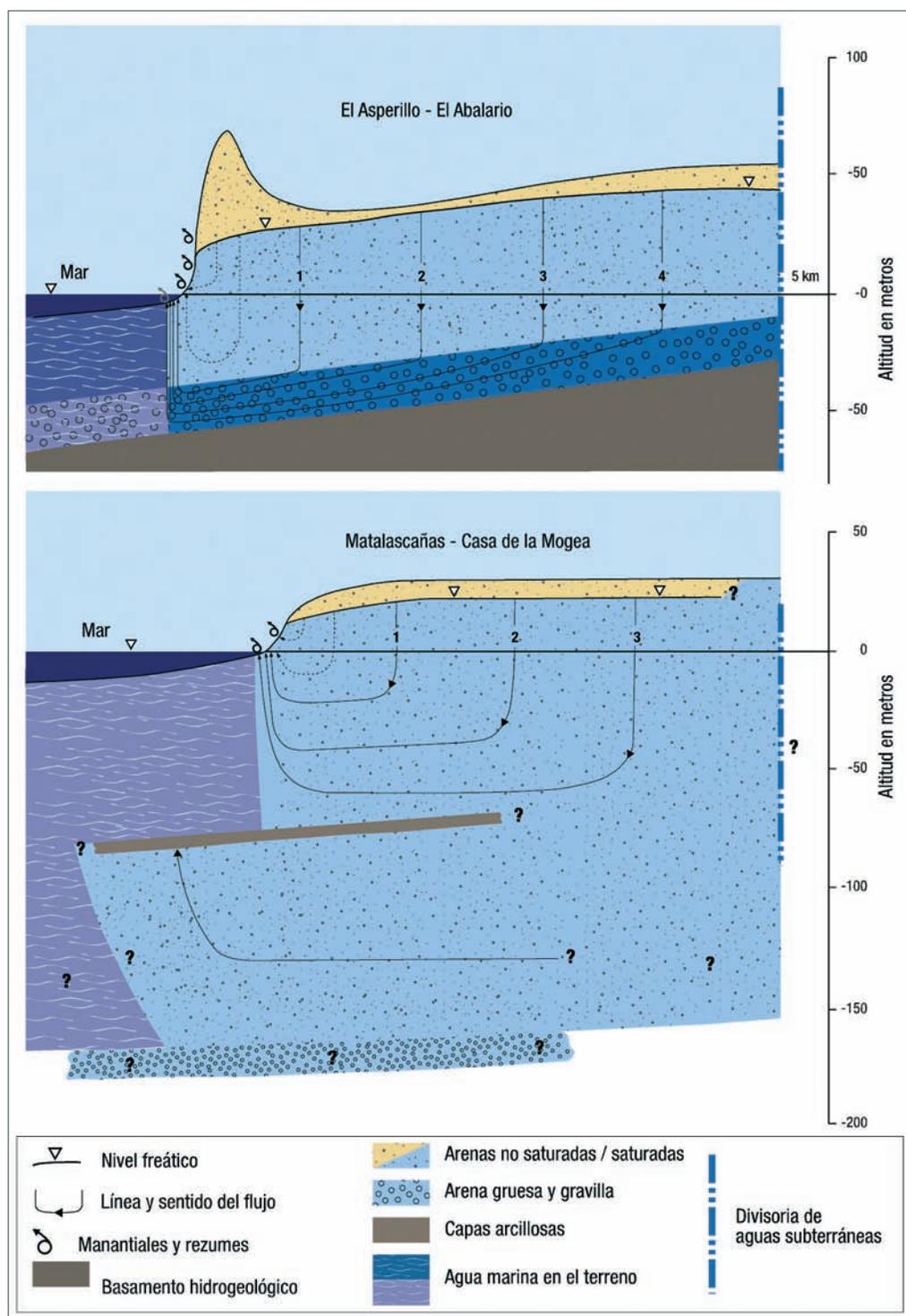


Figura 3. 6.

Esquematzación de las relaciones entre las aguas subterráneas y el mar en Doñana en dos secciones perpendiculares a la costa, una por El Abalarío (superior) y otra por Matalascañas (inferior) (modificado de Custodio, 1993). La relativamente pequeña permeabilidad de las arenas fluvio-marinas hace que en la costa el nivel freático ascienda relativamente deprisa. Eso mantiene la separación con el agua marina en el terreno, que es más densa, en una posición que penetra muy poco a partir de la línea de costa. Esto se mantendrá así mientras las extracciones de agua subterránea no cambien estas circunstancias, por ejemplo por un exceso de bombeo en Matalascañas.



Laguna del Navazo del Toro, al Norte de la carretera de acceso al Palacio de Doñana, en un año muy húmedo. La foto es de 1990. Foto: EC.

es muy lento. En estas áreas el contacto con el agua del mar es relativamente brusco y con muy poca penetración del agua salada respecto a línea de costa, por lo menos hasta donde hay datos, que son relativamente escasos, siempre y cuando las extracciones de agua subterránea sean moderadas (ver *Figura 3.6*).

No sucede lo mismo bajo la marisma, donde aún permanecen las aguas salinas (e incluso hipersalinas) que quedaron atrapadas en los sedimentos de estuario y albufera conforme éstos se iban depositando (ver *la parte de geología del Capítulo 2 y el Capítulo 7*). Estas aguas salinas no han sido desplazadas ni diluidas por las aguas dulces fluyentes desde la parte libre del acuífero (desde el norte y el oeste de la marisma) debido a que la mayor parte de estos flujos de agua dulce descargan a la superficie del terreno a lo largo de los contactos arenas-arcillas (marisma) y a la red fluvial, quedando el acuífero con niveles freáticos insuficientes para contrarrestar la mayor densidad del agua salina de las partes profundas del

acuífero confinado. Esto se muestra esquemáticamente en el *Cuadro 2.1*, del *Capítulo 2*.

El acuífero y el entorno de Doñana _____

El Acuífero de Doñana tiene unos límites naturales condicionados por la geología y las características hidrogeológicas y, como se ha dicho, físicamente rebasa la posición del río Guadalquivir hacia el este, extendiéndose un poco por la margen izquierda. En el apartado anterior se ha explicado porqué el límite oriental oficial, que es el río Guadalquivir, no coincide con el geológico. Se trata de uno de los mayores, si no el más grande, acuífero costero español, lo cual implica un elevado grado de complejidad tanto en lo relativo al funcionamiento como en lo relativo a la gestión.

Las delimitaciones de los municipios y de las áreas que tienen alguna figura legal de protección son diferentes y se han establecido con criterios distintos. Esto es lo que refleja la *Figura 3.7*. Así, sólo una parte de la superficie del acuífero de Doñana está bajo normas de protección, e incluso parte de lo que corresponde a las áreas de mayor recarga y mejores condiciones hidrogeológicas quedan fuera, como muestra la *Tabla 3.2*. Dado que una parte significativa del agua que se recarga en el acuífero libre fluye hacia el sector confinado, y que buena parte de ese agua descarga en los bordes de la marisma y en La Rocina (ver *funcionamiento del acuífero en Capítulo 7*), esto significa que las actividades que se realizan en las áreas no protegidas del territorio y que puedan originar un deterioro de la cantidad y/o la calidad del agua subterránea, antes o después ocasionarán un impacto negativo en las zonas que sí están protegi-

Tabla 3.3. Municipios cuyos territorios están en parte sobre la parte libre (freática) del Acuífero de Doñana y superficie que representan. La parte libre se extiende sobre 1748 km² y la parte confinada sobre 884 km². De la superficie total de acuífero libre, 551 km² tienen protección dentro del Espacio Natural de Doñana, o sea el 32 % de su superficie.

	St. km ²	Slp		Slp/Sa	
		km ²	%	km ²	%
Almonte	860	792	47	389	49
Aznalcázar	450	36	2	4	11
Bollullos Par del Condado	50	50	3	0	0
Bonares	65	59	3	0	0
Carrión de los Céspedes	6	3	0	0	0
Castilleja del Campo	16	4	0	0	0
Chucena	26	22	1	0	0
Escacena del Campo	136	4	0	0	0
Hinojos	321	197	11	105	53
Huévar del Aljarafe	58	29	2	0	0
Lucena del Puerto	69	62	4	6	10
Manzanilla	40	20	1	0	0
Moguer	204	193	11	32	17
Niebla	224	9	1	0	0
Palma del Condado (La)	60	14	1	0	0
Palos de la Frontera	50	37	2	0	0
Paterna del Campo	133	8	0	0	0
Pilas	46	43	2	1	2
Rociana del Condado	72	72	4	0	0
Sanlúcar de Barrameda	172	0	0	0	0
Villalba del Alcor	63	24	1	0	0
Villamanrique de la Condesa	58	55	3	17	31
Villarrasa	72	10	1	0	0
SUMA (CONJUNTA)	3251	1743	100	554	(32)

St = superficie total del municipio. Sa = superficie del acuífero libre de Doñana que corresponde al municipio.

Slp = superficie de acuífero libre protegido por el Espacio Natural de Doñana.

das. En el *Capítulo 8* se describen algunos impactos ya observados.

Las manifestaciones del agua subterránea en el Área de Doñana

En el Área de Doñana hay numerosas manifestaciones de las aguas subterráneas, las cuáles tienen un papel ecológico esencial. Unas se deben a la descarga del sistema acuífero y otras a

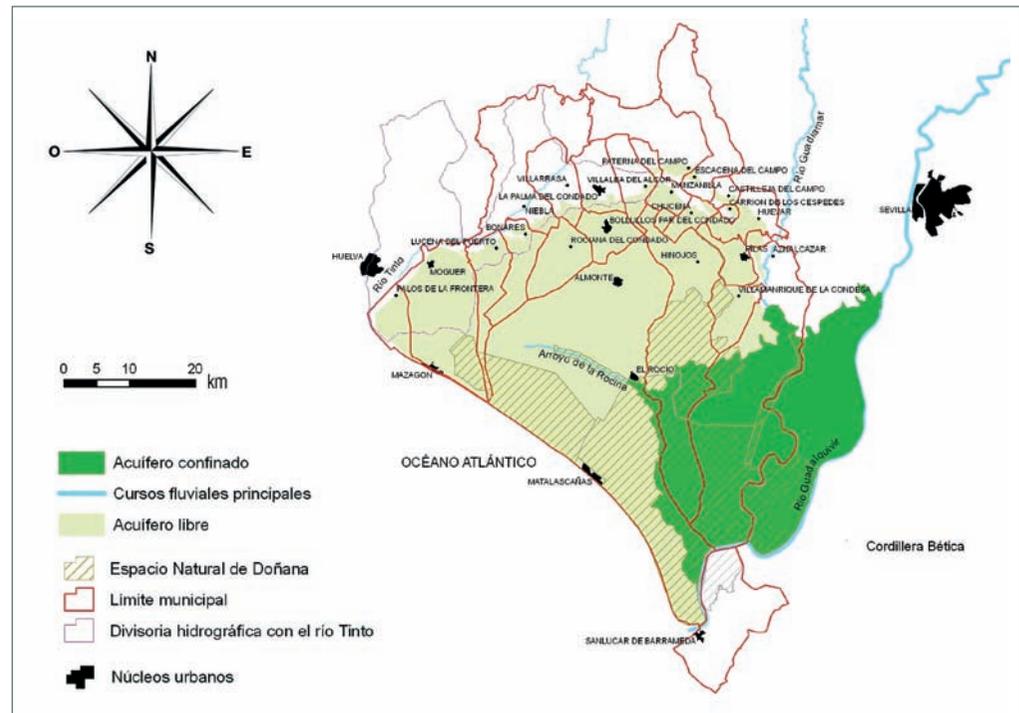
que el nivel freático está cerca de la superficie del terreno, aunque se trate de áreas de recarga y no de descarga.

Las manifestaciones de descarga del sistema acuífero son:

- ◆ Descargas al mar, a lo largo de todo el litoral, en forma de pequeños manantiales y rezumes, principalmente entre Matalascañas y Mazagón, con una salida mayor en el en-

Figura 3. 7

Superposición sobre el territorio del Acuífero de Doñana del límite del Espacio Natural Doñana (END), los límites municipales y la divisoria hidrográfica con el río Tinto. La figura permite apreciar la superficie del Acuífero de Doñana que no dispone de figura administrativa de protección.



torno del tramo final del arroyo de Río Loro (o Río Oro), el cual disecta el acantilado arenoso de El Asperillo. Además, hay una descarga difusa no visible entre el nivel de marea alta y la parte sumergida más próxima a la playa. Se trata de descargas permanentes, moderadamente fluctuantes, aunque con ubicación cambiante ya que el acantilado costero está en retrogradación por abrasión marina.

♦ Descargas a los cauces fluviales, principalmente a los que son (o eran) permanentes en todo o parte de su trazado: Madre del Avitor, del Partido, Cañada Mayor, La Parrilla, La Mayor, El Algarbe, de Pilas, Alcarayón La Rocina (con sus afluentes), Soto Chico, Soto Grande, La Caquera,.. El grado de conservación de estos arroyos es variable y también la

manifestación del agua subterránea en ellos. Algunos arroyos tienen tramos muy alterados por el manejo del territorio en su entorno y otros tramos que aún tienen vegetación de ribera natural, lo que indica que hay una descarga permanente de agua subterránea. El mejor conservado de entre los más grandes es el arroyo de La Rocina, que es una manifestación de descarga de agua subterránea a lo largo de toda su extensión. Se trata de una descarga permanente, aunque con fluctuaciones, y únicamente tras fuertes lluvias su caudal procede de la escorrentía superficial. La mayor parte de la descarga ocurre en forma difusa pero también hay manantiales, algunos de los cuáles son conocidos. El curso de La Rocina tiene ensanchamientos (los llamados charcos) a modo de lagunas permanen-

tes, que pueden tener relación con la mayor erosionabilidad del cauce en esos lugares durante crecidas a causa de la descarga concentrada de agua subterránea en ellos. El hecho de que en ocasiones el caudal de La Rocina casi se anule en la estación seca no se debe al cese de los aportes subterráneos, sino a la incrementada evapotranspiración estival del bosque en galería. Tiempo atrás también hubo descargas naturales permanentes al tramo final de otros arroyos, como el del Partido, aunque ahora no son funcionales debido a las notables extracciones de agua subterránea en áreas próximas.

♦ Descargas a lo largo de los ecotonos (contacto entre arenas y arcillas) en forma de pequeños arroyos (caños, algaidas) y encharcamientos, a la que se suma una descarga difusa en forma líquida y también en forma de vapor (mediante evapotranspiración). Son visibles a lo largo de La Vera, donde descarga parte del agua que se recarga en el área de El Abalario y su entorno, y secundariamente a La Retuerta, donde descarga parte del agua recargada en el sistema dunar costero. El sistema de lagunas de Santa Olalla y su entorno forma parte de estas descargas, aunque actualmente son lagunas endorreicas (sin descarga superficial hacia el exterior) debido al avance de las dunas sobre ellas, salvo en épocas muy húmedas. Las descargas a lo largo del ecotono norte han disminuido debido a las extracciones de agua subterránea, especialmente en los extremos noroeste (descargas a lo arroyos de El Partido y La Mayor) y noreste (desaparición de lagunas en la zona de Los Hatos). Pero se mantienen manifesta-

ciones como las varias lagunas situadas entre El Rocío y el Palacio del Rey y los arroyos del Portachuelo, la Juncosilla, el Almirante y otros menores que concentran la descarga difusa de las arenas al sur del Palacio del Rey.

♦ Los encharcamientos permanentes o semi-permanentes en la marisma (ojos) pueden ser también manifestaciones de descarga, aunque lo más probable es que sean de origen local. Es algo aún no bien esclarecido y posiblemente de escasa importancia cuantitativa.

La principal manifestación de la presencia del nivel freático son las muy numerosas lagunas que existen en el territorio, sobre todo en el manto eólico litoral. Algunas de estas lagunas no son manifestaciones del nivel freático sino de escorrentía local de lluvia, en general por flujos subsuperficiales generados por la existencia de horizontes con menor permeabilidad vertical y cuyo origen es diverso (*ver apartado siguiente y Capítulo 7*). Estas últimas han aumentado a consecuencia del descenso regional del nivel freático en épocas recientes. También son manifestaciones del nivel freático las numerosas manchas de comunidades freatofíticas, tanto las próximas a los cauces y ecotonos como las de los entornos lagunares o aisladas, algunas de las cuáles son el resultado de la evolución de una laguna freática al descender el nivel freático.

Se han realizado varios estudios de esas lagunas y de su relación con las aguas subterráneas, pero la elevada casuística y la necesidad de tipificar su funcionamiento para protegerlas eficazmente justifica que se sigan realizando estudios. Un pormenorizado inventario y cartografía está en fase de edición (Montes et al., 2009).

Formaciones edáficas que tienen un papel relevante en el funcionamiento del acuífero

En el manto eólico existen tres tipos de formaciones edáficas que juegan un papel importante, al afectar localmente a la velocidad y sentido del flujo de agua subterránea: costras de hierro, fragipanes y suelos hidromorfos. A continuación se da una explicación breve de la génesis de cada uno de esas formaciones, su localización y el papel que pueden jugar en la recarga y el flujo de agua subterránea.

Como se expone en el apartado de geología (*Capítulo 2*), al final del Plioceno, en toda el área emergida se produjo una alteración de la superficie del terreno de origen climático, en un clima posiblemente con fuertes estiajes. Esto dio lugar a que en la superficie de las arenas pliocenas se generasen horizontes edáficos ricos en óxidos de hierro y manganeso. Hacia el oeste de la zona (Bonares, Moguer) se formó una costra férrica más o menos continua que se observa, entre otros lugares, en la base del acantilado de El Asperillo (Zazo et al., 2005). También hacia el este, en el área de Mimbres-La Vera aparece una costra férrica muy discontinua lateralmente, de espesor variable entre algunos centímetros y más de medio metro. Tiene aspecto alveolar y dendriforme por la parte inferior, y constituye lo que en edafología se denomina una litoplintita. Más hacia el este, en la zona de La Vera no hay costra sino un horizonte de pisolitos, que son nódulos de óxidos de hierro y manganeso de tamaño milimétrico a centimétrico.

El origen de esta litoplintita y de los pisolitos en las cercanías de La Rocina y La Vera parece ser posterior a la formación de la costra que apa-

rece en El Asperillo. De hecho, los trabajos realizados por los autores permiten afirmar que en la actualidad se siguen formando concreciones de hierro, con y sin forma de pisolitos. El origen de estas concreciones es la precipitación del hierro disuelto en el agua subterránea cuando las condiciones se hacen oxidantes, lo cual sucede en la franja de oscilación freática. Por esta razón en Mimbres-La Vera se encuentran a distintas profundidades, entre los 60 y los 120 cm, según la profundidad freática en cada zona.

Según Clemente et al. (1998), el origen del hierro en solución es del lavado de la pátina que rodea los granos de cuarzo de las arenas que rellenan las partes más deprimidas del manto eólico más antiguo. Posiblemente el hierro es solubilizado por el agua de recarga (la lluvia local es ligeramente ácida, con $\text{pH} < 6,5$), especialmente en áreas con acumulación de materia orgánica y finos, donde el ambiente puede ser ligeramente reductor (se forma Fe^{2+}). Permanece la incógnita sobre el origen primario del hierro. En algunos trabajos realizados en áreas cercanas de la costa portuguesa, donde también existen costras férricas entre sedimentos pliocuaternarios, se atribuye ese origen a las arcillas de descalcificación de terrenos carbonatados del Mesozoico (Boski et al., 1999). Pero estos terrenos no se encuentran en Huelva.

En la zona de Mimbres-La Vera, además de los horizontes con concreciones de hierro, entre las arenas aparecen uno o varios horizontes enriquecidos en partículas finas amarillentas (también óxidos de hierro), los cuales se endurecen notablemente cuando se secan, aunque son friables con la mano, que en terminología edafológica se denominan **fragipanes**. Estos horizontes tienen espesor decimétrico y aparecen a profun-



Las "pajareras", constituidas por alcornoques que acogen a numerosas aves para su nidificación, constituye una de las imágenes emblemáticas de Doñana. Los alcornoques se benefician de un suficiente espesor no saturado pero que mantiene su humedad a lo largo del año por la proximidad de la franja capilar.

Foto: CMA. JA.

didades inferiores a dos metros. Cuando están bajo el nivel freático, los horizontes de fragipán generan condiciones químicas reductoras, las cuáles hacen que el hierro y otros metales de los minerales del terreno puedan pasar a estar disueltos en el agua. Además, como estos horizontes son poco profundos suelen estar en la zona de oscilación estacional del nivel freático, lo que origina una alternancia temporal de las condiciones reductoras y oxidantes que da lugar a la generación de las manchas o motas rojizas (concreciones de óxidos de hierro y manganeso) dispersas en una matriz gris, aspecto que es característico de los suelos hidromorfos. Estos suelos aparecen con frecuencia cerca de humedales que se alimentan de aguas subterráneas debido a que ahí suele ser mayor la oscilación freática por efecto de la evapotranspiración

La acumulación de partículas finas (de tamaño limo y arcilla) en un horizonte de arenas que más tarde dará origen a un suelo hidromorfo puede deberse a varias causas. En las arenas del manto eólico de Doñana las más frecuentes son dos: lavado o arrastre de esas partículas desde posiciones superiores de la columna de suelo y colmatación de depresiones del terreno (lagunas, arroyos). Muchas lagunas del manto eólico están ubicadas en las depresiones interdunares y su posición ha ido migrando a lo largo del tiempo; por ello es frecuente la presencia de antiguos fondos lagunares. En la zona de Mimbrales-La Vera posiblemente el primer proceso sea el dominante, aunque también aparecen horizontes de acumulación de partículas finas asociados a fondos de lagunas temporales. Este segundo proceso es el dominante en el resto del manto eólico y también en el área de Matasgor-

das, donde rellenan la antigua red de drenaje con sedimentos finos calcáreos enterrados por arenas eólicas (Clemente et al., 1998).

Desde el punto de vista del comportamiento hídrico de los materiales aflorantes en Doñana, este conjunto de formaciones edáficas (litoplintitas, horizontes pisolíticos, fragipanes y suelos hidromorfos) afectan sólo a las arenas eólicas y su principal relevancia radica en que disminuyen la permeabilidad vertical del suelo y por lo tanto la capacidad de infiltración del agua. Estas formaciones tienen menor permeabilidad que las arenas eólicas que hay encima de ellos, por eso cuando están por encima del nivel freático producen cierta retención temporal del agua de recarga y pueden inducir flujos subsuperficiales laterales (y flujos superficiales, con ocasión de lluvias intensas), favoreciendo la descarga de agua a las pequeñas depresiones del terreno del entorno. Este proceso es relevante para muchas pequeñas lagunas cuyo fondo está descolgado del nivel freático regional y que de otra forma sólo tendrían agua en años muy húmedos.

Otro efecto relevante de estas formaciones, especialmente de los fragipanes, es que dificultan el drenaje vertical de los campos de cultivo regados. No obstante, no hay mediciones de la permeabilidad del terreno en las zonas donde hay litoplintitas, fragipanes o suelos hidromorfos de cualquier origen. Las costras en proceso de formación suelen tener el aspecto de un tapiz de nódulos dispersos entre las arenas, por lo que en principio no deberían modificar significativamente la permeabilidad vertical del terreno. En cambio sí originan cambios súbitos en la composición química y el pH de las aguas freáticas en época de lluvias: en época de niveles freáticos

altos las costras quedan sumergidas, el ambiente se vuelve reductor y parte del hierro se puede solubilizar, generando descargas freáticas de aguas rojizas (enriquecidas en hierro) a los pequeños caños y otras depresiones del terreno en el entorno cercano a la marisma.

Hydrosistemas de referencia _____

El mantenimiento de la integridad ecológica del Gran Ecosistema de Doñana (GED) necesita de la conservación de la integridad hidrológica de sus sistemas hídricos superficiales y subterráneos de referencia. Esto hace referencia al modo de alimentación y de vaciado, al hidropериodo, a la tasa de renovación y a la hidroquímica e hidrodinámica, como se expone con más detalle en el *Capítulo 7*.

El sistema hídrico superficial está constituido básicamente por un conjunto de cuencas vertientes a las marismas del Guadalquivir, de diferente extensión e importancia en cuanto a sus aportaciones (*Figura 3.8*).

En el Área de Doñana hay unos 500 km de cauces (Madre del Avitorejo, Estero de Domingo Rubio, La Rocina, del Partido, Cañada Mayor, Algarbe, de Pilas, Alcarayón, Portachuelo, Juncosilla, Sajón, Almirante, Majaberraque, Brazo de la Torre, Brazo de los Jerónimos, Brazo del Este, tramo marea-estuárico del Guadalquivir y parte inferior del Guadiamar), que drenan una superficie de unos 1500 km², excluyendo la cuenca del Guadiamar. Muchos de ellos se relacionan con las aguas subterráneas, como ya se ha comentado.

Los cauces más importantes que vierten o vertían sus aguas a las marismas son: por su mar-

Tabla 3.4. Principales arroyos y tributarios que vierten a la marisma de Doñana por el lado norte. Según Tenajas (1984).

Arroyo	Superficie de cuenca, km ²
El Partido	327
Cañada Mayor	105
Cigüeña	162
Caño Marín	11
Carnicerías	7
Portachuelo	16
Juncosilla	19
Almirante	26

gen derecha los arroyos de La Rocina, del Partido, Cañada Mayor, La Cigüeña y Majaberraque, además del río Guadamar y sus afluentes (Alcarayón, Algarbe y de Pilas), y por la margen izquierda el arroyo Salado de Morón.

Es necesario distinguir los varios tipos de cauces fluviales que aportan agua a las marismas por su zona norte y oeste, según su comportamiento hidrológico. Por un lado están los tributarios que drenan las arenas litorales del bajo manto eólico, cuyo colector principal es el arroyo de La Rocina, que al entrar en la marisma se le denomina Madre de las Marismas (arroyo de Las Madres). Su cauce principal, con una longitud aproximada de 31 km, sirve de límite entre las arenas de origen litoral, en su margen derecha, y las de origen continental de los Arenales del Condado, por su margen izquierda. Como todos los arroyos de este grupo, posee una pendiente muy suave y drena una cuenca extensa, de aproximadamente 620 km².

Fuera de la cuenca de La Rocina y al sur de su cauce principal, el bajo manto eólico tiene un modo de desagüe diferente del de los arroyos o tributarios a La Rocina. Son alrededor de 40 cau-

ces pequeños, denominados Caños de la Vera, que carecen de cuenca de recepción definida y que con una longitud máxima de alrededor de 1 km llegan perpendicularmente a la marisma para desaguar en ella (Rodríguez Arévalo, 1984).

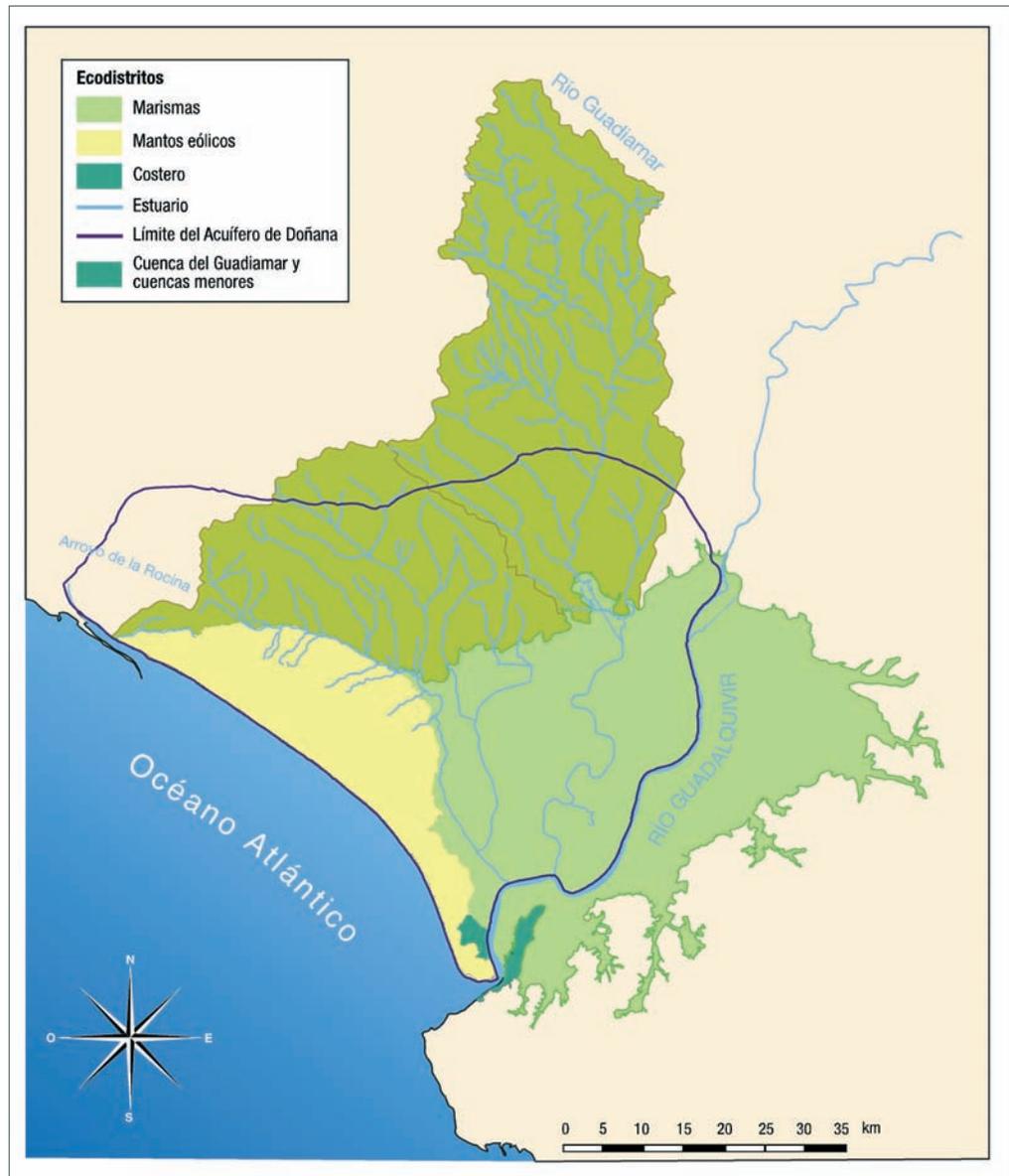
Un tercer tipo de cursos fluviales son los que desembocan en la marisma por el norte, con pendientes muy suaves, drenando los Arenales del Condado. Los más importantes se relacionan en la *Tabla 3.4*.

El último tipo de curso fluvial que drena sus aguas a la marisma es el río Guadamar. Constituye el curso fluvial de mayor entidad, en cuanto a sus aportaciones, que desembocaba en la marisma. Drena una cuenca de alrededor de 1300 km² de superficie (Velasco et al., 1991; Sánchez-Juny et al., 2006). El río Guadamar nace en la Sierra de Aracena y desembocaba en la marisma dando lugar por su potencia a una formación deltaica interior con una estructura de cauces divagantes y lagunas ya desecadas, como la del Rey o de La Piedra. Actualmente el río entra en la marisma canalizado entre dos diques artificiales, el llamado Entremuros, el cual desagua por el sur al Brazo de la Torre. Una de las actuaciones del proyecto Doñana 2005 del Ministerio de Medio Ambiente tenía entre sus objetivos recuperar estas aportaciones para la marisma a través del Caño Travieso.

Las marismas se localizan en el extremo final de una de las mayores cuencas hidrográficas de la Península Ibérica, la cuenca del río Guadalquivir, que drena una superficie de aproximadamente 57.377 km². La marisma se ubica en el Bajo Guadalquivir, entre Alcalá del Río y Sanlúcar de Barrameda. En este recorrido relativamente corto del río la pendiente es prácticamente nula, el tra-

Figura 3. 8

Delimitación del espacio con límites funcionales a considerar de forma directa o indirecta para gestionar de forma sustentable los ecosistemas de marismas, mantos eólicos y costeros del Gran Ecosistema de Doñana. Para los mantos eólicos y el ecodistrito de estuario el Acuífero de Doñana es el responsable último del mantenimiento de su integridad ecológica, mientras que para la marisma de Doñana el hidrosistema de referencia es el cauce del Bajo Guadalquivir (estuario), la cuenca del Guadamar y otras cuencas menores.



zado natural es sinuoso, con una muy pequeña velocidad del agua y preponderancia de los procesos de sedimentación. A pesar de la regulación que se ha realizado en su cuenca y la construcción de diques, durante las grandes crecidas el cauce del Bajo Guadalquivir puede realizar im-

portantes aportaciones a la marisma.

Además del vertido minero accidental de Aznalcóllar (Ayora et al., 2001; Manzano et al., 2008) se encuentran otros ejemplos bastante ilustrativos de los importantes impactos que se generan en la conservación de los ecosistemas de

Doñana cuando no se considera la gestión integrada de las cuencas hidrográficas vertientes a la marisma. El desmantelamiento en las últimas décadas de la vegetación de varias cuencas hidrográficas menores vertientes a la marisma de Doñana ha generado un proceso de reajuste de la red fluvial que ha traído consigo un alarmante y creciente movimiento de laderas, erosión remontante, arroyada y arrastres de depósitos de material arenoso. El resultado es que se han colmatado algunas zonas del norte de la marisma de Doñana por el gran cono aluvial (delta interior) que se ha creado en la desembocadura del arroyo del Partido, el cual está interrumpiendo los aportes de agua del arroyo de La Rocina hacia la marisma y separando la marisma de El Rocío del resto, lo que es especialmente grave y de difícil solución (Borja y Gómez, 1999; Mintegui et al., 2003). Esto se considera también en el *Capítulo 9*.

Así pues, la conservación de los ecosistemas acuáticos y terrestres del gran ecosistema fluvio-litoral de Doñana está íntimamente ligada a la gestión sustentable de sus hidrosistemas de referencia, tanto superficiales (cuena del Guadiamar, cuencas menores y cauce final del Bajo Guadalquivir) como subterráneos (sistema acuífero de Doñana), teniendo además en cuenta que los límites de la cuencas superficiales y subterráneas no coinciden (*ver Figura 3.8*). La situación se hace más compleja cuando se comprueba que los límites con significado ecohidrológico del GED y sus hidrosistemas de referencia tampoco coinciden con los administrativos de los espacios protegidos y de los municipios (*ver Figura 3.7 y Tabla 3.2*). Por tanto, la gestión sostenible del GED exige una estrecha cooperación entre la administración ambiental y la municipal, y el ordenamiento territorial de Doñana debe respe-



Ecotono de La Vera. Los alcornoques disponen de suficiente humedad en el medio no saturado por proximidad de la franja capilar.

Foto: EC.

tar los flujos de agua superficial y subterránea en el marco del ciclo del agua en la zona, como se trata en el *Capítulo 10*.

En síntesis, para evitar muchos de los errores del pasado (vertido minero de Aznalcóllar, colmatación de la marisma, explotación intensiva del acuífero) es necesario gestionar este gran ecosistema como una entidad integrada y unitaria. Para reconducir a Doñana hacia un modelo de sostenibilidad hay que tener en cuenta las interrelaciones y las consecuencias de las actuaciones que se lleven a cabo tanto en el litoral suratlántico de El Abalario, como en el estuario del Guadalquivir o en sus cuencas vertientes y en el sistema acuífero.

Conocimiento hídrico de Doñana _____

Las necesidades de estudio, conocimiento y datos hidrológicos a disponer así como de uso del agua en un determinado territorio, han de ser proporcionales a la complejidad, intensidad e importancia de la situación a analizar y gestionar. Estos son los principios que se aplicaron en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992), en un contexto de presiones humanas que no ha variado substancialmente desde esa época, si bien el grado de conciencia social ha despertado notablemente y las Administraciones del agua se han involucrado más, tanto por ser más conscientes de la situación como por la presión social y la derivada de la necesaria aplicación de la Directiva Marco del Agua (DMA) y de la Directiva sobre Aguas Subterránea (DAS). Esto se comenta en *los Capítulos 10 y 11*.

Hidrológicamente, el Área de Doñana ha sido escasamente conocida hasta la década de 1960, aunque las primeras presiones humanas significativas son ya anteriores, con la transformación de parte de la marisma en terrenos para el cultivo del arroz y otros productos, la introducción del bosque de pinos en las primeras décadas del siglo XX de forma extensiva y de eucaliptos hacia mediados del mismo siglo, como se comenta en el *Capítulo 6*. En la *Tabla 3.6* se muestra un conjunto de acontecimientos que tienen relevancia por haber supuesto cambios en la gestión de algún aspecto del ciclo del agua en Doñana, o bien del territorio, pero con implicaciones en el ciclo del agua. Previamente, y durante siglos, la débil pero no nula ocupación humana actuó sobre parte del territorio, pero lentamente y dentro de la capacidad de acogida de los ecosistemas explotados. En las últimas décadas los cambios y alteraciones se han sucedido con rapidez inusitada. Son pocos los datos hidrológicos de épocas pasadas, aunque van apareciendo estudios de análisis de la evolución del territorio y de eventos con algún tipo de registro, tales como las sequías. Así por ejemplo se han ido conociendo las grandes avenidas del río Guadalquivir desde 1400, con detalladas referencias de la gran riada de 1709 (Rodríguez Ramírez, 1993).

Aparte de estudios geográficos preliminares y descripciones de gran valor documental histórico, pero de alcance muy limitado, no se conocen estudios hidrológicos propiamente dichos sobre el Área de Doñana hasta épocas recientes. En la década de 1950 se hicieron reconocimientos de hidrología superficial en la marisma para proyectar la colonización de una parte de la misma, principalmente con vistas a la produc-

Tabla 3.6. Fechas de eventos de interés hidrológico

Fecha	Evento
1920's	Introducción de plantaciones de pinos a gran escala
1930's	Inicio a gran escala del cultivo del arroz
1940's	Incentivos al arrozal. Obras de colonización
1947	Plantaciones forestales de pinos y eucaliptus
1964	Creación de la Reserva Biológica de Doñana: adquisición de 6794 ha por el WWF
1969	Creación del Parque Nacional de Doñana (PND): 32000 ha
1972	Declaración de interés nacional el Plan de Riego Almonte–Marismas
1978	Puesta en marcha del PN
1988	Publicación del Plan de Desarrollo Territorial Comarcal: 2900 km ²
1989	Creación del Parque Natural del Entorno de Doñana: 54200 ha
1992	Publicación del Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos
1993	Publicación del Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana y el POTAD
1994	Inicio de la erradicación de las plantaciones de eucaliptus en el PNaI.D y PNraI.D
1995	Creación de la Mancomunidad de la Comarca de Doñana
1998	Ruptura de la balsa de lodos mineros de Aznalcóllar y obras de limpieza
1999	Inicio del Proyecto de Restauración de Humedales Doñana 2005
1999	Proyecto del Corredor Verde del Guadamar
2000	Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional de Doñana (PRUG)
2002	Plan Andaluz de Humedales de la Consejería de Medio Ambiente
2003	Evaluación del Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana
2003	Plan de Ordenación del Territorio del Ámbito de Doñana
2005	Plan de Ordenación de los Recursos Naturales del PN
2006	Síntesis Hidrológica del Área de Doñana (FD 2005)
2007	II Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana
2007	Plan especial de reubicación de las zonas de regadío del NW. Creación del Espacio Natural Doñana

ción de arroz, pero no son estudios hidrológicos detallados sino proyectos de obra y de ejecución. En cuanto a las aguas subterráneas, no es hasta el inicio del Proyecto del Bajo Guadalquivir a finales de la década de 1960, realizado por FAO (Organización para la Alimentación y la Agricultura, de Naciones Unidas) conjuntamente con el Gobierno Español, cuando se realizan los primeros estudios hidrogeológicos de detalle, con reconocimientos, geofísica y perforaciones. Como consecuencia de este estudio se inició el Proyecto de Transformación Agraria Almonte–Marismas

(PTAAM), realizado también por FAO y el Gobierno Español, en el que el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) tuvo una participación activa, estableció una oficina de proyectos en Sevilla y comenzó una serie de trabajos y observaciones que aún continúan.

Hasta 1992 sólo se generaron dos informes sintéticos, ambos del IGME (IGME 1982; 1992). En 1992 se hizo público el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos sobre Doñana (CIED, 1992) y desde entonces se han realizado numerosas actividades para el conoci-

Turberas de Ribetehilos, con un fondo de laguna y vegetación periférica de eucaliptus (1993), hoy erradicados. Foto: EC.



miento hídrico del Área de Doñana, aunque aún no se han cubierto todos los objetivos. Pero en diversos aspectos de relevancia aún se sigue en un estado incipiente.

Los estudios de investigación científica y de ciencia aplicada comenzaron a principios de la década de 1980 por el Grupo de Hidrogeología de la Universidad Autónoma de Madrid, que luego se continuaron por el Grupo de Hidrogeología de la Universidad Complutense de Madrid, al cambiar su lugar de actividad la persona que los lideraba, el Dr. M. Ramón Llamas. Se apoyaba en los recursos aportados por el Comité Conjunto Hispano–Norteamericano para la Ciencia y la Tecnología (CoCo).

A finales de la década de 1980 se sumó al equipo el grupo de Hidrología Subterránea del

Departamento de Ingeniería del Terreno de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), que poco más tarde tomó el relevo de los estudios, apoyándose en subvenciones concedidas por la CICYT (Comité Interministerial de Ciencia y Tecnología) y el Programa Marco Europeo, y que aún continúa activo. Dentro de este grupo se formaron expertos en el área, uno de los cuales ha iniciado hace unos años un nuevo Grupo de Hidrogeología en la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), que es el que actualmente lidera muchos de los trabajos, con el apoyo de subvenciones locales andaluzas, de la CICYT y Europeas, y que continúa su relación con la UPC. Ambos grupos mantienen relaciones de apoyo mutuo con las actividades del IGME, así como con otras instituciones, como la Facultad



La Vera tras las instalaciones del Palacio de Doñana (en el fondo se ve la torre de observación). La humedad es en parte de la inundación de la marisma y en parte descarga de agua subterránea. En épocas secas se aporta agua de pozos. Foto: CMA. JA

de Ciencias de la Universidad Autónoma de Madrid (ecología) y la Escuela Técnica Superior de Agrónomos de la Universidad de Córdoba.

Dado el punto de vista del conocimiento científico se han realizado varias tesis doctorales y de maestría o graduación, de contenido hidrogeológico (Rodríguez Arévalo, 1984 y 1998; Tenañas, 1984; Vela, 1989; Poncela, 1993; Trick, 1998; Iglesias, 1999; Castro 1999; Coletto, 2003; Lozano, 2004), en buena parte dentro de proyectos financiados por el CoCo y la CICYT. La actividad en hidrología superficial ha sido mucho menor hasta fechas recientes, en las que destacan las actividades del Grupo de Investigación FLUMEN de la UPC y de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid. Se ha avanzado en el co-

nocimiento geológico en varios frentes (UPC, U. Sevilla, U. Huelva, Museo de Ciencias Naturales-CSIC, IGME) y ha habido una contribución importante derivada de los estudios realizados tras el accidente minero de Aznalcóllar, que incluye un modelo general de flujo del agua subterránea del área (UPC, 1999). Con base en éste, el IGME está realizando otro modelo. Tanto la UPC como el IGME, y más recientemente la UPCT, han continuado con estudios hidrogeológicos diversos, que incluyen estudios hidrogeológicos químicos e isotópicos ambientales, a partir de diferentes fuentes de financiación.

También se han realizado trabajos relevantes sobre la ecohidrología en la Universidad de Sevilla y en la Universidad Autónoma de Madrid. Los expertos de ésta última están en colabora-

ción frecuente con los equipos de Barcelona (UPC) y Cartagena (UPCT). La Universidad de Sevilla ha llevado a cabo interesantes estudios sobre la vegetación acuática y freatófítica, y la de Huelva estudios geomorfológicos y geológicos.

Con estos trabajos, y los de otros de otros grupos más ocasionales no mencionados (Dep. de Ingeniería Minera, Mecánica y Energética de la U. de Huelva; Facultad de Geología de la U. de Granada; Geodinámica y Paleontología, U. de Huelva), se ha ido adquiriendo un apreciable conocimiento de la hidrogeología del Área de Doñana, aunque en ocasiones aún no es suficiente para el detalle exigido por el tipo de problemas hidrogeológicos a abordar.

En este panorama ha sido muy importante la colaboración del Servicio Geológico de Obras Públicas (hoy extinto) en la realización de son-

deos de reconocimiento y piezométricos, y también del IGME, que aún continúa reconociendo el territorio para aclarar aspectos de interés e ir completando el conocimiento. También fue muy relevante la decisión de instalar y equipar una red piezométrica por parte de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, primero con la ayuda del SGOP y luego con sus propios presupuestos, siguiendo las directrices técnicas que proporcionó la UPC.

Puede decirse que el sistema acuífero del Área de Doñana es uno de los mejor estudiados de España, a pesar de lo cual aún persisten lagunas de conocimiento. En resumen, se han realizado reconocimientos, estudios hidráulicos, estudios de recarga, de hidrogeoquímica –incluyendo isotopía ambiental– y de modelación del flujo, y se han abordado aspectos de gestión hídrica.

Capítulo IV



Vista aérea hacia el Oeste de la urbanización de Matalascañas. Los pozos de abastecimiento están a lo largo de la carretera del límite interior, lindando con el Parque Nacional de Doñana. Al fondo el área arenosa de El Abalarío.

Foto: JHG.

Redes de observación hidrológica en el Área de Doñana y su zona de influencia

Consideraciones generales

El conocimiento hidrológico actualizado, con el detalle adecuado a los problemas a afrontar, sólo es posible mediante un **reconocimiento del terreno** proporcional a los aspectos a evaluar y resolver. Se ha de llevar a cabo mediante un variado conjunto de herramientas que, dada la complejidad de los sistemas naturales, en lo posible han de ser varias y lo más independientes entre sí que sea posible, dentro de los recursos humanos y económicos disponibles. En el Área de Doñana se requiere un detalle notable de conocimiento dada la importancia de los aspectos interrelacionados a gestionar: conservación y explotación sustentable.

Como necesidad básica para la gestión se debe disponer de una red de **observación y vigilancia** y, en su caso, de **control para la gestión**, extendida a lo largo del tiempo y periódicamente

adaptada para mejorar la información que se obtiene a medida que progresa el conocimiento y evolucionan las actuaciones. Se trata de una inversión económica y humana a veces significativa, mantenida en el tiempo, en general poco brillante política y personalmente, pero esencial tanto para conocer los procesos básicos de funcionamiento del medio como para detectar posibles modificaciones del funcionamiento natural y estudiar las causas. Eso es especialmente cierto en áreas donde el agua es la principal fuente de bienes y servicios a la sociedad, y donde además una parte de ellos se debe a la existencia de ecosistemas particularmente valiosos. Tal es el caso del Área de Doñana.

Los estudios de reconocimiento hidrogeológico tienen una frecuencia baja, desde anuales hasta decadales, según las características de cada

zona. Estos estudios incluyen **inventarios** periódicos de ciertos aspectos, como por ejemplo de extracciones de agua subterránea, de humedales, o de las masas de vegetación freatófita existentes en la zona a estudiar. Su finalidad es contrastar los resultados de estimaciones y cuantificaciones de diversos aspectos, tales como los distintos componentes de los balances de agua en el terreno. En cambio, la frecuencia de observación y medición de variables hidrológicas tales como caudales, niveles de agua o composición química en las respectivas redes ha de ser más frecuente, de diarias a mensuales, llegando incluso a ser continua para ciertas variables y situaciones, para lo cual se utilizan dispositivos automáticos. Para la explotación posterior de la información obtenida, además de su informatización y depuración se requiere realizar síntesis periódicas que permitan extraer resultados condensados, para tener una visión general sintética que oriente la comprensión de los procesos y la gestión a realizar.

Las variables de interés hidrológico a considerar en una zona se refieren a la cantidad y calidad de la aportación atmosférica (que se mide en las redes hidrometeorológicas y de calidad), a las aguas superficiales fluviales (se miden en las redes foronómicas y de calidad), a las aguas subterráneas (se miden en las redes piezométricas y de calidad) y a las aguas superficiales de las formaciones palustres (se miden en las redes limnométricas). Además se requieren informaciones e inventarios periódicos de usos del agua, extracciones, superficies de áreas regadas, vertidos, etc., sin cuyos datos no es posible efectuar balances de agua y de masa de sustancias que son transportadas por los flujos de agua, las que juegan un papel muy significativo en las características

de los ecosistemas. En el Área de Doñana se ha avanzado notablemente tanto en el ámbito del reconocimiento hidrogeológico como en el de las redes y planes de observación, aunque de forma irregular y aún con notables lagunas, especialmente en lo relativo a la incorporación y transporte de sustancias.

Además de obtener la información, es importante reunirla apropiadamente, depurarla y ponerla a disposición del personal responsable, tanto de los estudios cuyo fin sea aumentar el conocimiento del funcionamiento del sistema, como de los responsables de la gestión, y también de los científicos y del público en general. En la Unión Europea esto es una norma de obligado cumplimiento, aunque su implementación no siempre es la adecuada. En el Área de Doñana, muy recientemente, también se han hecho progresos relevantes en este sentido, tanto por parte de la Junta de Andalucía como de la Administración General del Estado y de otros organismos públicos con intereses en el territorio.

Hasta muy recientemente (año 2006) las distintas redes existentes, que se describen más adelante, eran inconexas y sus datos tenían un acceso fragmentado y difícil, cuando no casi imposible. Pero en la actualidad prácticamente toda la información relativa al agua (atmosférica, superficial y subterránea) es accesible, sea cual sea el organismo público y la red de procedencia, a través del sitio web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Esta Consejería ha creado la herramienta "*Sistemas de Información sobre Recursos Hídricos*", que en la actualidad (año 2009) proporciona acceso directo a las siguientes bases de datos a través de la web [http://www.juntadeandalucia.es/agenciade-](http://www.juntadeandalucia.es/agenciade)

lagua/, en lo que hace referencia de algún modo al Área de Doñana:

- Sistema de Información sobre Aguas Subterráneas (creada por el Instituto Geológico y Minero de España para el antiguo Instituto del Agua de Andalucía, actual Agencia Andaluza del Agua).
- Sistema Automático de Información Hidrológica del Distrito Hidrográfico del Guadalquivir (antigua Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, actualmente competencia de la Agencia Andaluza del Agua).

Además, como parte de la Red de Información Ambiental (REDIAM) de la Consejería de Medio Ambiente se ha creado la aplicación Sub-sistema Aguas, que permite visualizar en la pantalla del ordenador y guardar imágenes con información hidrológica (de aguas superficiales y subterráneas e información relativa a humedales) combinada con información geográfica, biótica, humana y de infraestructuras.

Otro avance importante y reciente procede del Ministerio responsable de la Ciencia (actualmente Ministerio de Ciencia e Innovación, MICIIN), que a través de la Estación Biológica de Doñana, en su calidad de Infraestructura Científica y Tecnológica Singular, ha iniciado la monitorización de buena parte del Espacio Natural de Doñana con una red de sensores remotos que registran y ponen a disposición de investigadores y público en general imágenes y datos, entre otros aspectos, sobre meteorología, niveles y calidad de aguas superficiales en lagunas y marisma y niveles de agua subterránea. Aunque se trata de una red discreta en cuanto al número de estacio-

nes y no permite regionalizar la información, la posibilidad de disponer de información hidrológica en tiempo real y de forma gratuita la convierte en muy valiosa para la comunidad científica. Esta información está disponible en la web <http://icts.ebd.csic.es>.

A continuación se describen brevemente las características y otros aspectos significativos de las redes hídricas relevantes para el Área de Doñana.

Redes hidrometeorológicas y de calidad atmosférica

La disponibilidad de series temporales de datos hidrometeorológicos es de gran relevancia para los estudios hidrológicos y de gestión del agua y del medio ambiente (conocer los recursos hídricos disponibles en cada momento, analizar sequías, evaluar el riesgo de incendios, diseñar actuaciones para el control de plagas, etc.). La posibilidad de combinar datos hidrometeorológicos con datos de la composición química e isotópica del agua de lluvia, así como de la composición de partículas sólidas en el aire, proporciona una poderosa herramienta para el conocimiento cualitativo y cuantitativo del conjunto del ciclo hidrológico.

Las redes hidrometeorológicas existentes en el entorno del Área de Doñana, es decir, considerando el territorio que tiene características razonablemente similares a Doñana o influye en el mismo, son variadas. Pertenecen tanto a organismos públicos del Estado como a la Administración Autónoma Andaluza. Las redes más significativas desde el punto de vista de su duración temporal y ubicación son las siguientes:

□ Red de la Agencia Estatal de Meteorología (AEM), antes Instituto Nacional de Meteorología (INM). Consiste en varias estaciones meteorológicas automáticas (miden las distintas variables mediante sensores, las almacenan y envían los datos a una central de información por vía módem) y un buen número de estaciones termopluviométricas y pluviométricas manuales en las provincias de Huelva y Sevilla. Las estaciones automáticas miden velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y precipitación. La estación principal de Huelva ciudad mide también radiación solar. En la década de 1980 hubo estaciones termopluviométricas en Los Mimbrales y en Los Bodegones, que estuvieron operativas durante periodos discretos más o menos largos, y cuyas series pueden ser de utilidad para estudios concretos que evalúen procesos ocurridos en el pasado, o para obtener valores medios.

□ Redes de la Junta de Andalucía. La Consejería de Agricultura y Pesca tiene una red de alerta e información fitosanitaria (red RAIFS) que informa sobre precipitación, temperatura del aire y del suelo, radiación y viento. El Instituto de Investigación y Formación Agraria y Pesquera (IFAPA) de la Consejería de Innovación, Ciencia y Empresa tiene una red de información agroclimática (red RIA) para estimar las necesidades hídricas de los cultivos. En conjunto suman alrededor de una decena de estaciones en el entorno del Área de Doñana. La red RIA, que funciona desde el año 2000, consiste en estaciones automáticas que miden pluviometría, temperatura, humedad relativa, velocidad y dirección del viento y radiación solar, además de calcular la

evapotranspiración media de referencia. La Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía tiene dos redes propias: la Red de Estaciones Automáticas y Remotas de Meteorología (red EARM) y la Red del Sistema de Información de Vigilancia Ambiental (red SIVA). La red EARM es gestionada por el Centro Operativo Regional de Prevención y Extinción de Incendios; una de sus estaciones está ubicada en el Área de Doñana, cerca del poblado de Los Bodegones (cuenca alta del arroyo de La Rocina). La red SIVA consiste en cabinas de medición de contaminación atmosférica, ubicadas en áreas urbanas e industriales, que cuentan también con sensores de precipitación y temperatura. Las estaciones más cercanas al área de Doñana están ubicadas en el río Tinto, una en el valle medio y otras varias en el estuario. El Servicio de Información Meteorológica Avanzado mide y/o genera datos de temperatura máxima, humedad relativa mínima, velocidad y dirección del viento a varias horas del día, probabilidad de precipitación en 24 horas y la distribución temporal y cuantía de la lluvia.

□ La Agencia Andaluza del Agua gestiona, desde el 1 de enero de 2009, las redes de observación hídrica de los antiguos organismos de la administración estatal: Confederación Hidrográfica del Guadalquivir y Confederación Hidrográfica del Guadiana. Entre estas redes está la SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica), cuyo objeto es la medición de niveles y de calidad de las aguas superficiales. Algunas estaciones de la red SAIH incorporan, junto con la medición de parámetros hidrológicos, la de los parámetros meteorológicos básicos (precipitación y temperatura).



Muestrador de agua de lluvia en las proximidades de la laguna de Santa Olalla.
Foto: EC.

Según la información que proporciona el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), que depende del Ministerio de Fomento, en la zona de interés para el Área de Doñana existen actualmente los siguientes pluviómetros: Rociana del Condado, Moguer, Escacena del Campo, La Palma del Condado, Aznalcázar, El Castillo de los Guardas y varios ubicados en el río Guadalquivir entre Sevilla y Isla Mayor.

La información de las redes hidrometeorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología, la Agencia Andaluza del Agua y las distintas Consejerías de la Junta de Andalucía están disponibles en el sitio:

<http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/>.

□ La Estación Biológica de Doñana (EBD) tuvo a principios de la década de 1990 dos estaciones automáticas en las que se medían temperatura dia-

ria máxima y mínima y precipitación acumulada diaria, pero el registro tuvo una duración corta. En cambio, la estación termopluviométrica manual del Palacio de Doñana se ha mantenido activa hasta la actualidad, con fácil accesibilidad a los datos a través de la web de la EBD. Desde comienzos del año 2008 la EBD, como Infraestructura Científico Técnica Singular del MICIIN, cuenta con cinco estaciones meteorológicas de acceso remoto muy completas. Están ubicadas en la casa del Manecorro (junto a la marisma de El Rocío), en la casa de control del acceso al Palacio de Doñana, en la desembocadura del Caño de Brenes en el río Guadalquivir (marisma), en la casa de Veta La Palma (marisma) y en un lugar de la marisma llamado Honduras–El Burro, situado frente al Palacio de Doñana. Los datos son accesibles a través de la web <http://icts.ebd.csic.es>.

□ El Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) tiene una estación experimental en El Arenosillo (Huelva), en el mismo lugar que una de las estaciones de la AEM, donde se mide automáticamente la radiación UVA (ultravioleta) y el contenido de ozono en el aire, desde 1997.

En cuanto al control de la aportación atmosférica de solutos a la red hídrica, en el área de influencia de Doñana no existe ninguna red de muestreadores de la composición química de la deposición atmosférica, ni de la húmeda ni de la seca. Sólo han existido algunos muestreos temporales para elaborar los diferentes estudios realizados con motivo de tesis doctorales y de proyectos de investigación (Iglesias, 1999; Iglesias et al., 1996, 1997, 1998; Manzano et al., 2001, 2005; Lozano, 2004; Alcalá, 2006).

Aunque con pocos puntos de medición, existe una red de observación de la contaminación atmosférica, cuyos datos pueden ser útiles para estudios de aporte atmosférico. Se trata de la red de control de la calidad atmosférica de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Está formada por estaciones de la propia Consejería y de otras instituciones y empresas, tales como ayuntamientos, INTA, ENDESA, CEPESA, etc. En ellas se miden tanto contaminantes (SO_2 , SH_2 , NO_x , O_3 , CO, benceno, tolueno, xileno, partículas, etc...) como parámetros meteorológicos. La información es enviada en tiempo real a la sede central de la Consejería. La red comenzó en 1996 y en la actualidad dispone de 21 estaciones en la provincia de Huelva, la mayoría de ellas en Huelva ciudad o la costa (área de interés para Doñana). También dispone de unidades móviles orientadas a situaciones especiales, una de las cuáles ha estado en algún momento en el Palacio de Doñana.

De lo expuesto se deduce que la información hidrometeorológica existente para el Área de Doñana en lo que respecta a la cantidad del agua es razonablemente representativa y suficiente en cantidad, densidad y frecuencia para la realización de estudios y el apoyo a la gestión del agua en la zona. Aunque hasta hace poco la accesibilidad a los datos de distintas fuentes era dispar, la iniciativa de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía de facilitar el acceso a los datos de todas las redes de interés a través de su web ha supuesto una magnífica contribución para el trabajo de gestores, estudiosos y público en general. También supone un avance notable la instalación por la EBD de varias estaciones hidrometeorológicas automáticas de acceso remoto

dentro del Espacio Natural Doñana, facilitando el acceso público a los datos a través de la red.

No obstante, existe una carencia notable de información en lo relativo a la calidad del agua de lluvia y del aporte atmosférico seco. Esta es muy importante para la estimación de la cantidad y calidad de la recarga. En los últimos años se ha generado una red de estaciones que cubre razonablemente el área de emisión de partículas potencialmente contaminantes del polígono industrial de Huelva, pero no se está observando el aporte de otras posibles fuentes tales como la litológica (metales pesados, desde las explotaciones mineras a cielo abierto de la franja pirítica), la agrícola (agroquímicos sintéticos, a partir de los tratamientos en forma de aerosol) o el tráfico rodado (metales pesados, hidrocarburos, carbono).

Red foronómica y de calidad del agua superficial _____

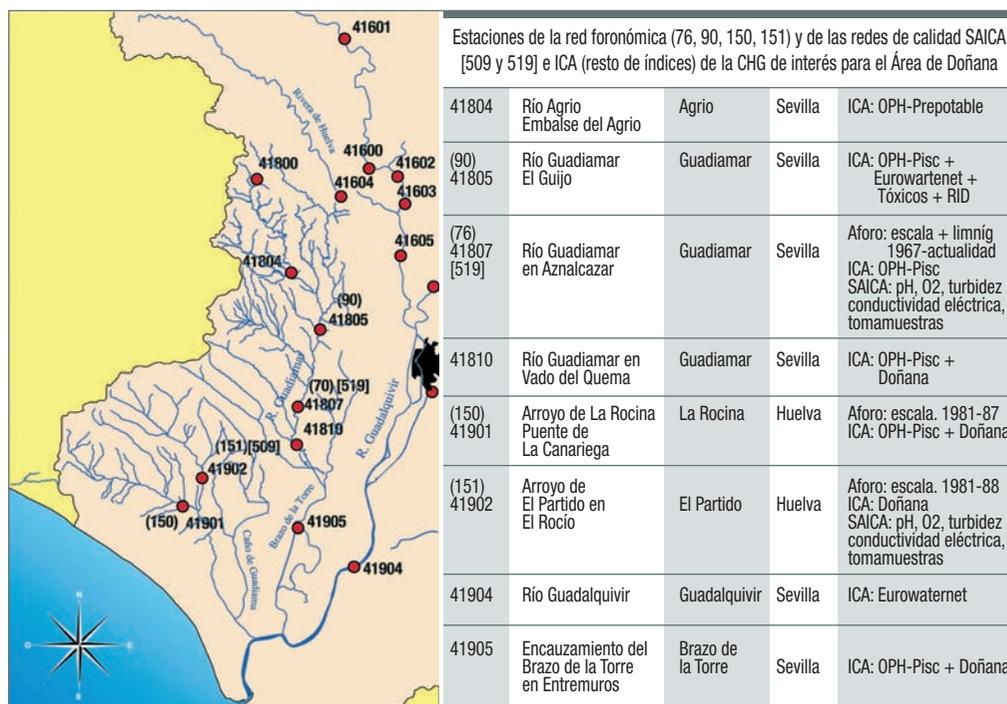
El estudio de la hidrodinámica de la marisma, así como el establecimiento de criterios para su gestión hídrica, requieren conocer con precisión las aportaciones que recibe. También se requieren para conocer las relaciones aguas superficiales-aguas subterráneas. Para ello es preciso que los principales cauces que desaguan a la marisma y los que cruzan el área de arenas dispongan de estaciones de aforo cuidadosamente operadas y mantenidas.

Las principales aportaciones hídricas superficiales a la actual marisma proceden del arroyo de la Rocina (400 km²), del arroyo del Partido (300 km²) y del arroyo de la Cañada Mayor (80 km²).

Figura 4.1.

Estaciones de la red foronómica o de caudales (red SAIH, Sistema Automático de Información Hidrológica), y de calidad (red Integral de Calidad del agua, ICA, de control manual, y Sistema Automático de Información sobre la Calidad del agua, SAICA) de las aguas superficiales en el área de interés para Doñana. Históricamente han sido responsabilidad de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHGQ); desde enero de 2009 son competencia de la Agencia Andaluza del Agua. OPH-Prepotable: se analizan 38 parámetros en aguas potencialmente potables según el Plan Hidrológico. OPH-Pisc: se analizan 14 parámetros de calidad para la vida piscícola según el Plan Hidrológico. Eurowaternet: se analizan 46 parámetros generales para la red europea de igual nombre. RID: se analizan 13 parámetros de control de emisiones fluviales al Océano Atlántico. Doñana: se analizan 27 parámetros en cuencas vertientes al Espacio Natural Doñana. Tóxicos: se analizan 22 parámetros, 5 de ellos pertenecientes a la Lista II de sustancias prioritarias de la Directiva Marco del Agua.

Modificado de www.ch-guadalquivir.es



El Proyecto Doñana 2005 incluía recuperar para la marisma parte de los caudales que en el pasado se incorporaban procedentes del río Guadamar (1320 km²) a través del Caño Travieso.

La red foronómica (de medición de caudales) relevante para el Área de Doñana ha pertenecido históricamente a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, y actualmente es responsabilidad de la Agencia Andaluza del Agua. En la *Figura 4.1* se muestra la situación de las estaciones foronómicas de la red SAIH de interés para Doñana. En la actualidad en el río Guadamar sólo están operativas las estaciones 76 (Aznalcázar) y 90 (El Guijo). Otra estación estuvo operativa en Gerena en la década de 1980. La estación de Aznalcázar está situada en la parte inferior de la cuenca y tiene asociada una superficie de 880 km²,

de los 1320 km² de superficie de la cuenca del Guadamar hasta el inicio del Brazo de la Torre, pero deja fuera las cuencas de los arroyos de La Cigüeña, Alcarayón y Majarraque, que totalizan 440 km². Las estaciones de los arroyos del Partido y La Rocina en La Canariega estuvieron operativas durante unos pocos años. Las series históricas de datos son incompletas, con frecuencia faltan los últimos años y son poco fiables para caudales elevados. Pueden ser consultadas en la web del CEDEX (<http://hercules.cedex.es/anuarioaforos/>) y también en la de la Agencia Andaluza del Agua. (<http://www.juntadeandalucia.es/agenciadelagua>).

El Proyecto Doñana 2005 consideraba mejorar notablemente la medida de los caudales incorporados a la marisma, rediseñando la estación del arroyo de La Rocina, construyendo una esta-

ción de aforos en el arroyo del Partido, que actualmente incorpora el cauce del arroyo de la Parrilla, y diseñando una estación de aforos en la Cañada Mayor que permita el paso de caudal sólido.

El control de la calidad de las aguas superficiales, en el ámbito del Espacio Natural de Doñana se realiza a través de un conjunto de estaciones de muestreo periódico pertenecientes tanto a la antigua Confederación Hidrográfica del Guadalquivir como al ente Espacio Natural de Doñana, así como de estaciones de muestreo ocasional de la Estación Biológica de Doñana, con aportaciones de estudios específicos desarrollados por distintas universidades.

La red de control de calidad de la antigua Confederación Hidrográfica del Guadalquivir en la zona de interés para Doñana está constituida por ocho estaciones de muestreo manual periódico (Red Integral de Calidad de las Aguas, ICA) y dos estaciones de muestreo automático (Sistema Automático Integral de Calidad de las Aguas, SAICA). En la Figura 4.1 se puede ver la ubicación de las mismas e información sintética de los parámetros de control en cada una de ellas. Esta red es insuficiente en cuanto al número de estaciones y de variables, pues ni considera todas las vías de entrada de agua y ni la calidad de todas ellas.

El Parque Nacional de Doñana (PND) tiene desde 1995 una red de muestreo de agua superficial de unos 50 puntos, con una periodicidad de muestreo mensual. 40 de estos puntos están en la marisma y coinciden con la ubicación de escalas limnimétricas y/o compuertas. El resto están en las principales vías de entrada de agua superficial al PND (arroyo de La Rocina en La



Canariega, arroyos de Caño Mimbrales, Soto Chico y Soto Grande en los cruces con la Vía Pecuaria, principales drenajes agrícolas entrantes al PND entre Pequeña Holanda y Mimbrales). Se miden componentes mayoritarios, metales pesados, algunos plaguicidas (en puntos seleccionados) y sólidos en suspensión.

La medida de la marea se realiza en el estuario del Guadalquivir, en Sanlúcar de Barrameda, por el Instituto Oceanográfico de la Marina, y en Cádiz por el Instituto Español de Oceanografía. Los posibles efectos de las aguas continentales sobre las aguas marinas costeras en cuanto a los aspectos sanitarios de las zonas de baño se controlan en Matalascañas y Palos. Algunas muestras de la playa de Matalascañas tienen una pequeña dilución del agua marina por aportes continentales.

Actual estación de aforos (2005) del arroyo de La Rocina, en su desembocadura en la Marisma del Rocío, junto al puente de La Canariega de la carretera de El Rocío a Matalascañas.

Foto: FLUMEN-UPC.

Red de observación de aguas en marisma y formaciones palustres de los mantos eólicos —

En cuanto a la cantidad del agua en la marisma, el PND tiene desde mediados de la década de 1990 una red de escalas limnimétricas niveladas. La medición es manual y la frecuencia variable. Los datos tienen una utilidad limitada para la calibración de modelos debido a la escasa longitud y a la discontinuidad de las series.

En los últimos años, y como parte de los trabajos del Proyecto Doñana 2005, el PND y el grupo de investigación FLUMEN de la UPC han instalado conjuntamente nueve estaciones automáticas en distintas ubicaciones de la marisma (*Figura 4.2*), en las que se miden la lámina de agua y otras variables hidrológicas y físico químicas, entre ellas salinidad y temperatura del agua. Los datos han sido muy útiles para la modelación de la hidrología de la marisma realizada en el marco del Proyecto Doñana 2005 (FLUMEN, 2006).

Estación automática de la marisma instalada en 2005 en el Lucio de Los Ánsares.
Foto: FLUMEN-UPC.



En cuanto a la calidad del agua de la marisma, además de estas nueve estaciones automáticas de instalación reciente, como se ha dicho antes el PND tiene desde 1995 una red de muestreo de agua de la marisma de 40 puntos que coinciden con escalas limnimétricas y compuertas. La frecuencia de los muestreos es aproximadamente mensual, siempre que hubiera agua disponible. Los datos aún no han sido explotados y se trabaja en los mismos. No obstante, la red no controla la dinámica de la evolución del límite entre la marisma dulce y la marisma salobre, ni tampoco el aporte y comportamiento de los nutrientes y microcontaminantes, salvo en estudios ocasionales.

En cuantos a las formaciones palustres de los mantos eólicos de Doñana, no existe una red de control de niveles de agua, ni de superficie inundada, ni de la composición química y calidad de las aguas. La escasa información histórica procede de proyectos de investigación de índole ecológica o hidrológica, pero con carácter local, y corresponde a periodos de tiempo cortos (tres o cuatro años) y no continuos. Se refiere principalmente a las lagunas de Santa Olalla, Dulce, Carrizos, Brezo, Zahillo o Las Verdes, y la información se encuentra diseminada en publicaciones y tesis doctorales de las universidades y centros de investigación responsables de los proyectos.

A pesar de la relevancia de los humedales en la biodiversidad de Doñana, los procesos ecológicos de las zonas encharcables empezaron a ser conocidos hace poco, ya que los datos disponibles son locales y tienen poca continuidad en el tiempo, al depender de proyectos de investigación. La combinación de los distintos patrones de funcionamiento hidrológico con la ubicación,

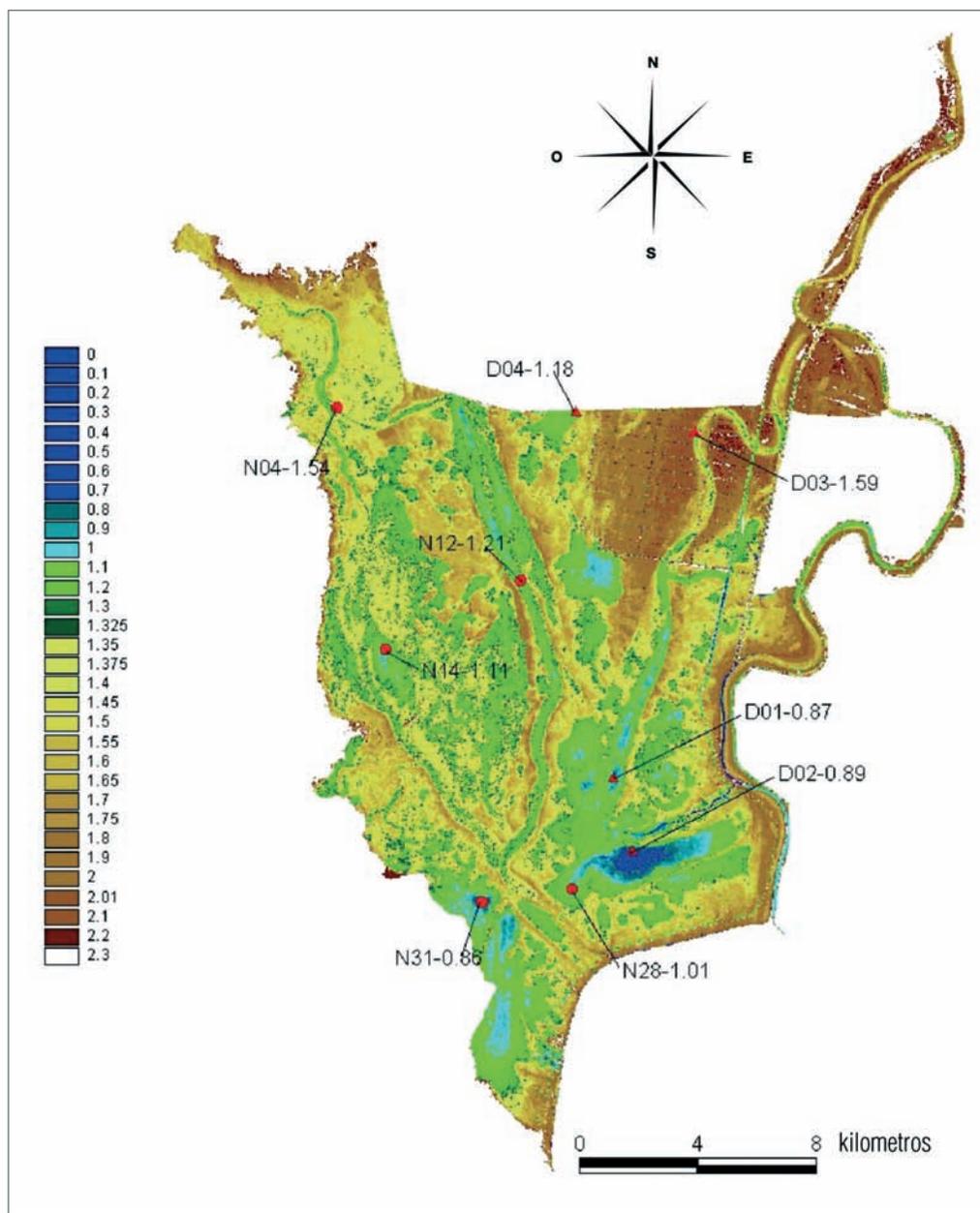


Figura 4.2.

Situación de las estaciones de control del agua en la marisma (con su código) sobre un mapa digitalizado de alturas (m) del terreno. Círculos: estaciones del PND. Triángulos: estaciones del grupo de investigación FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña. Las estaciones miden en continuo lámina de agua y varios parámetros físico químicos tales como salinidad y temperatura. El acceso a los datos es remoto, por vía módem.

Cartografía del Proyecto Doñana 2005-FLUMEN.

origen y evolución morfológica de las cubetas proporciona un amplio rango de variabilidad ecológica y un alto nivel de biodiversidad. La profundidad y extensión de la lámina de agua en

las zonas encharcables, su variabilidad temporal y espacial y su relación con los cuerpos de agua subterránea asociados son factores de control determinantes de los procesos ecológicos esencia-

Inicio de la perforación a rotación de un sondeo piezométrico en el área regable al norte de El Rocío (1994) dentro del programa de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. En primer término se muestra la excavación de la balsa de lodos donde se puede ver la pequeña capa de arena eólica sobre las arenas fluviales. Foto: EC.



les dentro y en el entorno de las formaciones palustres, los cuáles deberían se controlados.

La red deseable debería consistir en estaciones de control manuales, automáticas o mixtas, de la cantidad y calidad, orientadas a la gestión, instaladas en formaciones de referencia seleccionadas.

También debería incluir la observación periódica de imágenes de satélite, ocasionalmente combinada con reconocimientos periódicos desde vuelos a poca altura con sensores específicos para la identificación de cuerpos de agua y de vegetación freatóftica. Un ejemplo de la aplicación de estas técnicas puede verse en Antón–Pacheco et al. (2006).

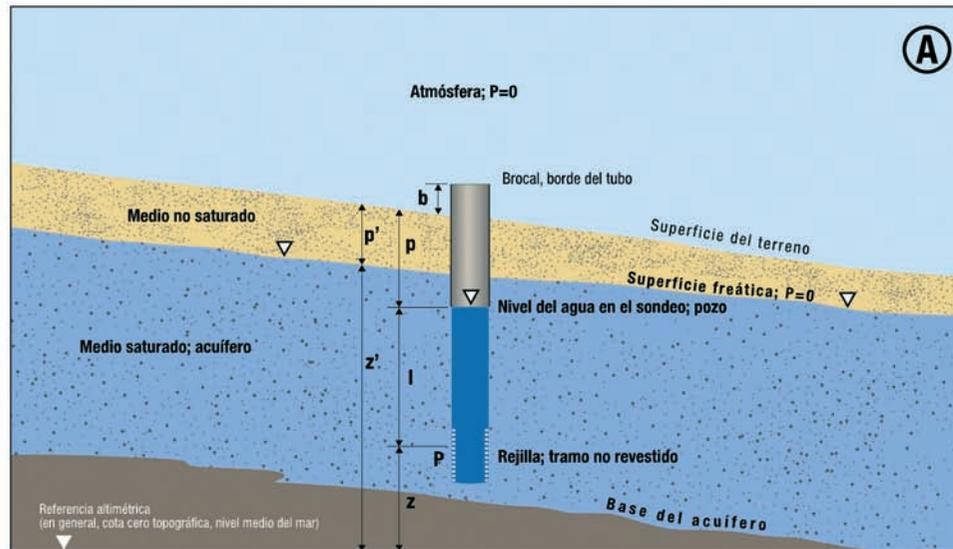
Sondeo múltiple para medir niveles y tomar muestras a diferentes profundidades en la formación de arenas saturadas superior. Finca El Tejar, sector regable al sur de La Rocina, junto al área protegida. Foto: EC (1995).



Redes de observación de las aguas subterráneas

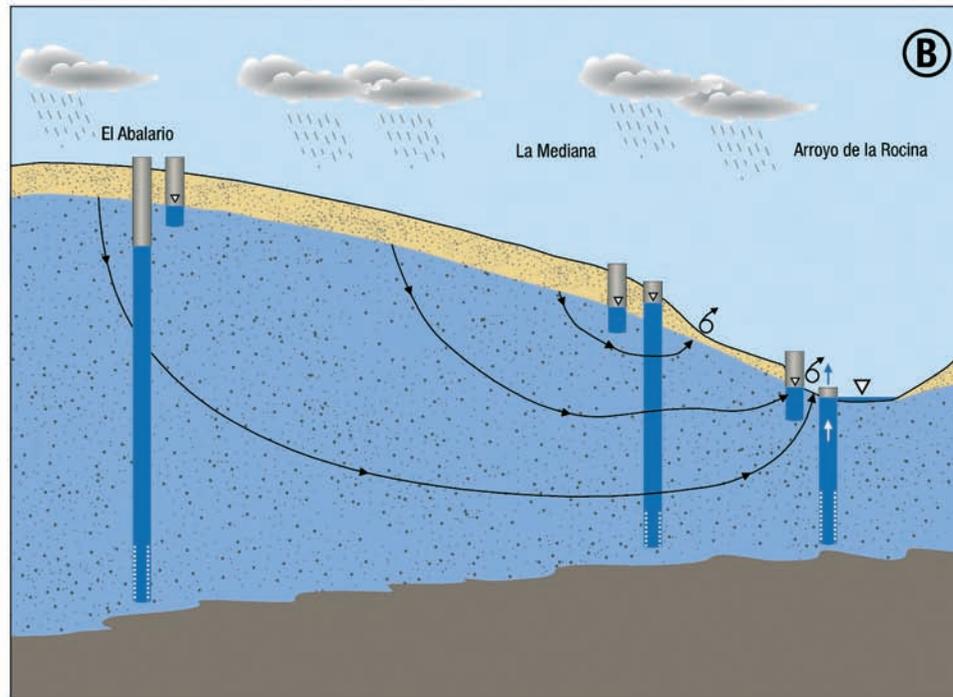
En el Área de Doñana la mayor parte de las actividades económicas y sus ecosistemas dependen de una u otra forma del agua subterránea. Así, el control temporal y espacial de la evolución de los niveles freáticos y piezométricos, y de la composición química y de la calidad, es una de

Cuadro 4.1



p = Profundidad del nivel del agua; profundidad del nivel piezométrico
 p' = Profundidad de la superficie freática
 P = Presión del agua en la rejilla = $\gamma \cdot l$ γ = peso específico del agua
 l = Altura de agua que equilibra la presión P

z ; z' = Elevación sobre la referencia altimétrica
 $z + l$ = Nivel piezométrico
 z' = Nivel freático
 b = Altura del brocal o borde del tubo sobre el terreno



Surgencia y su nivel
 Manantiales
 Recarga
 Línea de flujo

Niveles piezométricos

Se llama nivel piezométrico a la altura del nivel del agua dentro de un sondeo o pozo con respecto a una determinada referencia altimétrica. Como indica la **figura A**, el nivel piezométrico es la suma de la longitud de la columna de agua (se supone que es dulce) que equilibra la presión P existente a la profundidad de la rejilla o tramo de contacto con el medio acuífero (l), más la altura de la rejilla sobre la referencia altimétrica (z). Si la perforación llega justo a la superficie superior de la zona saturada del terreno, el nivel piezométrico coincide con el nivel freático. En un acuífero cautivo (ver Cuadro 3.2) el nivel piezométrico queda por encima del techo del mismo.

El término "piezométrico" hace referencia a la medida de la presión del agua en un punto o tramo del acuífero. El sondeo o perforación que se utiliza para medirla se llama piezómetro. Dicho sondeo está entubado y aislado del medio salvo a la profundidad a la que se mide el nivel piezométrico, que puede estar sin revestir o bien tener una rejilla que impida que las partículas de terreno penetren en la perforación e invadan su interior. Este es el caso de Doñana, por tratarse de un medio arenoso no consolidado.

En la **figura B** se muestra cómo el valor del nivel piezométrico depende de la profundidad en las porciones de un acuífero en las que el flujo del agua subterránea no es horizontal. En las áreas de recarga (por ejemplo en El Abalarío) el valor del nivel piezométrico decrece con la profundidad, mientras que en las zonas de descarga (por ejemplo en La Mediana, antes de los bombeos para regadío) el nivel piezométrico aumenta con la profundidad y los piezómetros y pozos profundos pueden incluso ser surgentes (antes llamados artesianos, aunque esa denominación ya no se usa), es decir que el agua mana naturalmente a la superficie. En pozos y sondeos surgentes se puede conocer la presión del agua en el terreno a la profundidad de la rejilla poniendo un cierre con un manómetro en la boca de la entubación. En las proximidades de La Rocina y en el límite de La Vera y La Retuerta con la marisma hay varios sondeos surgentes, y aún había más antes de que comenzaran los bombeos intensivos en la cercana área agrícola.



Colocación por hinca de un tubo piezométrico en un sondeo iniciado con barrena manual, en La Vera.

Foto: MM.

las actividades fundamentales para la gestión del territorio. Vease el *Cuadro 4.1* para la explicación de la terminología y conceptos.

La disponibilidad de series temporales de niveles piezométricos completas y bien referenciadas permite obtener información muy relevante sobre el funcionamiento, no sólo pasado y presente de un acuífero, sino también del futuro previsible. Más allá de la información básica que

Detalle del extremo del tubo para un piezómetro somero a colocar en una perforación con barreno manual y colocación final a hinca. Foto: MM.



proporcionan, como la identificación de las zonas de recarga y descarga natural, las trayectorias del flujo del agua subterránea en el terreno o la relación existente con los cuerpos de agua superficial, el estudio adecuado de esas series permite, entre otras cosas, disminuir la incertidumbre en la identificación y cuantificación de tendencias evolutivas (crecientes o decrecientes) del agua almacenada en el sistema acuífero, contrastar los cálculos de recarga y descarga, y calibrar los modelos numéricos de funcionamiento.

En áreas de uso intensivo del agua y del suelo muchos de los aspectos a evaluar requieren comparar la situación modificada por la actividad humana intensa con la previa al inicio de esa actividad, designada como situación natural o situación no influenciada del sistema. Si las series temporales son buenas, muchas veces permiten deducir las características de la situación no influenciada aún cuando las medidas hayan comenzado con el sistema ya modificado.

Entre finales de la década de 1970 y finales de la de 1990 han coexistido en Doñana tres grandes redes de control piezométrico sistemático del acuífero: una controlada por el Instituto Andaluz de Reforma Agraria (IARA), otra por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y otra por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHGQ). Desde aproximadamente el año 2000 existe una sola red piezométrica, gestionada por la CHGQ (y ahora por la AAA), que integra las anteriores. Integra también la de otros organismos que han mantenido redes ocasionales de mucha menor entidad y de frecuencia no regular. Es el caso de la Estación Biológica de Doñana, dentro de la Reserva Biológica, o del Parque Nacional de Doñana, que entre

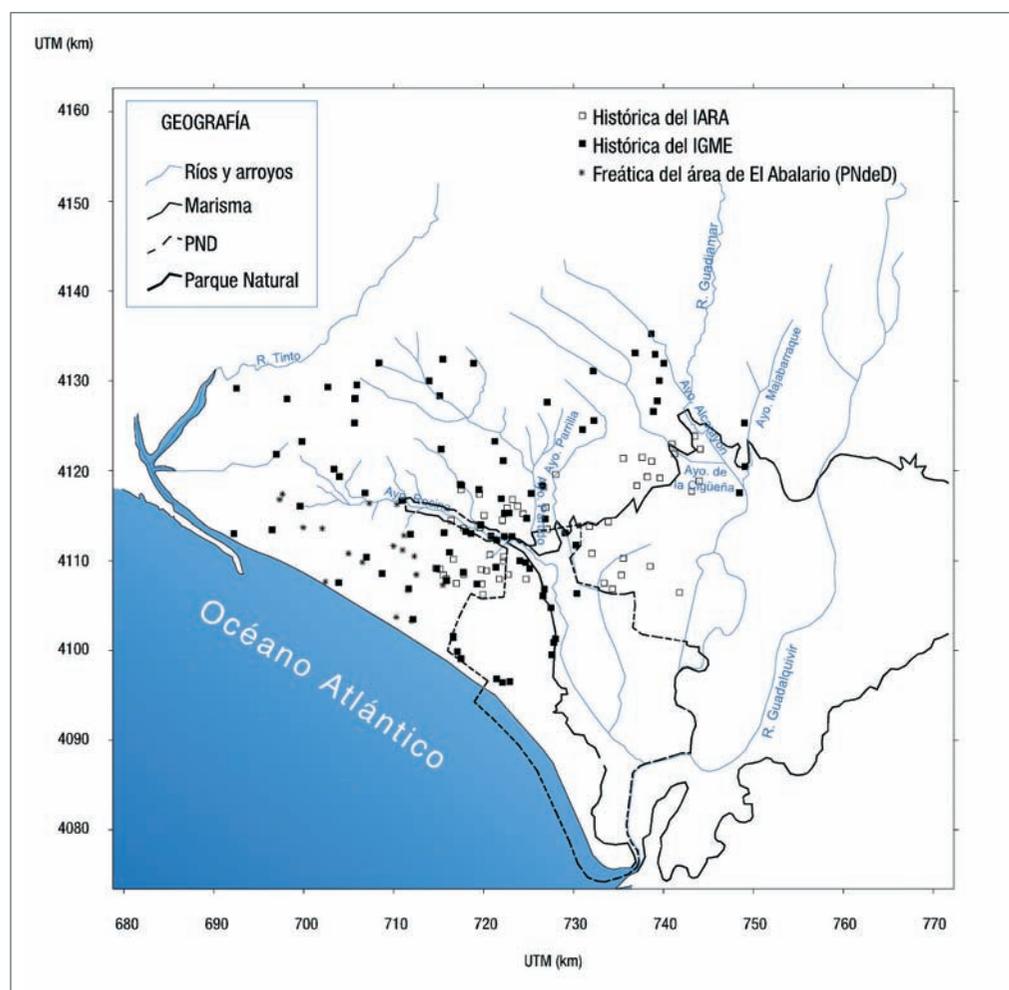


Figura 4.3

Redes piezométricas históricas del Instituto Andaluz de Reforma Agraria (IARA) y del Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y red de control freático del antiguo Parque Natural de Doñana (PNatD) en el área de El Abalario.

Fuente: bases de datos del IGME, IARA y PND.

1987 y 1990 controló una treintena de puntos dentro del Parque, fundamentalmente en torno a lagunas y lucios, y que en el área de El Abalario observa otros 35 puntos, principalmente de control de la superficie freática. Esta última red fue diseñada en 1994 por el Grupo de Hidrología Subterránea de la UPC para el seguimiento de los efectos de la restauración ecológica del complejo lagunar de El Abalario–Ribatehilos tras la eliminación del bosque de eucaliptos. Está formada por piezómetros cortos (de menos de 12 m),

pozos de brocal y dos emplazamientos de sondeos puntuales ubicados en el médano costero de El Arenosillo y El Asperillo (Figura 4.3). Hay medidas manuales mensuales entre 1994 y 1997, y de nuevo entre 2001 y la actualidad.

La red piezométrica histórica del IARA estuvo operativa de forma sistemática entre 1999 y la primera mitad de 2003, y fue también usada para el control de la calidad del agua subterránea en las zonas de extracción por bombeo. Desde 1985 se habían realizado otras campañas,

aunque menos sistemáticas. El IARA se hizo cargo de la información histórica sobre niveles piezométricos y calidad del agua subterránea del área sometida a transformación por el Plan Regable Almonte–Marismas que gestionaban el antiguo Instituto Nacional de Colonización (INC) y luego el Instituto para la Reforma y el Desarrollo Agrario (IRYDA). Los datos abarcan aproximadamente el periodo 1975–1984. Los puntos de medida eran principalmente pozos construidos en la década de 1970 dentro del Plan, y el objetivo era el control de la evolución piezométrica y de la calidad del agua subterránea en las áreas de bombeo más intenso. La red era variable de unos años a otros, dependiendo esencialmente de la accesibilidad a los pozos, entre alrededor de 100 y 290 (Figura 4.3). La frecuencia de medida fue quincenal en los primeros años y después mayoritariamente bimensual. Los pozos de la red tenían varias zonas de admisión, por lo que los niveles piezométricos medidos en cada

punto eran valores promedio a lo largo de la vertical.

El IGME dispone de niveles piezométricos no sistemáticos desde el año 1966, y de forma sistemática entre 1982 y 2003. El número de puntos controlados fue del orden de 120–140, aunque no todos se medían con igual frecuencia. Una selección de alrededor 35 puntos se medía mensualmente; el resto se medían en campañas semestrales (ver Figura 4.3). Estas labores las realiza actualmente la CHGQ. Se trata de sondeos de observación del propio IGME, de pozos de bombeo perforados mecánicamente y con varios tramos de admisión, y pozos de brocal penetrando a lo más unos pocos metros bajo el nivel freático. Así, los niveles piezométricos medidos corresponden tanto a la superficie freática (pozos de brocal) como a posiciones más profundas del acuífero.

Desde 1999 el IGME, a través de su oficina en Sevilla, está desarrollando una red de observación específica a partir de la infraestructura creada por una campaña de sondeos profundos de investigación geológica con recuperación de testigo continuo, entubados con plástico. En 40 emplazamientos se han instalado sensores para el registro continuo de niveles, 20 de ellos como multipiezómetros. La red sigue ampliándose y equipándose por el IGME, y se siguen instalando sensores automáticos. Éstos podrán suministrar datos en tiempo real a través de la red wifi de la EBD en el Espacio Natural de Doñana. Dentro de las actividades de investigación propias, el IGME mide de forma manual una red de unos 250 puntos distribuidos por todo el acuífero, incluyendo el sector sur del acuífero del Aljarafe y margen derecha del río Guadalquivir. Los datos están disponibles vía web a través del Sistema de

Piezómetro somero instalado por el equipo de la UPCT en el Soto Grande, una vez acabado. Foto: MM.



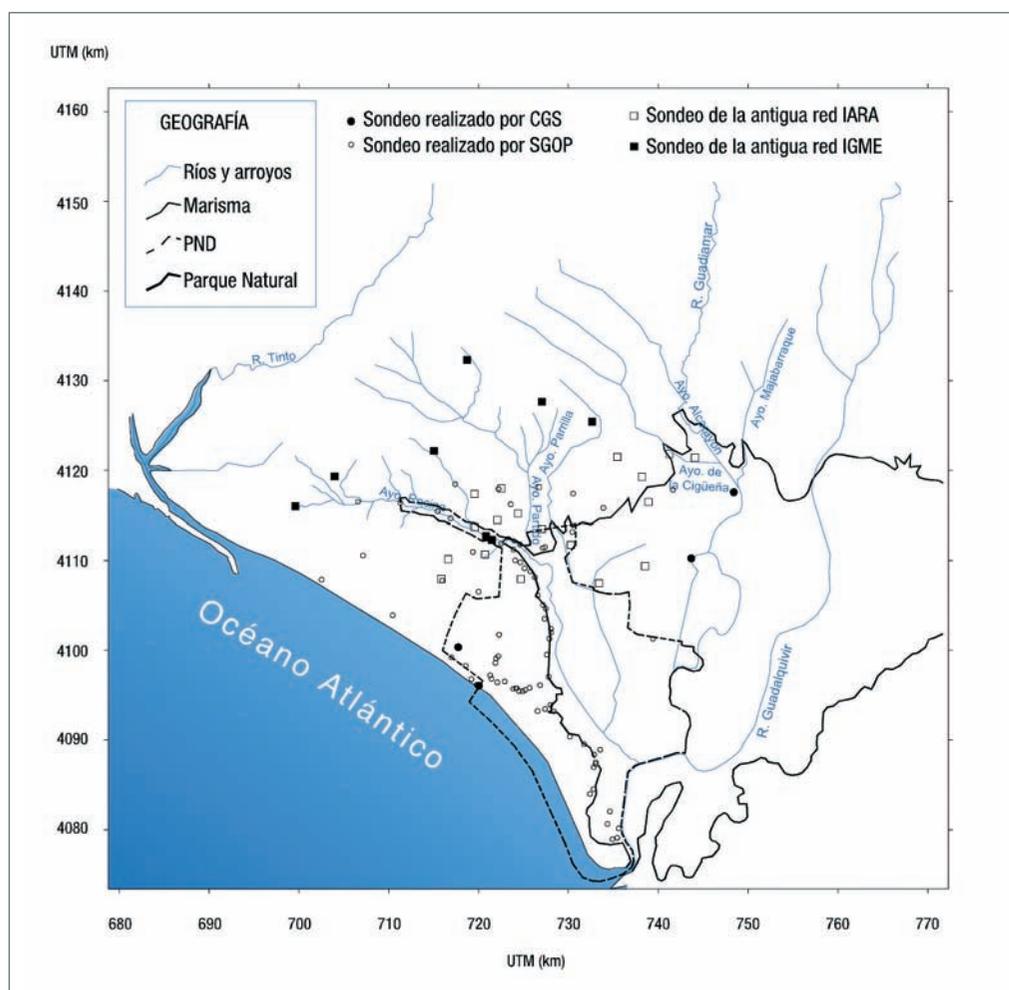


Figura 4.4

Emplazamiento de la red piezométrica de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHGQ) en 2005.

Fuente: CHGQ.

Información de Aguas Subterráneas de Andalucía (SIAS), que como ya se ha dicho es una aplicación creada por el IGME para la Agencia Andaluza del Agua, de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Como también se ha dicho, la información del SIAS es accesible tanto desde la web del IGME como desde la de la Agencia Andaluza del Agua.

Antes del año 1992 la CHGQ tenía una red de control de unos 15 pozos de poca profundidad situados en la margen derecha de La Rocina y en

La Vera (CHGQ, 1993). En 1990 se llevó a cabo un convenio entre el hoy extinto Servicio Geológico de Obras Públicas (SGOP) y la CHGQ mediante el cual el SGOP perforó en pocos años varias baterías de sondeos múltiples ubicados a lo largo de la costa (borde interno de Matalascañas y del médano del Asperillo), de La Vera y de la Rocina, y junto a complejos lagunares o lagunas singulares de todo el manto eólico. Cada emplazamiento tiene hasta 3 ó 4 sondeos, separados unos pocos metros entre sí, con profundidades

crecientes y un único tramo corto (2–4 m) de admisión cada uno, generalmente ubicado cerca del extremo final de la entubación. En 1994 había ya diez de estos emplazamientos, algunos de los cuáles se instrumentaron con sensores automáticos de nivel. Tras analizar los hidrogramas resultantes y observar la relevancia que tenía medir niveles freáticos y piezométricos de forma independiente, con la asesoría de la UPC, la CHGQ realizó un proyecto que permitió disponer de varias decenas más de emplazamientos en el entorno del Parque Nacional de Doñana. En conjunto se trata de 21 emplazamientos múltiples y 26 individuales perforados por el SGOP, más 24 emplazamientos múltiples perforados por la Compañía General de Sondeos (CGS) con idéntico diseño a los del SGOP. Vease el *Cuadro 4.2* para consideraciones sobre el diseño de la red piezométrica y de sondeos de muestreo.

La red piezométrica actual de la CHGQ está formada por 101 emplazamientos con 179 pie-

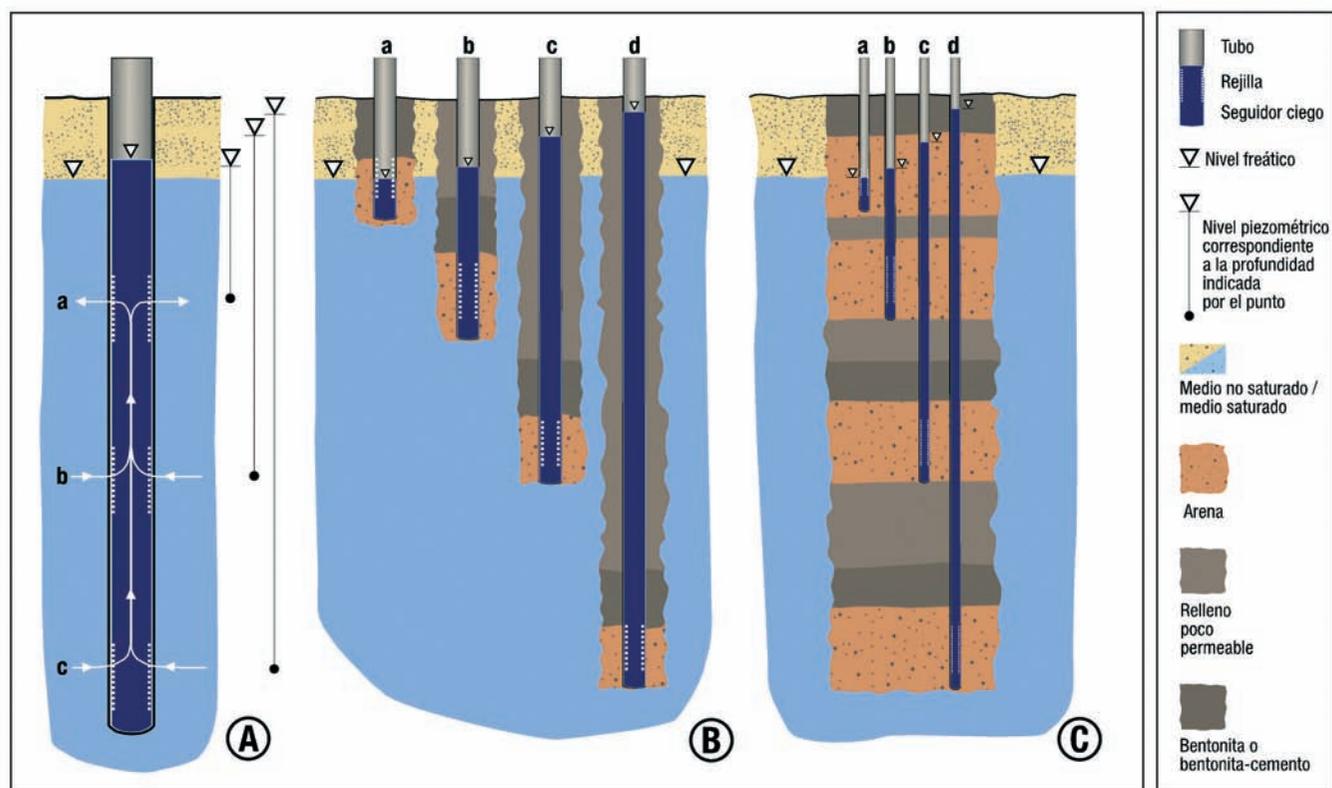
zómetros, y data del año 2003. Hay 60 emplazamientos con un único piezómetro, 19 con dos piezómetros, 15 con tres piezómetros y 9 con cuatro piezómetros. De ellos 49 emplazamientos con 89 piezómetros fueron instalados por el SGOP, 24 emplazamientos con 60 tubos fueron construidos por la Compañía General de Sondeos (CGS), 19 emplazamientos (monopiezómetro) son antiguos pozos del IRYDA–IARA y otros 9 emplazamientos son piezómetros que han sido construidos por el IGME. De esta red, en principio con medida manual mensual, se tiene datos en algunos emplazamientos desde 1978, sumando los datos tomados por el equipo de la UPC. Un buen número de sondeos está equipado con sensores automáticos que proporcionan un registro continuo de niveles (Palancar et al., 1996). La ubicación de los emplazamientos se muestra en la *Figura 4.4*.

La red piezométrica actual de la CHGQ es excelente para el conocimiento del flujo del agua subterránea en tres dimensiones. La observación individualizada de niveles piezométricos a profundidades distintas en un mismo lugar permite discriminar la contribución relativa de factores naturales (estacionalidad, periodos secos y húmedos, cambio climático, etc.) y antrópicos (bombeos de agua subterránea y su patrón temporal) sobre el descenso acumulado interanual de los niveles freáticos y piezométricos profundos o la evolución del patrón de inundación de algunas lagunas, entre otros aspectos de interés. La red de observación freática en el área de El Abalario se puede considerar representativa respecto a la observación de la oscilación de la superficie freática en la zona, y su mantenimiento es muy relevante para los estudios de la evolución actual

Piezómetros en el ecotono de La Vera, cerca del Pozo de Don Ignacio. Uno de ellos tiene una caja sobreelevada por ser ligeramente surgente. Foto: MM.



Cuadro 4.2



Piezómetros y niveles de observación

La construcción de piezómetros y sondeos de observación requiere un diseño apropiado y una técnica de construcción adecuada en función del patrón de flujo existente en los acuíferos. En arenas, como las del Área de Doñana, las dificultades pueden ser notorias y se requiere el empleo de lodos de perforación para estabilizar las paredes de la perforación durante su ejecución. Eso supone introducir fluidos en el terreno —en especial si la técnica empleada no es depurada— que después pueden ser difíciles y lentos de eliminar, y que suelen contaminar las muestras de agua que se obtienen para estudios hidroquímicos. En terrenos con permeabilidades moderadas y flujos naturales del agua pequeños, como es el caso de Doñana, la contaminación producida puede perdurar durante años.

En áreas donde existen variaciones del nivel piezométrico con la profundidad, por ejemplo aumentando, la entubación con rejillas largas o con varios tramos ranurados, como se hizo inicialmente en Doñana, supone generar flujos verticales dentro de la entubación. Así, en el caso que muestra la **figura A** ascienden desde **c** y **b** hasta **a**, observándose un nivel piezométrico intermedio que, además, es diferente del nivel freático. Además, la composición de las muestras que se tomen para estudios hidroquímicos (sea cual sea la profundidad a la que se tomen) estará dominada por la composición del agua en el terreno a la profundidad **c**, siendo imposible observar la composición del agua a las profundidades **b** y **a**.

Por esta razón, y teniendo en cuenta las posibilidades reales de perforación, en la nueva red de control piezométrico e hidroquímico que la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir realizó en la década de 1990 se adoptó el diseño de la **figura B**, con rejillas cortas en tubos instalados en perforaciones separadas. Frente al tramo de rejilla de cada tubo, entre la propia rejilla y el terreno, se realizó un relleno de arena o gravilla para facilitar el flujo del agua al interior de la entubación. Por encima del tramo ranurado se realizó un relleno de bentonita-cemento para aislar el agua contenida en el terreno frente a la rejilla del agua contenida en el terreno que hay por encima. El resto del espacio entre la entubación y el terreno se dejó que se rellenase por derrumbe de las paredes o bien se rellenó con una lechada pobre de cemento. Para mantener las paredes se perforó con lodo de bentonita en unos casos y en otros con un polímero orgánico degradable. El resultado es que los piezómetros son buenos para la observación de niveles a distintas profundidades, pero en varios de ellos la contaminación del agua del terreno por los fluidos de perforación ha persistido durante años.

También se ensayó el diseño de la **figura C** (sondeo de la Finca El Tejar, cerca de la margen sur del arroyo de La Rocina). Una perforación de gran diámetro, ejecutada a percusión con avance previo de la tubería de revestimiento, sin aportar fluidos adicionales, se equipó con varios tubos, cada uno con una rejilla a distinta profundidad y con separaciones de bentonita y de relleno arcilloso entre los tramos de rejilla. Las dificultades de construcción fueron notables, de modo que no fue posible repetirlo por no encontrar una empresa adecuada.

En cualquier caso, en acuíferos arenosos como el de Doñana, es importante que cada tubo tenga la rejilla adecuada para que la arena no penetre en el interior de la entubación y la relleno, que exista un cierre en el fondo de la entubación, que las uniones de los tramos de tubería sean herméticas y que exista una cementación superior que impida la entrada de agua desde la superficie.

y futura de la red hídrica y de los humedales en la zona. Actualmente hay varias redes locales de estudio con piezómetros freáticos, como en el entorno del complejo lagunar de Santa Olalla y del sistema de drenaje de los Sotos, construidos por los grupos de investigación de la UPC y la UPCT en el marco de proyectos financiados por la CICYT y por el Programa Doñana 2005. El IGME colabora en las mediciones mensuales.

El conocimiento y observación de la calidad del agua subterránea es aún pobre y esporádico, y no exento de dificultades, además de tener asociado un notable coste.

Las redes de calidad del agua subterránea y de piezometría del IARA fueron coincidentes y estuvieron en activo, de forma sistemática, entre 1999 y la primera mitad de 2003. Entre 1985 y 1999 también se realizaron algunos muestreos, aunque esporádicos y/o durante periodos cortos. Además, el IARA incorporó la información generada y/o recopilada por los extintos INC e IRYDA sobre la zona de influencia del Plan Regable Almonte–Marismas desde 1975. El objetivo era el control de la calidad del agua subterránea en las áreas de bombeo más intenso, con especial atención a la posible contaminación agrícola y para controlar el desplazamiento del frente salino detectado por el Proyecto FAO–Guadalquivir en el sector marismas. Debido a que todos los puntos de control de esta red tienen varios tramos ranurados o zonas de admisión, la calidad del agua medida en cada punto corresponde a la profundidad del mayor nivel piezométrico, o a mezclas del agua que entra a la entubación a través de todas las rejillas. Esta situación puede ser útil –no en todos los casos– para conocer la evolución de la calidad del agua desde el punto de vista del uso que se le

va a dar (agrícola en este caso), pero no informa adecuadamente de la evolución de la calidad del agua en el acuífero, pues las muestras no siempre corresponden a una profundidad concreta conocida, y pueden ser una mezcla variable con el tiempo y las circunstancias. En ocasiones esto puede dar origen a serias malinterpretaciones.

También el IGME ha generado datos de calidad del acuífero de Doñana desde la década de 1970, aunque las mediciones periódicas y sistemáticas comenzaron en 1982 y terminaron en 2003. Los parámetros medidos son los físico químicos, componentes mayoritarios y nitrato. Esta red constaba de 15 puntos medidos con una periodicidad semestral. En la actualidad se mantiene a partir de la información que se deriva de acuerdos suscritos por el IGME con las Diputaciones de Huelva y Sevilla. Como complemento a la red de calidad establecida en el sector costero del acuífero Almonte–Marismas, el IGME operó cuatrimestralmente una red específica (cloruro y conductividad eléctrica) de 7 puntos para el control temprano de un posible proceso de intrusión marina desde 1982 hasta 2003.

Las redes de calidad del IGME estaban integradas tanto por sondeos de observación del propio IGME como por pozos. Entre estos últimos había pozos de bombeo, perforados mecánicamente y con varios tramos de filtro, y también pozos de brocal, excavados a mano y penetrando unos pocos metros bajo el nivel freático. Las muestras de agua correspondían pues tanto a la superficie freática (pozos de brocal) como a posiciones más profundas del acuífero, aunque mezclando varios niveles superpuestos verticalmente.

Adicionalmente a la información sobre la calidad del agua generada por los organismos pú-

blicos mencionados, varios grupos de investigación del ámbito universitario (UCM, UPC, UAM, UPCT), con frecuencia en colaboración con el IGME, desde la década de 1980 y hasta la actualidad han generado numerosos datos hidroquímicos (componentes mayoritarios, minoritarios, trazas, isótopos ambientales –oxígeno–18, deuterio, tritio, carbono–13, carbono–14, azufre–34, argón–39, kriptón–85, gases nobles) y conocimiento sobre el origen de la calidad. Este conocimiento se ha plasmando en varias tesis doctorales y varias decenas de publicaciones.

La UPC construyó una base de datos hidroquímicos, isotópicos ambientales, piezométricos y geológicos, con los datos propios más los de los otros organismos, que fue transferida al IGME con ocasión de los trabajos conjuntos realizados tras el accidente minero de Aznalcóllar, y constituye el origen de la base de datos multidisciplinar que mantiene el IGME, con registros históricos desde 1966. La mayor parte de esta información está en la base de datos del IGME, accesible a través del Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAS) de las provincias de Huelva y Sevilla, o a través de la web del Instituto del Agua de Andalucía.

Existe una notable laguna de conocimiento en Doñana acerca de la presencia y comportamiento en agua y suelos de agroquímicos, y en especial de plaguicidas, dado el carácter agrícola del área, su uso en grandes cantidades en arenas y la especial sensibilidad de los ecosistemas a los mismos. Sólo hay algunos datos muy parciales procedentes de estudios ocasionales. Es prioritario disponer de una red adecuada con protocolos detallados de muestreo.

En la actualidad, y para cumplir con las disposiciones de la Directiva Marco del Agua, la CHGQ ha diseñado una red de observación y control de la calidad del agua subterránea para todas las masas (cuerpos) de agua que ha definido. En el acuífero Almonte–Marismas la red consiste en 9 sondeos, 5 de los cuáles se usan para control de la calidad general (parámetros generales de calidad del agua más las sustancias prioritarias según la DMA), 2 se usan para control de la contaminación por nitratos y otros 2 son de uso compartido ver:

<http://www.chguadalquivir.es>

Las redes de control de calidad de las aguas subterráneas deberían complementarse con unas pocas estaciones de muestreo de la composición química (calidad) del agua de lluvia, emplazadas de forma que se cubra la posible variabilidad química territorial.

Para ver la evolución de la contaminación en sentido vertical en las arenas finas, donde el flujo del agua subterránea tiene una componente descendente, cabe construir sondeos múltiples que penetren a diversas profundidades bajo la superficie freática. Han de ser perforados sin agua para no introducir elementos extraños que son muy difíciles de reextraer después. Eso resulta muy difícil en arenas finas saturadas. Se construyó un emplazamiento en el lado Sur de La Rocina (Finca El Tejar), pero sólo se dispone de unas pocas campañas de muestreo. Se ha intentado la construcción de otro emplazamiento, pero no se ha podido resolver con las empresas locales cómo penetrar arenas finas saturadas sin contaminarlas por fluidos de perforación y colocar en ellas tubos bien aislados para el muestreo.

Muestreo del gas del medio no saturado para determinar ^{13}C del CO_2 del suelo, cerca de Los Cabezudos (abril 1995). Se introduce una aguja en el suelo, de la que se extrae el aire con una bomba manual de pistón calibrada. El aire se hace borbotea por tres botellas en serie que contienen agua con cloruro de estroncio e hidróxido sódico, de modo que se atrapa el CO_2 como CO_2Sr precipitado. Foto: EC.



La observación de la composición (calidad) del agua en la zona no saturada del terreno es necesaria para establecer los procesos físico químicos responsables de la modificación de la calidad del agua durante la recarga y para cuantificar la propia recarga. La actividad tiene carácter de estudio y por lo tanto no requiere propiamente una red. El método más común consiste en realizar muestreos periódicos, con barrena manual, cuando es posible, en perfiles verticales de terreno desde la superficie del suelo hasta la franja capilar, para estudiar tanto la fase sólida (mineralogía, conductividad hidráulica, capacidad de intercambio iónico,...) como la líquida mediante la extracción del agua intersticial para análisis químico, así como su evolución con la profundidad y con el tiempo. También se pueden instalar cápsulas de succión a distintas profundidades y extraer y analizar periódicamente el agua

contenida en su interior. No obstante, los experimentos realizados en la década de 1990 por el IGME y la UPC mostraron que las cápsulas de succión no funcionan correctamente en las arenas de Doñana, en especial en las dunas cuando están secas.

Medida de la recarga al acuífero _____

No existe una red ni estaciones aisladas para medir la cantidad y calidad de la recarga a los acuíferos. No obstante, la red piezométrica de la parte superior del acuífero (niveles freáticos) permite ajustar con garantía los modelos de simulación del flujo del agua, lo cual permite cuantificar la recarga. Esto se realizó en el Sector de El Abalarío (Trick, 1998) y en los Cotos (Lozano, 2004) utilizando los datos de la red que mantenía el IGME, y se está realizando en el área de Mimbres–Los Cotos como una actividad dentro del Proyecto Doñana 2005.

La medida de la recarga es principalmente un instrumento para definir el comportamiento de las diferentes áreas a las que se les pueda atribuir un comportamiento interno homogéneo. Una aproximación a la misma se obtiene mediante medición de la humedad del suelo (agua y concentración de cloruros) en muestras destructivas de terreno secuenciadas en vertical, extrayéndolas mediante palín y barrena. Durante varios años lo ha venido realizando en diversos puntos de El Abalarío el Departamento de Agronomía de la Universidad de Córdoba.

El IGME equipó parcelas dotadas con tensiómetros y muestreadores de succión, pero no

funcionó por la baja humedad de retención de las arenas. No es seguro que la medida de perfiles de humedad con sonda neutrónica o con sonda de inducción vaya a dar resultados interpretables, pero se debería experimentar. La relativamente alta pluviosidad local, con eventos frecuentes, hace que no sea posible interpretar los perfiles de concentración isotópica del agua de la zona no saturada producida por procesos de evaporación y difusivos. Los ensayos de recarga con trazador son muy locales y en parcelas que difícilmente son representativas del entorno medio, además de existir desviaciones por conductos preferenciales creados por las raíces del matorral.

Este tipo de actividades se han llevado a cabo en Doñana en los últimos 10–15 años, únicamente en el marco de proyectos de investigación, no de programas de control y vigilancia por parte de los organismos públicos de gestión. Esto supone una duración limitada en el tiempo y la imposibilidad de generar series históricas continuas que permitan la observación temprana de posibles tendencias evolutivas desfavorables debidas a cambios naturales y/o inducidos en las condiciones de recarga.

Conclusiones

Como conclusiones más relevantes de la revisión realizada sobre las redes de control hídrico existentes en el área de interés para Doñana y su accesibilidad, se destacan las siguientes:

Para una eficaz gestión del ciclo hídrico en cualquier lugar del planeta, es necesario disponer de estudios de reconocimiento hidrológico

e hidrogeológico completos, así como de redes de observación y control de la cantidad de agua y de solutos que entran y salen del sistema a gestionar, incluyendo el estudio de sus fuentes y sumideros y de su variabilidad temporal y espacial. Estas redes deben estar diseñadas para observar, de forma integrada y complementaria, todos los aspectos relevantes del ciclo del agua. Esto es especialmente relevante en áreas donde el agua es la principal fuente de bienes y servicios para la sociedad. Además, una parte de ellos se debe a la existencia de ecosistemas particularmente valiosos, como sucede en el Área de Doñana.

Los estudios hidrológicos e hidrogeológicos realizados en Doñana a lo largo de varias décadas (algunos de ellos muy recientes) han permitido tener un conocimiento razonable del funcionamiento del ciclo del agua a escala regional, si bien

Toma de muestras del suelo arenoso para determinar humedad y contenido salino del agua intersticial.

El muestreo se realiza de forma periódica para cuantificar el transporte de solutos hacia la zona saturada.

De la parte superior se van retirando capas de terreno, a diferentes profundidades, que se almacenan herméticamente para evitar la evaporación hasta su tratamiento en laboratorio. Foto: MM.





Instalación de tensiómetros para estudiar la recarga, en una experiencia del IGME anterior a 1990. Los tientos invertidos son una protección de las cabezas de los tensiómetros. Parcela próxima a Hato Villa, en La Vera. Foto: EC.

algunos aspectos concretos mantienen una gran incertidumbre, especialmente en cuanto a la cantidad de los flujos hídricos.

Aunque la situación en el Área de Doñana es buena en algunos aspectos, y en general mejor que en otras áreas españolas, las redes de observación hídrica existentes son heterogéneas e insuficientes para conocer y gestionar bien el ciclo del agua, dada la importancia de los valores naturales y sociales en juego. Por ejemplo, abundan las redes de observación de la aportación atmosférica de agua, pero no existe ninguna que permita conocer la aportación atmosférica de solutos a los flujos hídricos (importante tanto para conocer el origen de la calidad del agua como para cuantificar procesos hídricos y biogeoquímicos). La red de medición de las aportaciones hídricas superficiales es

insuficiente para conocer las aportaciones de agua y de solutos (cantidad y calidad) a la marisma, arroyos y formaciones palustres. La red de observación piezométrica formada por emplazamientos de sondeos puntuales está bien diseñada para conocer la dirección, sentido y tiempos de tránsito de los flujos de agua subterránea, así como la dinámica del transporte de solutos. Sin embargo, no cubre toda el área de interés, quedando fuera de control zonas tan relevantes como la cabecera de la cuenca del arroyo de La Rocina, la zona agrícola ubicada entre Almonte y La Rocina o el entorno de otros ecosistemas relevantes. Tampoco se realiza una observación sistemática del origen de los distintos contaminantes presentes en el agua ni de los procesos de transferencia y transformación de los mismos.

En definitiva, las distintas redes deberían rediseñarse para proporcionar toda la información necesaria para cuantificar los procesos naturales relativos a la cantidad y la calidad el agua, observar de forma temprana la modificación de esos procesos, averiguar las causas de esos cambios, diseñar medidas de atenuación o remediación eficaces y gestionar los distintos usos del agua. Todo ello, además, debería estar centralizado en el organismo encargado de la gestión del ciclo del agua en Doñana, sin perjuicio de que puedan existir redes específicas de observación de parámetros necesarios para continuar los estudios de ampliación del conocimiento científico del medio, que son la base de una buena gestión.

Capítulo V



Ecotono de La Vera.
Abundan las zonas
húmedas mantenidas a
lo largo del año por
descargas de agua
subterránea.
Foto: CMA. JA.

Influencia climática en la hidrología de Doñana

Introducción

La hidrología del Área de Doñana depende en gran manera de la precipitación local y de las tasas de evaporación y evapotranspiración real (transferencia del agua que está por debajo de la superficie del suelo a la atmósfera por los procesos de evaporación y transpiración vegetal), que están controladas principalmente por la temperatura y la presencia, tipo y densidad de la vegetación (Puigdefábregas, 1999), además de las características del suelo. La evapotranspiración es moderada en suelos predominantemente arenosos, en especial en los mantos eólicos, y es alta en los que las arenas contienen una fracción limosa o arcillosa.

La estacionalidad y la variabilidad interanual es una característica esencial de la hidrología superficial del Área de Doñana y de la recarga a los acuíferos, que una vez regularizada por el largo

tiempo de tránsito subterráneo, mantiene manifestaciones más o menos permanentes a lo largo del año.

En este capítulo no se detallan las características climáticas generales, las cuáles se pueden encontrar en otros trabajos (ver Coletto, 2003), sino que se indican los rasgos esenciales del clima de Doñana necesarios para entender el funcionamiento de las componentes superficiales y subterránea del ciclo del agua en la zona. La descripción y comentario de la red climática e hidrometeorológica se desarrolla en el *Capítulo 4*. Algunas consideraciones sobre el cambio climático se incluyen en el *Capítulo 12*.

En el territorio de Doñana no existen trabajos monográficos que analicen con detalle la variabilidad climática a una escala espacio temporal adecuada para su aplicación a estudios funciona-

les, hidrológicos, geomorfológicos y de los ecosistemas acuáticos y terrestres. Los análisis climáticos que se han realizado hasta la fecha en el territorio de Doñana son parciales y forman parte de trabajos cuyo objetivo fundamental son estudios de naturaleza hidrológica o hidrogeológica, cuya orientación atribuye a las variables climáticas un papel más funcional (veáanse como ejemplo Suso y Llamas, 1990; Sacks et al., 1992), y como marco descriptivo para estudios con orientación biológica o ecológica (Serrano et al., 2006). Tan sólo Sousa et al. (2004, 2006) han analizado largas series temporales de la precipitación para tratar de explicar la componente de la desaparición de los humedales de los mantos eólicos del área de El Abalarío.

Sin embargo, esos estudios climáticos adecuados a la escala y variabilidad de los ecosistemas existentes en Doñana son imprescindibles tanto para entender su funcionamiento como para la gestión. Por ejemplo, el régimen hidrológico de los ecosistemas epigénicos (aquellos que dependen de la escorrentía superficial y subsuperficial) está dominado por las variables climáticas más que por las hidrogeológicas, al contrario de lo que ocurre en los ecosistemas hipogénicos (aquellos que dependen del agua subterránea), en los que el hidropereodo (frecuencia y permanencia del agua a lo largo del año) está condicionado por la evolución de los acuíferos con los que se relacionan.

El principal problema a la hora de realizar un análisis pormenorizado del clima en cualquier territorio es la calidad y cantidad de información disponible, en especial en cuanto a series largas de registros meteorológicos e hidrometeorológicos. *Vease el Cuadro 5.1* para una explicación simplificada de la variabilidad y su consideración.

Temperatura

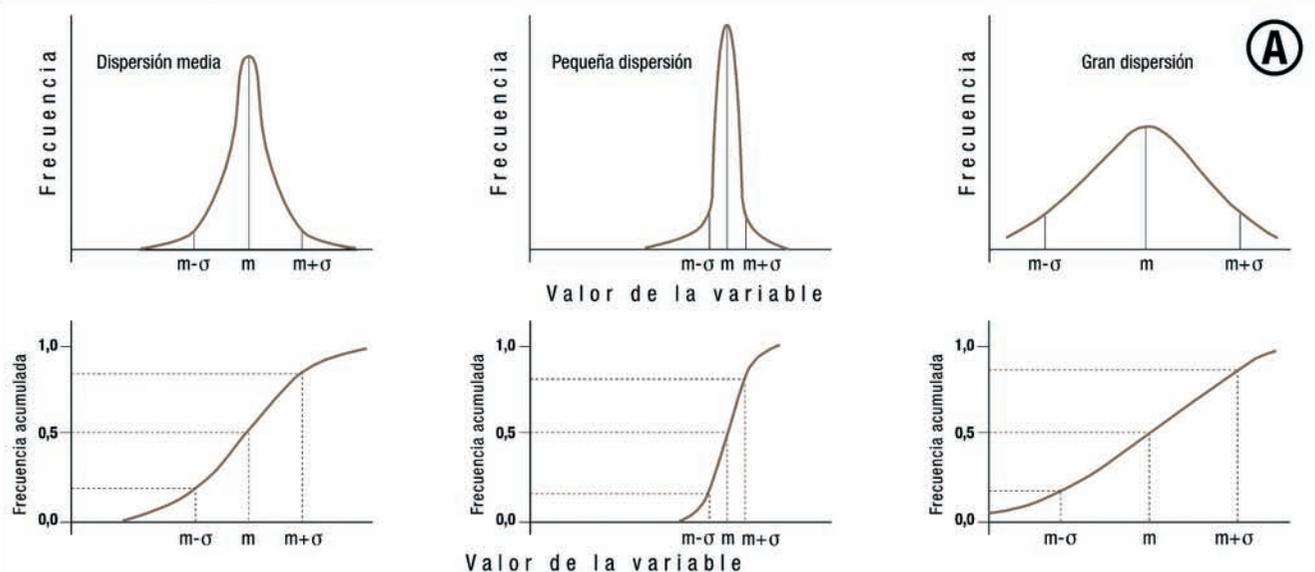
La temperatura media anual del suelo en Doñana varía entre 19 y 20 °C, según el lugar (cartografía térmica del subsuelo, Custodio et al., 1996), siendo la del aire ligeramente inferior (18 a 19 °C). Los valores mayores dominan en la periferia continental y la variabilidad interanual es pequeña.

Las temperaturas atmosféricas medias mensuales y su desviación estándar para el periodo 1900–2000 muestran que el mes más frío del año es enero ($10,7 \pm 1,8$ °C), con un mínimo de 4,4 °C, y el más caluroso agosto ($27,3 \pm 2,5$ °C) con un máximo de 31,8 °C (Coletto, 2003; Sousa y García Murillo, 2003). El valor \pm dado se refiere a la media \pm una desviación estándar. La distribución térmica es razonablemente simétrica.

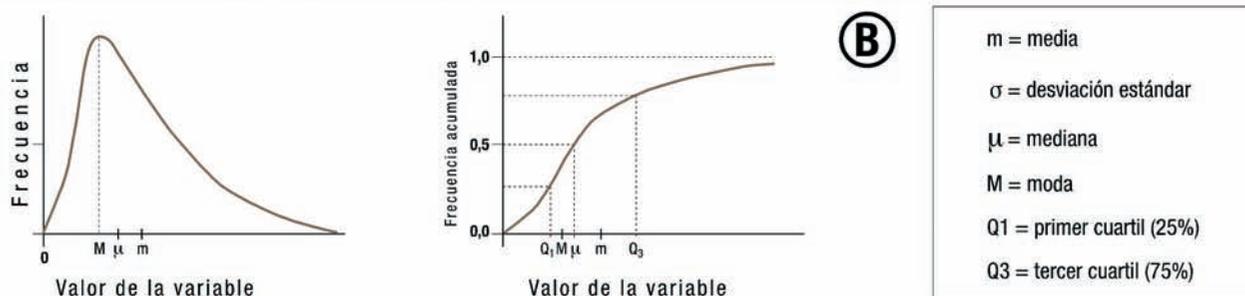
El efecto dulcificante del mar hace que los veranos resulten menos calurosos que en zonas interiores y los inviernos menos fríos, lo que favorece una mayor continentalización hacia el interior y por tanto una mayor amplitud térmica. Las temperaturas máximas son superiores a los 36 °C en los meses de julio y agosto. La máxima histórica registrada (45 °C) se alcanzó en julio de 1995 y la mínima estival histórica registrada es de 17 °C (julio de 1990). Las temperaturas invernales también se ven influidas por el efecto del mar. Los meses más fríos son enero y diciembre. No suelen darse heladas propiamente dichas, aunque la frecuente y típica rociada de la zona sí suele helarse en invierno, dando lugar a escarcha. No obstante, las masas de agua (por ejemplo, de las formaciones palustres) no se llegan a congelar completamente, salvo algunas pequeñas zonas de las orillas (Coletto, 2003). La menor temperatura mínima

Cuadro 5.1

Distribución normal



Distribución asimétrica (sesgada hacia valores bajos)



- m = media
- σ = desviación estándar
- μ = mediana
- M = moda
- Q1 = primer cuartil (25%)
- Q3 = tercer cuartil (75%)

Distribución de los datos observacionales

Muchas veces los datos observacionales a estudiar se distribuyen simétricamente respecto a un valor medio, en cuanto a sus frecuencias y frecuencias acumuladas. Esta distribución es llamada **distribución normal**, y se representa aproximadamente en la **figura A**. En una distribución normal la media (m) coincide con la **mediana** (valor 50% acumulado) y la **moda** (valor máximo). El grado de dispersión de la distribución se mide mediante la desviación estándar sigma (σ desviación tipo), tal como se expone en cualquier texto de estadística. Se tiene que:

Intervalo	$m + \sigma$	$m + 2\sigma$	$m + 3\sigma$
% de sucesos comprendidos	68,3	95,4	99,7

Sin embargo, muchas veces las distribuciones son asimétricas, y están sesgadas unas veces hacia los valores bajos y otras hacia los valores altos. En la **figura B** se muestra una distribución sesgada hacia los valores bajos, como sucede a menudo cuando la variable tiene un valor mínimo, por ejemplo cero. Tal sucede con los valores de precipitaciones o de concentraciones, cuando son muy variables. En estos casos no coinciden la media, la mediana y la moda, y la desviación estándar que se calcula da variabilidades excesivas hacia los valores bajos, e incluso valores negativos para variables esencialmente positivas. Eso representa inadecuadamente la variabilidad (aunque es frecuente indicar dicha desviación estándar), y es mejor indicar los cuartiles (25 y 75%) o unos percentiles adecuados (por ejemplo 20 y 80%, ó 10 y 90%).

Para distribuciones simétricas la variabilidad o incertidumbre se puede mostrar de forma adimensional (en valor absoluto o en porcentaje) como el cociente **m**, llamado **coeficiente de variación**. Para distribuciones muy asimétricas de valores esencialmente positivos, el coeficiente de variación que se calcula puede tomar valores grandes, incluso mayores que 1. Esto es lo que sucede para la variabilidad de las precipitaciones mensuales en el Área de Doñana (ver el texto).

registrada fue de -6 °C en febrero de 1931. En resumen, el régimen térmico del Área de Doñana se caracteriza por una marcada estacionalidad intraanual y una baja variabilidad interanual.

Precipitaciones

La variación interanual de la precipitación es muy marcada y condiciona los patrones de variación temporal de la mayoría de los ecosistemas de Doñana. También presenta importantes oscilaciones estacionales. Todo ello lleva a una gran complejidad a la hora de tipificar y describir correctamente la variabilidad hídrica del Área de Doñana.

Las precipitaciones medias anuales del Área de Doñana varían entre 500 y 600 mm, con los valores mayores en el área Norte y los menores sobre la marisma. La pluviometría media en Bodegones (parte alta del arroyo de La Rocina) es de 678 mm/año para el periodo 1951–1980, al que corresponde una temperatura media de 16,3

°C (Sousa y García Murillo, 2003). Las precipitaciones presentan una clara estacionalidad, con el mínimo en verano y el máximo en diciembre, aunque ocasionalmente en algunos años puede haber un máximo secundario en primavera.

La longitud de las series pluviométricas disponibles es variable y también su continuidad, como se dice en el *Capítulo 4*. En la *Tabla 5.1* se indican las series disponibles en estaciones del área y de sus proximidades.

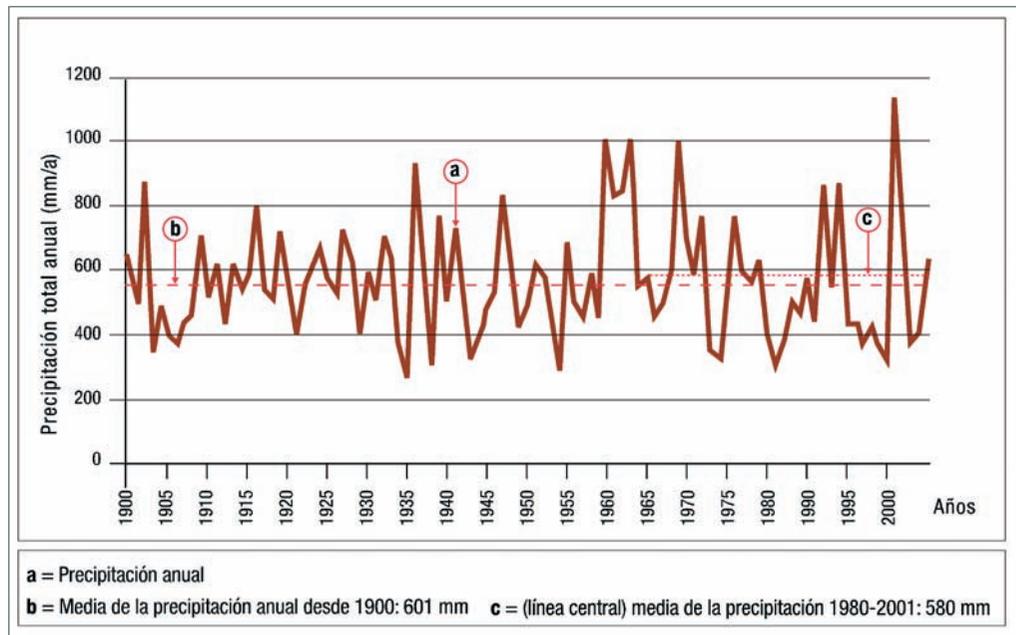
La mayor longitud de registro la tiene la estación de San Fernando (Cádiz), desde 1805, aunque con algunas interrupciones al principio. Lo supera Gibraltar, pero queda fuera del ámbito climático de Doñana. También tiene un largo registro Sevilla–Tablada (en el aeropuerto), aunque tiene interrupciones que se pueden completar con las observaciones realizadas en la Iglesia de la Encarnación de Sevilla. Los años más recientes de la estación de Sevilla–Tablada se han extrapolado por correlación (método de las dobles masas) con la estación del Palacio de Doñana. Esto se puede hacer por la notable similitud climática del área, de

Tabla 5.1. Estaciones con las series pluviométricas más largas en el Área de Doñana y su entorno, pertenecientes al antiguo Instituto Nacional de Meteorología. (modificado de Sousa et al., 2004)

Observatorio	Serie	
	Disponibile	completa más larga
Santúcar de Barrameda (5906)	desde 1888	1913–1987
Huelva (4605)	1903–1984	1903–1983
Palos de la Frontera (4645)	desde 1955	1956–1975
Almonte, Los Bodegones (5851)	1951–1983	1951–1981
Almonte, La Mediana (5856)	1952–1983	1962–1977
Trebujena (5900)	desde 1911	1912–1957
Cádiz, Cortadura (5973)	desde 1839	1853–1892
San Fernando (5972)	desde 1805	1838–1985
Sevilla, Tablada	desde 1936	1986–1990
Sevilla, Iglesia de la Encarnación	1866–1967	1866–1967

Figura 5.1.

Valores de precipitación media anual, según años naturales, para los datos meteorológicos de la estación Sevilla–Tablada en el siglo XX (tomado de Coletto, 2003). a: precipitación anual; b: media de la precipitación anual desde 1900: 501 mm/a; c: (línea central) media de la precipitación 1960–2001: 580 mm/a. Las variaciones de un año a otro son muy importantes. Se aprecia una creciente variabilidad desde el año 1960, no explicada satisfactoriamente.



modo que la estación de Sevilla–Tablada (completada) se puede considerar suficientemente representativa para analizar la evolución y variabilidad en el Área de Doñana (Trick, 1998). Esto es debido, en parte, al relieve llano de todo el Bajo Guadalquivir, que hace que no exista un claro gradiente climático entre la costa y Sevilla (Vannev, 1970; González Sánchez, 1999; Álvarez, 2002).

En Doñana las principales heterogeneidades espaciales radican en la distribución de la precipitación, que es algo mayor en la franja comprendida entre la zona litoral y El Abalarío, ya que la pequeña elevación del terreno justo en la zona del antiguo poblado de igual nombre (unos 70 m sobre el nivel del mar) intercepta parcialmente algunos de los frentes lluviosos en su circulación hacia la zona del arroyo de La Rocina.

En la Figura 5.1 se observan los valores de precipitación media mensual durante el siglo

XX. Los periodos más húmedos de todo el siglo se han dado en las últimas cuatro décadas, con un máximo muy destacable en 1996 y un episodio extraordinario húmedo entre 1960 y 1972. También se han registrado importantes episodios de sequía, como el acontecido de 1990 a 1994, o el previo de 1980 a 1984. En la Figura 5.2 se representa el coeficiente de variación.

Los meses de julio y agosto destacan por su extrema sequedad ($1,5 \pm 4,4$ y $3,4 \pm 9,5$ mm/mes respectivamente), mientras que noviembre y diciembre destacan por ser los meses más lluviosos ($83,8 \pm 64,5$ y $76,1 \pm 67,1$ mm/mes respectivamente). El alto valor de la desviación estándar, que es similar o superior al valor medio, es un índice de la gran variabilidad de un año a otro y de la asimetría de la distribución. En la Figura 5.3 se muestra la distribución porcentual de los meses respecto a la precipitación total anual registrada en siglo XX. Existe un marcado periodo de défi-

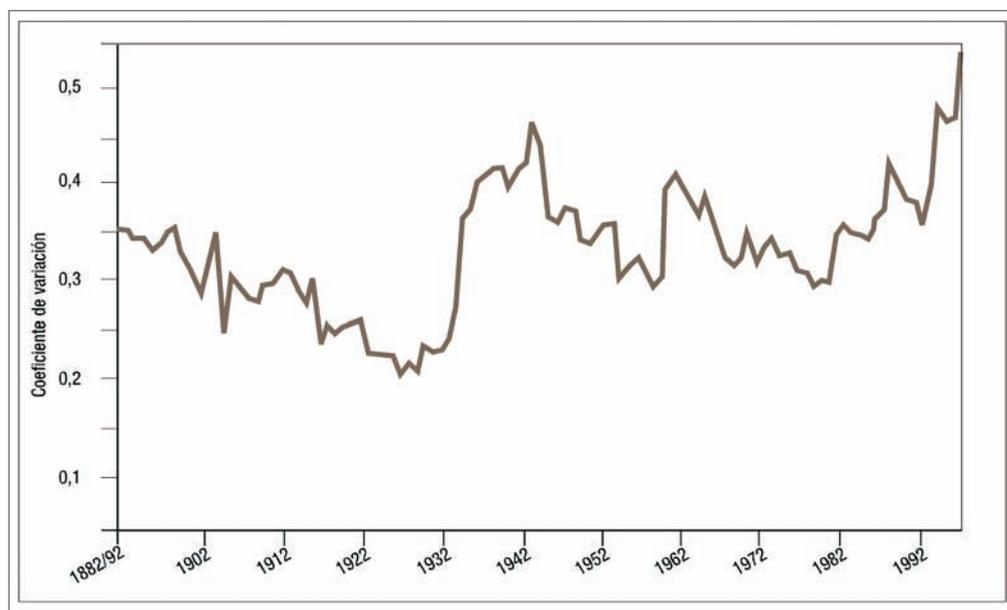


Figura 5.2.
Evolución del coeficiente de variación (desviación estándar/media), computado por periodos progresivos de once años para el observatorio de Sevilla-Tablada. La variabilidad tiende a ser mayor en épocas recientes.
Modificado de García Barrón et al., (2004).

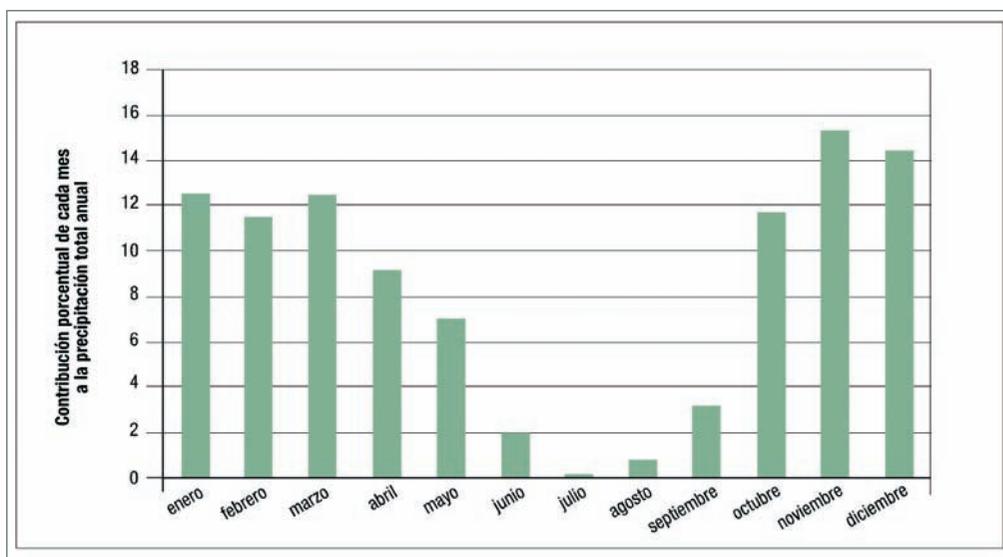
cit hídrico (falta de humedad en el suelo) desde mayo hasta mediados de septiembre, aunque dependiendo del año este periodo se alarga o acorta. En promedio, el 41% de la precipitación es otoñal y el 15% primaveral.

El valor medio de los coeficientes de variación anuales es 0,4 para todo el siglo XX. El coeficiente de variación de las precipitaciones mensuales es muy elevado (la desviación estándar puede superar a la media), con los máximos en los meses de julio y agosto (3,7 y 3,1 respectivamente) y los mínimos entre octubre y mayo, alrededor de 0,9 a 1,0, con un mínimo de 0,7 en abril. Así, las lluvias en Doñana son más predecibles en invierno que en verano, cuando suelen ser torrenciales y pueden llegar a ser muy importantes eventos moduladores de la geomorfología. Por tanto la precipitación, y no la temperatura, es el factor que explica la variabilidad intra e interanual del Área de Doñana.

La *Figura 5.4* muestra la evolución pluviométrica en el Palacio de Doñana para el periodo con datos entre 1979 y 2005, en el que la precipitación media ha sido de 540 mm/año. Se representan las desviaciones anuales acumuladas respecto a la media para remarcar el carácter húmedo o seco de la secuencia. En el periodo considerado existe una tendencia general húmeda moderada pero con fluctuaciones notables, de modo que se tienen etapas secas entre 1979 y 1986, entre 1991 y 1995 y desde 2003, y etapas húmedas entre 1986 y 1989, entre 1996 y 1998 y en el periodo actual 2008–2009. El tramo 1998 a 2003 es de carácter medio a ligeramente húmedo. En 1993 y en 1995 los bajos caudales del río Guadalquivir no permitieron el cultivo de arroz con agua superficial. Las precipitaciones locales en los años hidrológicos secos 1998/99 y 2004/05 fueron respectivamente 214 y 175 mm, o sea casi un tercio del valor medio.

Figura 5.3.

Contribución porcentual de los meses del año a la precipitación total anual. Datos de la estación meteorológica de Sevilla–Tablada para el siglo XX. El periodo estival es notablemente seco, lo que unido a la mayor temperatura (mayor evapotranspiración) hace que la reserva de agua del suelo edáfico se llegue a agotar y sólo persistan funcionales las plantas con raíces que acceden al nivel freático (freatofitas). Tomado de Coletto, (2003).



Estas notables fluctuaciones interanuales forman parte de la naturaleza y esencia del Área de Doñana.

Para lograr una mejor perspectiva de los periodos húmedos y secos se ha utilizado la serie pluviométrica reconstituida de Sevilla–Tablada, que tiene una precipitación media de 573 mm/año. En la *Figura 5.5* se han representado las desviaciones anuales acumuladas. A grandes rasgos, parece haber un ciclo de unos 40 años, muy irregular. Una anomalía principal es la de 1960–65 (extensible hasta 1972), que es un periodo anormalmente húmedo, precedido por un periodo moderadamente seco entre 1940 y 1959, y seguido de otro periodo seco entre 1972 y 1985. Los primeros estudios hidrológicos en el Área de Doñana se iniciaron en ese periodo anormalmente húmedo, y a su final comenzaron los principales desarrollos de aguas subterráneas en Doñana y se iniciaron los trabajos hidrogeológicos. Esta circunstancia tiene interés para la

memoria de situaciones húmedas excepcionales y su efecto diferido.

Evapotranspiración

La evapotranspiración es el paso de agua en forma de vapor desde el suelo a la atmósfera, por el efecto combinado de dos procesos físicos: la evaporación directa desde la zona no saturada y franja capilar del suelo, y la transpiración por los vegetales (*vease el Cuadro 2.1*). En zonas donde el nivel freático es somero y el suelo está formado por materiales sueltos tales como arenas, la evapotranspiración puede alcanzar hasta la parte superior de la zona saturada del terreno (franja capilar). Este es el caso de las áreas con plantas cuyas raíces penetran hasta la capa capilar y el nivel freático (freatofitas).

La evapotranspiración es un proceso variable espacial y temporalmente en una misma zona. La

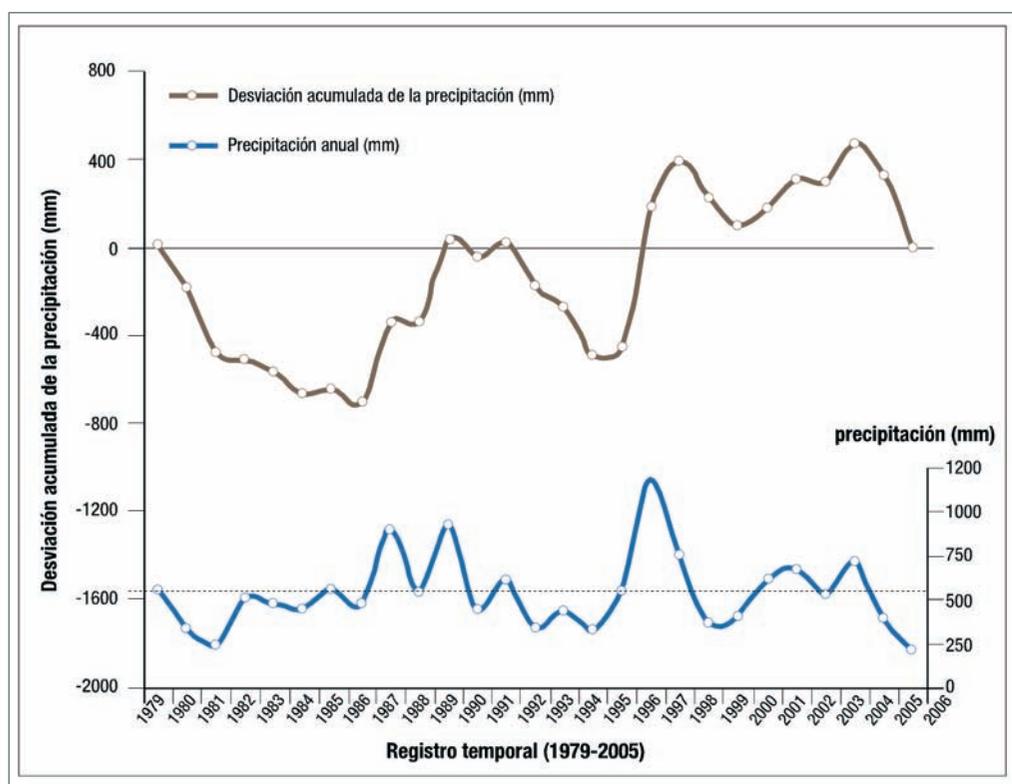


Figura 5.4. Precipitación anual y desviación acumulada de la precipitación registrada en la estación del Palacio de Doñana durante el periodo 1979–2005, con una precipitación media en el periodo de 539,6 mm. El decrecimiento de la desviación acumulada señala periodos secos y su crecimiento periodos húmedos.

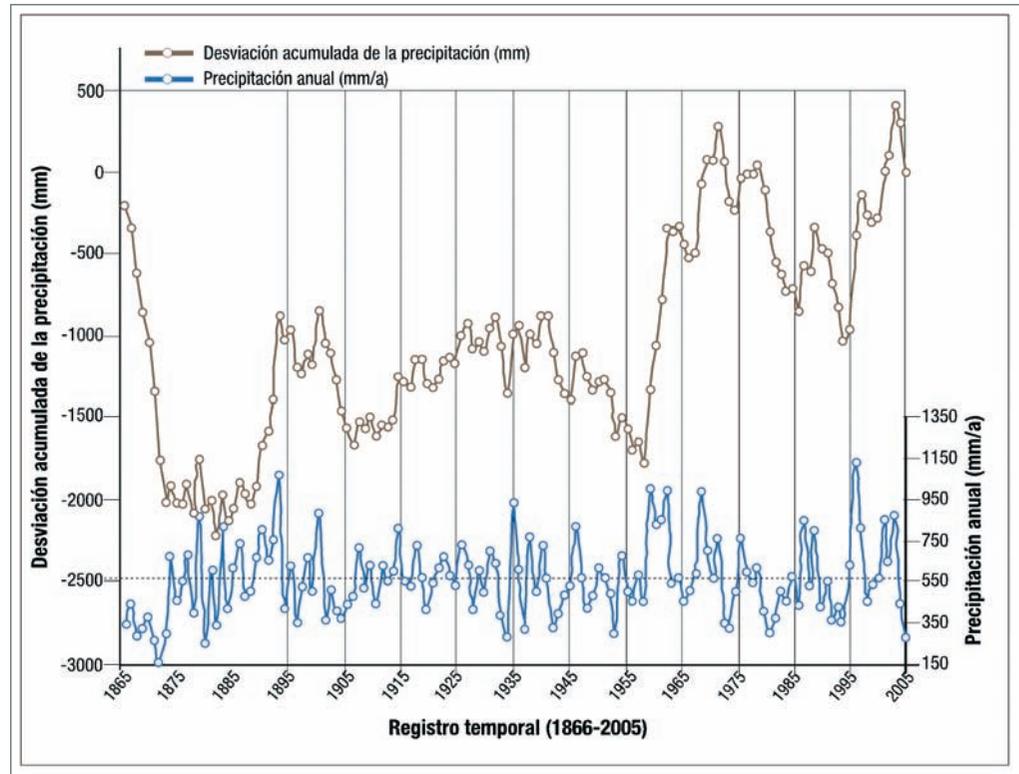
precisión espacial requiere tener información arealmente distribuida de las distintas situaciones de uso del suelo (cobertura vegetal y su manejo) existentes en la zona de estudio. Estas variaciones pueden ser muy relevantes en zonas donde existen humedales freáticos y comunidades de vegetación freatofítica (la evapotranspiración se produce directamente desde el nivel freático durante todo o la mayor parte del año), dunas (la menor rugosidad superficial y el viento aumentan la evaporación), sectores en cultivo (mayor disponibilidad de agua en los poros del suelo y una vegetación habitualmente estacional) y otras zonas sin manejar o con un manejo mínimo (variaciones espaciales y temporales dependientes del tipo de vegetación y la climatología). Para la ma-

yoría de los cálculos hidrológicos la precisión temporal requiere tener información detallada ya que los cálculos de balance hídrico se suelen hacer con intervalos de tiempo diarios. Muchos métodos de cálculo de la evapotranspiración proporcionan valores mensuales, que hay que desagregar a valores diarios para realizar los balances.

La evapotranspiración potencial (ETP) es la que se produciría si la planta encontrase el suelo edáfico siempre con humedad suficiente para no sufrir estrés hídrico. Con los datos de lluvia y de temperatura media mensual de todas las estaciones termopluviométricas que están en activo o lo han estado durante un período de tiempo en el Área de Doñana se puede estimar el valor de la ETP en buena parte de la misma. Utilizando se-

Figura 5.5.

Precipitación y desviación acumulada de la precipitación registrada en la estación de Sevilla–Tablada, con precipitación media de 555,4 mm/a. Los valores de los periodos 1886–1921 y 1991–2005 se han estimado mediante el método de dobles masas a partir del registro temporal coincidente en las estaciones Sevilla–Iglesia de la Encarnación (periodos 1922–1930 y 1951–1966) y Palacio de Doñana (periodo 1979–1990).



ries temporales de lluvia y temperatura, cuya cobertura temporal es variable aunque en general coincidente, y aplicando el método de Thornthwaite (Custodio y Llamas, 1976; 1983), se obtienen los valores de ETP de la *Tabla 5.2*. En las condiciones climáticas imperantes en la mayor

parte de Doñana la relación anual ETP/P es siempre superior a uno, y con frecuencia es igual o mayor que 1,5. Esto significa que durante una parte del año (que se concentra en los meses de junio a octubre) la vegetación natural no freo- fítica dispone de menos agua de la necesaria, está

Tabla 5.2. Valores de ETP calculados para Doñana con datos de estaciones termopluviométricas que cubren la mayor parte de la superficie de la misma. Datos brutos de P y ETP tomados de www.ucm.es/info/cif. (Valores medios)

Estación	P mm/año	ETP mm/año	ETP/P	Serie usada
Moguer	461	888	1,93	1963-1985
El Abalarío	699	834	1,19	1949-1969
El Alamillo	546	790	1,44	1951-1959
Aznalcázar–FAO	530	847	1,60	1972-1989
La Palma del Condado	674	1001	1,48	1969-1981
Escacena del Campo	947	865	0,91	1948-1969

sometida a estrés hídrico y cesa de evapotranspirar, o muere (vegetación anual).

Existen cálculos de evapotranspiración potencial en distintos trabajos realizados en la zona para diversos periodos temporales, tales como los realizados por Trick (1998), con valores medios anuales de aproximadamente 870 mm según el método de Thornthwaite. El método semiempírico de Penman se puede ajustar más convenientemente al clima de la zona y es uno de los métodos de más extendida utilización. Este método requiere conocer un conjunto de variables climáticas que en general no están disponibles. Estas variables se están registrando ya en las estaciones automáticas recientemente instaladas por la EBD como Infraestructura Técnico Científica Singular del Ministerio de Ciencia e Innovación, pero en el pasado sólo se han medido en los muestreos intensivos realizados por Coletto (2003) en el periodo febrero 1998 a febrero 2000. Usando estos últimos datos se han determinado los valores que se muestran en la *Figura*

5.6. El valor medio de evapotranspiración potencial para Doñana en este periodo fue ligeramente inferior a 828 mm/año. Según Olias et al. (2003), para el área de Los Mimbres los métodos de Thornthwaite y Makkink dan valores entre 915 y 980 mm/año, que se reducen algo al aplicar el método de Penman, a 890–940 mm/año.

La evapotranspiración real (ETR) es la que la vegetación transpira y se evapora del suelo teniendo en cuenta que ésta se reduce o no se produce al disminuir la humedad del suelo edáfico cuando no hay lluvia. No se conoce la existencia de medidas directas de la evapotranspiración real en el área de Doñana. Hay un estudio con lisímetros (Olias et al., 2003), pero es muy corto (dos años) y, además, coincide con el periodo seco de 1991–1995. Es muy probable que algunas de las grandes fincas agrícolas de la zona tengan datos de medidos in situ, pero se desconoce. Por ello es necesario recurrir a la estimación.

Suponiendo valores para la reserva útil del suelo edáfico de entre 100 y 200 mm, represen-

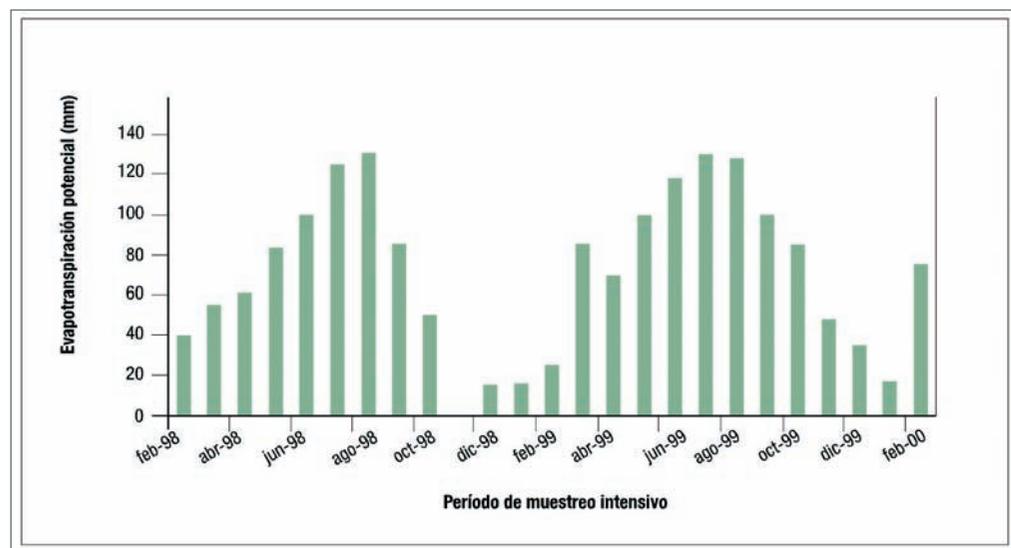


Figura 5.6.

Tasas de evapotranspiración potencial (ETP) calculadas para el área de Doñana según el método de Penman para el periodo 1998–2000. Los totales anuales son 758 mm y 926 mm para febrero–1998 a enero–1999 y febrero–1999 a enero–2000, respectivamente. Según Coletto, (2003).

tativos de arenas limosas y eólicas sueltas, con la profundidad radicular (radical) de la vegetación local, la evapotranspiración real (ETR) oscilaría entre un 0,47 de la lluvia (Escacena del Campo) y un 0,85 (Moguer), con los valores más frecuentes en torno a 0,80. Los valores son tanto menores cuanto mayor es la presencia de suelos dunares, sobre todo si su vegetación es escasa.

En resumen, en la zona de Doñana, fuera de los mantos dunares, una buena parte de la lluvia, en torno al 80%, vuelve a la atmósfera por evapotranspiración, aunque cabe esperar diferencias espaciales significativas del valor absoluto de la ETR, ya que la abundancia de zonas de descarga de agua freática asegura una disponibilidad hídrica adicional a la lluvia. La elaboración de balances hídricos precisos requiere una mejor estimación areal del valor de la ETR, no disponible en la actualidad. El estudio de imágenes satelitales es una herramienta muy útil para determinar la ETR, aún apenas explotada en este sentido.

Insolación y vientos _____

De acuerdo con la latitud, en el Área de Doñana en los meses centrales del verano se superan las 15 horas de luz al día, mientras que en los meses de invierno la cifra desciende hasta aproximadamente 10 horas al día, con un total de 3000 horas de luz anuales (FAO, 1972; Bernués, 1990). La evapotranspiración no cesa del todo en invierno si la planta tiene suficiente agua disponible en el suelo.

El régimen de vientos está fuertemente influido por la proximidad al océano. Los vientos dominantes son de dirección SW (viento foreño).

Este factor climático es muy importante en esta zona de relieve suave, al favorecer una mayor tasa de evapotranspiración y al suponer una importante vía de entrada de aerosol marino (Montes et al., 1982; Alcalá, 2006), con un gradiente de salinidad determinado por la distancia a la costa.

Características climáticas generales _____

El clima del Área de Doñana puede ser considerado como mediterráneo subhúmedo con influencia atlántica, tal como ya lo calificaron Vanney (1970) y Emberger et al. (1976). El clima mediterráneo se caracteriza especialmente por su variabilidad espacial y temporal. La variabilidad de alta frecuencia (estacional o intraanual) está relativamente bien descrita, pero la variabilidad interanual no lo está tanto, a pesar de que se sabe que actúa como uno de los principales factores controladores del funcionamiento de los ecosistemas terrestres y acuáticos mediterráneos. La disponibilidad hídrica es el principal factor limitante en determinados momentos en los sistemas mediterráneos (Rodó y Comín, 2001).

En los meses de invierno y primavera se produce la mayor tasa de recarga de los acuíferos, aunque no todos los años se produce de forma importante cuando la precipitación total anual no supera los 300 mm, como se comenta en el *Capítulo 7*. Este hecho tiene especial relevancia en el sistema palustre, donde la mayoría de los humedales son hipogénicos.

El análisis de la precipitación anual de series temporales permite clasificar a los años en categorías según su comportamiento hídrico. En estudios climatológicos se suelen considerar años

Tabla 5.3. Valores de ETP calculados para Doñana con datos de estaciones termopluviométricas que cubren la mayor parte de la superficie de la misma. Datos brutos de P y ETP tomados de www.ucm.es/info/cif. (Valores medios)

Periodo	Secuencia	Duración del periodo (años)	Media (rango), mm/año
1960–63	Húmeda o muy húmeda	4	918 (842–1004)
1964–65	Normal	2	557 (545–570)
1966–67	Seca	2	473 (452–494)
1968–72	Húmeda o muy húmeda	5	721 (562–987)
1973–74	Muy seca	2	334 (324–345)
1975–79	Normal o húmeda	5	606 (506–760)
1980–84	Muy seca o seca	5	406 (300–493)
1985	Húmeda	1	—
1986	Seca	1	—
1987–89	Muy húmeda o normal	3	746 (531–857)
1990–94	Muy seca o seca	5	418 (326–560)
1995	Normal	1	—
1996–97	Húmeda o muy húmeda	2	891 (656–1126)
1998–99	Muy seca o seca	2	386 (363–410)
2000	Húmeda	1	—

secos aquéllos cuya precipitación está dentro del 40% de los años más secos de la serie, o sea, cuya precipitación corresponde a los dos quintiles inferiores de la serie (Rodó y Comín, 2001). Los años húmedos son los que se hallan en los dos quintiles superiores de la serie. Para el caso de Doñana se han establecido cinco categorías, calculando los quintiles correspondientes. Así se pueden agrupar los años analizados (1960–2000) según la precipitación total anual (Tabla 5.3).

A pesar de que un año sea seco o muy seco se pueden dar episodios de lluvias torrenciales muy localizados en el tiempo, los cuáles pueden reactivar los procesos de transferencia de agua entre los sistemas acuáticos por fenómenos de arroyada, no se pueden detectar con los datos climá-

ticos agregados mensuales que se dispone. Tan sólo queda constancia de estos episodios esporádicos por observaciones directas. Estos fenómenos son cruciales para el comportamiento global de los hidrosistemas.

Dos años muy parecidos en el total de agua recogida pueden ser muy diferentes en el patrón de distribución de las precipitaciones y por lo tanto en la respuesta hídrica del sistema. Es especialmente notorio su efecto en la recarga a los acuíferos.

Aplicando un análisis espectral a la precipitación anual de la serie Sevilla–Tablada, a grandes rasgos se observa un periodo de retorno de 10 años para los episodios de lluvias excepcionalmente altas (Coletto, 2003).

Toma de muestras del terreno arenoso con barrera manual para determinar humedad y contenido salino del agua intersticial. Se almacenan en bolsas de plástico, herméticas, para su traslado al laboratorio.
Foto: MM.



Conclusiones _____

El conocimiento de la precipitación y la evapotranspiración real son de especial relevancia para entender y gestionar la hidrología del Área de Doñana y para conseguir un uso sustentable del territorio. Esto es especialmente cierto dada la notable variabilidad espacial y temporal de la

recarga a los acuíferos y de la escorrentía superficial.

El conocimiento necesario se deriva, además del que se deriva de estudios con detalle suficiente, de la existencia de redes hidroclimáticas adecuadas, bien mantenidas y con los datos regularmente procesados y accesibles. Este aspecto se describe con detalle en el *Capítulo 4*.

Capítulo VI



Umbráculo-invernadero
con cultivos en arenas
con riego por goteo.

Foto: CMA. JA.

Demanda de agua en Doñana y su evolución

Conceptos básicos

Cabe separar la demanda hídrica, que es el agua necesaria para permitir que la actividad humana alcance unos fines con una cierta eficiencia, de la demanda ecológica, que es el agua que debe mantenerse en el medio para preservar los procesos biofísicos que determinan la integridad de los ecosistemas. La primera se asocia a las necesidades de la sociedad. En el caso del Área de Doñana hace principalmente referencia a la agricultura con sus actividades relacionadas y al abastecimiento a los núcleos de población, tanto los de carácter estable como los turísticos. Estas demandas tienen un marcado carácter estacional.

La demanda hídrica social es una variable de gestión, que en este caso está relacionada en gran manera con las superficies transformadas en cultivo de regadío y en menor grado con la población. Va asociada a unas dotaciones por unidad

de superficie o habitante, las cuáles se pueden modificar mejorando eficiencias de uso –aspecto tecnológico– e influyendo sobre los hábitos –aspecto social–. Esta demanda es forzada a adaptarse cuando la obtención y/o el vertido del agua usada son costosos y cuando el agua es escasa físicamente, o bien por disposiciones legales. No es un asunto trivial y admite diversos enfoques. De aquí que se manejen diferentes cifras, que haya habido una evolución de las mismas a lo largo del tiempo y que las previsiones sean distintas según el contexto en que se realicen. La demanda de la Naturaleza es a veces de difícil cuantificación y en parte es un valor a decidir en un determinado contexto.

Hay que distinguir entre demanda, utilización y consumo. Demanda es un desiderátum, variable según las condiciones, que no siempre se alcanza.

La utilización es lo que realmente se usa y aplica, y se obtiene por inventario (si hay mediciones de caudal y tiempo de extracción) o se deduce aplicando una dotación a cada unidad de consumo (persona, hectárea regada o con riego de apoyo, cabeza de ganado, etc.). Es un dato que varía a lo largo del tiempo. La medida o estimación tiene una incertidumbre que a veces es grande. El consumo es la parte del agua que una vez utilizada después ya no está disponible para otros usos posteriores ni para la Naturaleza, bien porque se evapora, bien por resultar excesivamente salina y/o contaminada (se entiende después del tratamiento exigible), bien por retornar al mar o a un cauce o acuífero aguas abajo de donde están las captaciones o los posibles usos ecológicos.

Consideraciones sobre el consumo de agua en el Área de Doñana en función del uso del territorio

El consumo de agua en el Área de Doñana no se limita a la demanda de regadío y urbana —la cual es pequeña— sino que la vegetación natural y la introducida tienen un peso importante, que hay que considerar en los balances que se presentan en los *Capítulos 7 y 8*. Por eso a continuación se aportan algunos comentarios al papel de las diferentes áreas del territorio a la demanda y el consumo del agua.

Las **áreas forestales** se encuentran prácticamente por toda la superficie de Doñana excepto en la marisma, aunque son más abundantes hacia el norte, oeste y suroeste del área. Están formadas principalmente por bosques de pinos y eucaliptus, con algunos restos pequeños y localizados de bosque natural (encinares y alcornoca-



les). En el manto eólico litoral dentro del Espacio Natural de Doñana hay grandes extensiones de matorral mediterráneo.

Los pinos comenzaron a ser introducidos en el siglo XVIII y actualmente constituyen uno de los paisajes más característicos de Doñana, aunque con distinto nivel de desarrollo y de conservación de unos lugares a otros. Los pinos resisten bien el estrés hídrico y la escasez de nutrientes en el suelo, como es el caso del Área de Doñana. Favorecen la infiltración frente a escorrentía superficial, pero no hay datos sobre si aumenta la recarga a los acuíferos ya que también aumentan la evapotranspiración.

Los eucaliptus fueron introducidos entre 1950 y 1970 por todo el dominio de arenas para su aprovechamiento como madera y celulosa. Estas freatofitas consumen agua del acuífero y así afectan a la profundidad del nivel freático y por lo tanto a la vegetación natural que se encuentra bajo los eucaliptus, que es rala y leñosa. Buena parte de los bosques de eucaliptus que había den-

Pozo bombeando agua para alimentar artificialmente el Lucio del Lobo, en la marisma norte.
Foto: EC (1999).

tro de las áreas pertenecientes al Entorno Natural de Doñana han sido erradicados. La eliminación comenzó en el área de El Abalarío–La Mediana en 1995 como parte de un plan de restauración del funcionamiento hídrico de los humedales de Ribeteuilos–La Mediana y ha continuado dentro del Parque Nacional, donde sólo queda ya una pequeña masa boscosa en La Algaida (La Vera). No obstante, en otras zonas, como hacia el noroeste de Doñana, se conservan aún grandes masas de eucaliptus.

Las áreas ocupadas por matorral mediterráneo han sido cartografiadas con gran detalle por Montes et al. (1998). Desde el punto de vista del ciclo del agua cabe distinguir entre las masas de monte negro (conjunto de especies cuyas raíces alcanzan la franja capilar, principalmente brezal hidrófilo y aulagas) y monte blanco (especies cuyas raíces no llegan al agua capilar, principalmente brezal xerófilo y jaguarzal). El monte negro se encuentra al pie del escarpe de los antiguos frentes dunares y tapizando las depresiones interdunares en toda el área de arenas comprendida entre la Reserva Bio-

lógica–Los Cotos–La Moguea–Mimbrales. Su presencia indica las zonas donde el nivel freático se halla muy próximo a la superficie del terreno o incluso la intercepta, como es el caso de los escarpes a pie de frente dunar. El monte blanco se encuentra en las crestas de los antiguos frentes dunares y en planicies interdunares extensas de la misma zona, y su presencia indica las zonas donde el nivel freático está más profundo.

Los bosques (o restos de bosques) de ribera constituyen formaciones vegetales intrazonales, ya que su distribución no depende del clima general de la zona sino de condiciones locales de elevada humedad edáfica (nivel freático muy cerca de la superficie del terreno). En el área de Doñana se conservan razonablemente bien algunos bosques de ribera en torno a ciertos arroyos permanentes de origen freático, tales como los arroyos de Pilas, de La Rocina, de Soto Grande y de Soto Chico. Son consumidores de agua del acuífero. En muchos casos la vegetación de ribera ha sido negativamente afectada por la intensa actividad humana: roturaciones y puestas en cultivo de zonas de ribera (norte de La Rocina y de Los Sotos), extracciones de áridos, plantaciones de eucaliptus, dragados del cauce, sobrepastoreo, etc., que han provocado la disminución de su extensión.

Las **áreas agrícolas** o cultivadas se encuentran sobre dos tipos de substrato: arenoso al norte y oeste, y arcilloso al este. Los cultivos son tanto de tipo herbáceo como leñoso, dominando el arroz y en menor medida el algodón en la marisma, y las fresas, arándanos, cítricos, olivo y vid en las arenas.

En la marisma transformada para uso agrícola (parte este y noreste) el principal cultivo es el arroz, que ocupa casi una tercera parte del total

Operarios trabajando en una zona de invernaderos para fresas en el área norte de El Rocío.
Foto: HG/CSIC.



de la superficie en cultivo en el área de Doñana. En el sector más oriental (Isla Mayor) el riego del arroz se realiza principalmente con agua superficial del río Guadalquivir, pero en el área de Villamanrique de la Condesa (en Los Hatos) el riego se lleva a cabo con agua subterránea de extracción local. La gran expansión experimentada por el cultivo del arroz con agua subterránea en los últimos 25 años ha contribuido al desarrollo de un amplio y profundo cono de depresión piezométrico en la zona de Hato Blanco–Hato Ratón– Sur de Villamanrique, y al desplazamiento hacia el interior del agua salina en el acuífero confinado (*ver Capítulo 8*).

Fuera de la marisma, al norte y noreste del Área de Doñana dominan la vid y el olivo y en menor medida cereales, forraje, tubérculos y otras especies, en general en secano o con pequeños riegos de apoyo o locales, aunque el olivo empieza a regarse. En el entorno más próximo a la marisma, al norte, noreste y oeste de El Rocío, y en el sector más accidental del Área de Doñana (Moguer, cabecera del arroyo de La Rocina) dominan las fresas y en menor medida los cítricos y arándanos. La inmensa mayoría de estos últimos cultivos es de regadío con aguas subterráneas locales. Aunque el riego por goteo se ha generalizado y se han mejorado notablemente las prácticas agrícolas, las dotaciones utilizadas están en promedio aún por encima de las óptimas. Una parte de los excedentes de riego descarga a los drenes agrícolas, que en el área de El Rocío es evacuada hacia la marisma. Otra parte se infiltra hasta llegar a la zona saturada. En la época de riego y bajo los campos se puede formar un a modo de nivel freático colgado, que desaparece en la temporada de barbecho o entre periodos de riego.

Las **áreas de humedales** están formadas por la marisma no transformada para cultivo y también por sectores dispersos del manto eólico litoral que mantienen lagunas freáticas permanentes o semipermanentes y otras estacionales de origen mixto (agua freática y de lluvia).

La marisma actual tiene una dinámica vinculada principalmente a los aportes fluviales de los arroyos del Partido, La Rocina y Cañada Mayor y, a partir de la restauración hídrica del Caño Travieso en el marco del proyecto Doñana 2005, también del río Guadiamar.

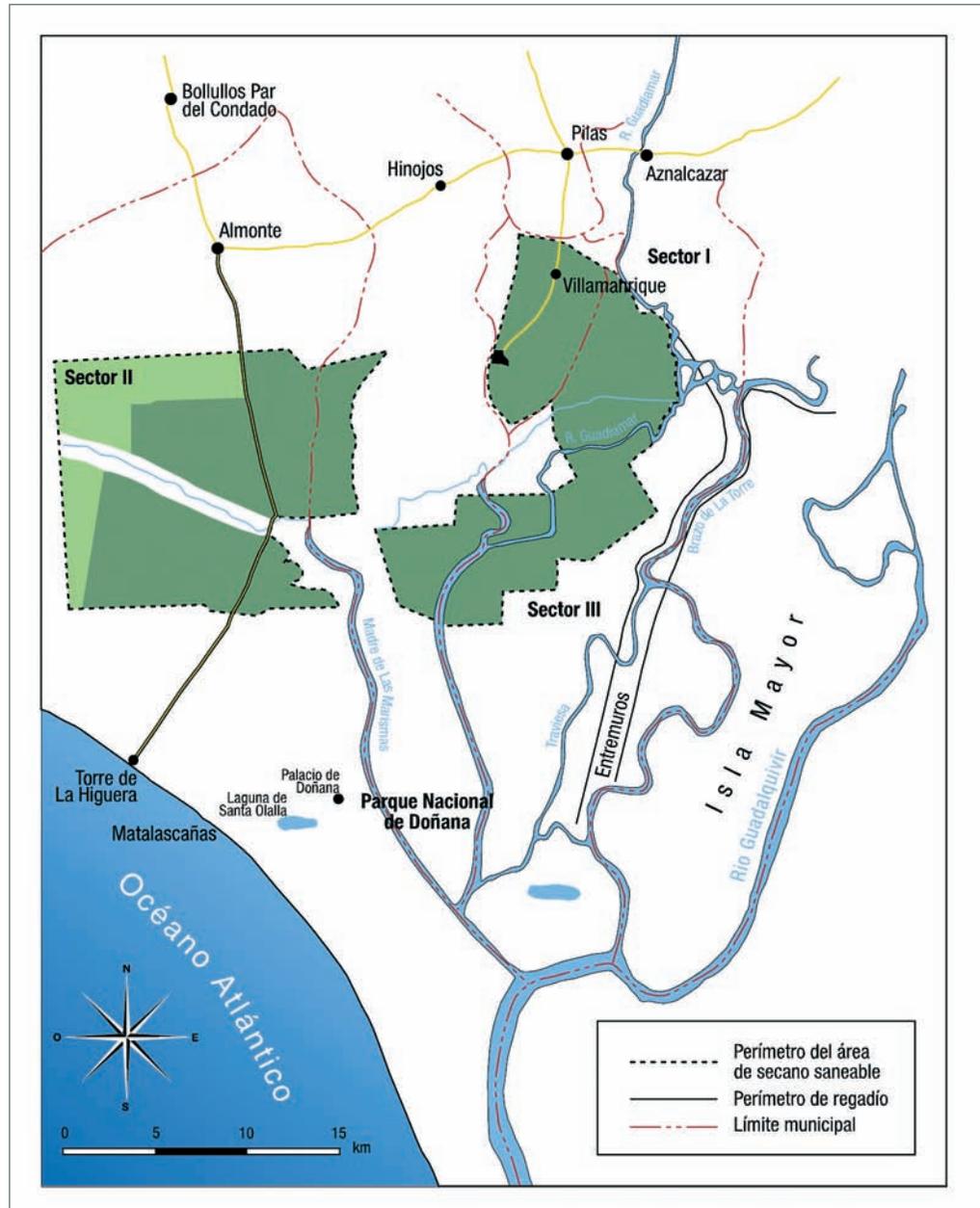
Los humedales sobre arenas consisten en lagunas de distinto tamaño y pequeños arroyos temporales, todos ellos de origen principalmente freático o mixto. Desde el punto de vista del ciclo del agua estos humedales indican las zonas donde existe descarga de agua subterránea a la superficie del terreno.

Las **áreas urbanas** ocupan una pequeña superficie y es de carácter concentrado, salvo en Matalascañas donde hay superficies ajardinadas comunitarias y asociadas a las viviendas. La demanda de agua es esencialmente doméstica y comercial ya que hay poca industria asociada, salvo en Matalascañas donde el riego de jardines aumenta la demanda de agua per cápita, sin que se disponga de cifras elaboradas de dotaciones. En ese lugar las aguas usadas depuradas no se reutilizan, aunque domésticamente podría haber algún reuso de aguas propias.

Demanda de agua agrícola para regadío _____

Tradicionalmente la agricultura en el Área de Doñana se había localizado en los campos del

Figura 6.1.
Zona regable del Plan de
Transformación Agraria
Almonte–Marismas (PTAAM) con
anterioridad a la Ley 91/78
(modificado de Ojeda Rivero, 1987,
pp. 403). Incluye fincas de iniciativa
pública y privada.



norte y el noroeste de la marisma, principalmente viñedo y olivar en secano.

Los primeros intentos de regadío intensivo del sector de las arenas corresponden a algunas fincas

particulares próximas al Rocío (caso de Los Mimbrales) en la década de 1970, y luego en áreas más extensas con el arranque del Plan de Transformación Agraria Almonte–Marismas (PTAAM) a fi-

Tabla 6.1. Situación de extracciones agrícolas de agua en los sectores del Plan de Transformación Agraria Almonte–Marismas (PTAAM) en 1991 según el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana.

Datos de Giráldez et al. (1991)

Sector	Sector I Ecotono Norte		Sector II El Rocío		Sector III Marisma		Total(*)		Dotación media m ³ /ha/a
	ha	hm ³ /a	ha	hm ³ /a	ha	hm ³ /a	ha	hm ³ /a	
Tipo de cultivo	ha	hm ³ /a	ha	hm ³ /a	ha	hm ³ /a	ha	hm ³ /a	m ³ /ha/a
Extensivo	887	1,90	87	0,48	2071	6,83	3314	9,99	3014
Intensivo	570	1,50	926	5,19	120	0,28	1617	6,97	4310
Frutales	109	0,80	1128	10,33	—	—	1750	14,21	8120
Arroz (Hatos)	—	—	—	—	1331	20,63	1387	21,51	10966
Otros (Oeste)	21	0,07	3	—	—	—	24	0,07	2917
Suma	1587	4,27	2144	16,00	3522	27,74	8066	52,75	Media 6540

(*) Adiciona otras pequeñas áreas fuera de los Sectores del Plan Almonte–Marismas

nales de la década de 1970 y principios de la de 1980 (ver Figura 6.1), que está basado totalmente en la extracción de agua subterránea local. Según el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992), en 1991 se tenía la situación de regadío reflejada en la *Tabla*

6.1, en la que no se incluye el sector más occidental de Palos–Moguer ni los intentos de riego del olivar. Se calculó que en el PTAAM se utilizaban casi 53 hm³/a. La extracción para riego en el área de Moguer–Palos de la Frontera se estimó groseramente en unos 12 hm³/a.

Tabla 6.2. Datos de origen diverso sobre la evolución del Plan de Transformación Agraria Almonte–Marismas (PTAAM)

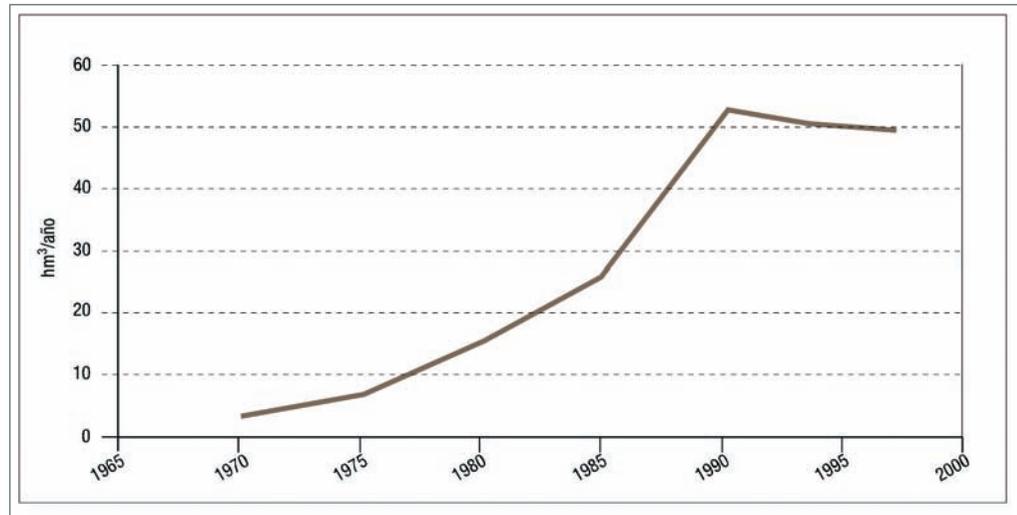
Año	Superficie, ha		Uso de agua hm ³ /a	Comentarios
	transformadas	regadas		
1971	— (45950)	1100	6	Privadas Decreto 194/1971
1974	(35089)	(23598)		Previsiones del Decreto 2441/1974. Inicio del PTAAM
1978		2710	18	2500 ha privadas + 210 ha públicas
1982		5550	44,5	
1984	(30661)	(21973)		Previsiones del Decreto 3571/1984
1986	10343	5436		Propuesta de reducción de objetivos
1988	10000			Máximo previsto en el PDTC
1989	14138	11144	62	Según la CHGQ, 16580 ha con 75 hm ³ /a en toda el Área de Doñana
1990	14725	11680	58	
1991	14000	8000		El Patronato del PND propone limitar a 7000 ha y 52 hm ³ /a
1992	14665	13983	52	72–82 hm ³ /año total, CIED (1992)
1996		13375	56	

1. Las cifras entre paréntesis son previsiones establecidas en ese año, que no se han cumplido

2. Momentos de gran crecimiento: Aznalcázar 1993–98; Villamanrique 1998–99; Chucena, Hinojos, Escarcena, Pilas 1999–03. Decrece y luego crece: Almonte 1996–02

Figura 6.2.

Volumen de agua extraído del acuífero para riego en el área del Plan de Transformación Agraria Almonte–Marismas según datos de 1999 de la Junta de Andalucía (en Giansante, 2003). No hay datos fiables más recientes referidos al PTAAM ya que el área de extracciones para regadío se ha extendido a otros lugares, y han variado algo las dotaciones.



En la *Tabla 6.1* se incluyen también algunas dotaciones medias de agua por tipo de cultivo en 1991. En CIED (1992) se consideraba que las dotaciones medias eran de 3000–4500 m³/ha/año para cultivos herbáceos, de 10.000–12.000 m³/ha/año para frutales y hasta 16.000 m³/ha/año para el arroz. Datos más recientes (WWF/ADENA, 2004 y 2007) indican dotaciones de 3500 m³/ha/año para cultivos intensivos de fresas y de 5000 m³/ha/año para frutales,

principalmente naranjos, en plantaciones grandes bien tecnificadas. En promedio cabe esperar que las dotaciones medias actuales sean algo mayores que estas últimas, próximas a las de la *Tabla 6.1*. Según WWF/ADENA (2007) son un 40% mayores que lo estrictamente necesario.

El crecimiento progresivo para riego en el PTAAM se detuvo hacia los inicios de la década de 1990. Ver el gráfico de la *Figura 6.2*, que no se puede extender hasta la actualidad por no ha-

Tabla 6.3. Crecimiento del área regada en el Sector III del PTAAM en 1996 según la foto aérea y extracciones atribuidas (según Giansante, 2003). Cifras redondeadas

Lugar	Con derecho de agua		Realmente regado	
	ha	hm³/a	ha	hm³/a
Hato Blanco Viejo	456	3,5	900	6,3
Hato Blanco Nuevo	942	6,3	942	6,3
Hato Ratón Viejo	500	3,5	1435	10,0
Hato Ratón Nuevo	106	0,4	200	0,8
Hato Garrido (ganado)	0	0,0	200	1,4
Pescante Rancho los Ciervos	40	0,4	40	0,4
Pescante Ana Bonilla	78	0,8	70	0,8
Sumas	2122	14,9	3787	26,0



Vista aérea de la cuenca baja y media del arroyo de La Rocina, desde cerca de su tramo final mirando hacia el oeste. Se puede ver el área de bosque y bosque de ribera asociado, el Palacio del Acebrón que se vislumbra al fondo, y las áreas de regadío del sector II al sur de La Rocina (lado izquierdo de la foto) con el inicio del área de la Mediana–El Abalarío al fondo izquierdo, y los campos de fresas al norte de La Rocina (lado derecho al fondo de la foto). La vegetación muestra un estado variable pues representa el otoño–invierno, en que parte de ella no es activa y/o de hoja perenne. Se aprecia agua en la Rocina en el tramo próximo a la parte inferior de la figura.

Foto: JHG.

berse dispuesto de datos suficientes referidos estrictamente a esa área.

Se aprecia un posible crecimiento reciente del área regada, que incluye captaciones construidas en el área de la cabecera de La Rocina, fuera del territorio del PTAAM (Cruz Villalón, 2005). En la *Figura 6.3* se muestra el estado re-

ciente de las explotaciones agrícolas. En la *Tabla 6.2* se relaciona un conjunto de datos relevantes sobre la evolución. El seguimiento no es sencillo pues mientras unas áreas son aparentemente abandonadas, se ocupan otras nuevas, para luego reemprender labores en las áreas anteriores. Además muchas de las nuevas áreas están en lugares

aislados y el agua se transporta de un lugar a otro.

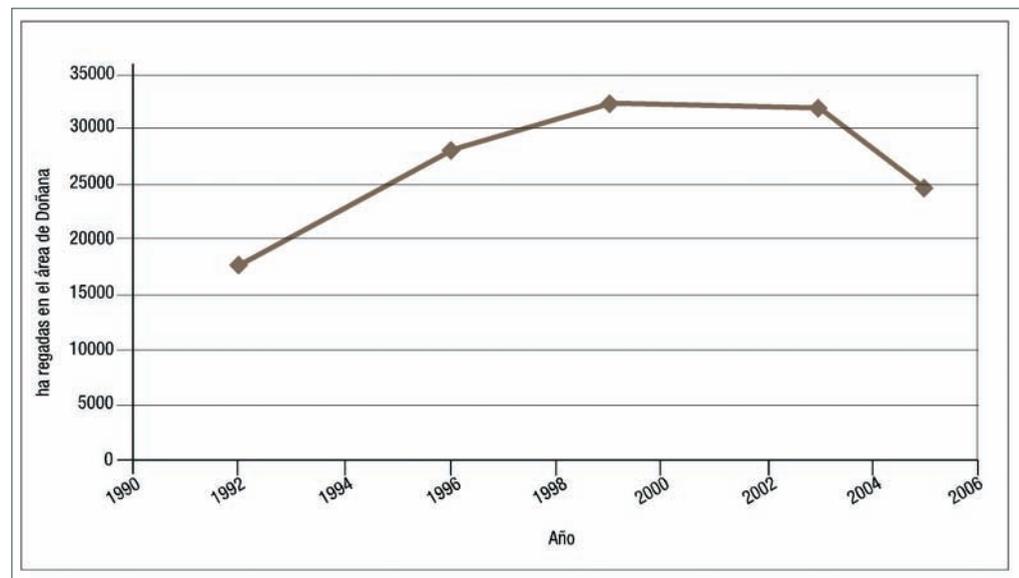
En la *Tabla 6.3* se presentan datos parciales del Sector III del PTAAM (el situado al norte de la marisma) para 1996. Según un inventario de detalle encargado por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHGQ, 2004), entre 1995 y 2002 en el Sector Regable III del PTAAM se han identificado mediante foto aérea 5445 ha regadas con agua subterránea, de ellas 1600 ha de arroz (se citaban 1000 ha). Según dicho inventario, del conjunto de 5445 ha tenían título legal 2122 ha, con una concesión/autorización de 14 hm³/a; otras 1552 ha (11 hm³/a) habían pedido el derecho de agua y aún no había recaído resolución, y otras 1771 ha no tenían título legal. En conjunto se estima una extracción de agua subterránea de casi 38 hm³/a.

Para toda el Área de Doñana las cifras de extensión total regada en el Área de Doñana no son se-

guras pues pueden incluir conceptos variables. Algunos datos apuntan a los valores de la *Figura 6.4*. La última evaluación son datos provisionales de la Oficina de Planificación de la CHGQ, que incluye la cabecera de La Rocina. En el sector oeste del acuífero Almonte–Marismas, en el Área de Doñana, se cultivan fresones (una parte en cultivo hidropónico) y se han ido introduciendo otros frutos como la frambuesa, el arándano y los cítricos.

Se estima una demanda variable de 167, 122 y 108 hm³/a según que el año sea seco, medio o húmedo, y unas extracciones que igualan o superan los 100 hm³/a (datos oficiosos de la Oficina de Planificación de CHGQ). El riego del olivar, sólo en parte sobre el acuífero Almonte–Marismas, se estima que usa de 6 a 12 hm³/a. El Plan Hidrológico del Guadalquivir (1988) estableció para el Área de Doñana (en las dos cuencas) un tope de extracción de 124 hm³/a, con prohibición de nuevos pozos, salvo para abastecimiento.

Figura 6.3.
Evolución de la superficie regada en el Área de Doñana. Datos procedentes de distintos documentos.
Elaboración propia.



Para los riegos de Moguer, Lucena y Bonares el Plan Hidrológico del Guadiana II preveía en el horizonte de 10 años casi 30 hm³/a de transvase desde el Sistema Chanza–Piedras (al oeste del río Tinto) para riego de 4120 ha, con la condición de que esos aportes sirviesen para clausurar los pozos existentes de extracción de agua subterránea y así favorecer la regeneración de los ecosistemas del entorno. Se calculaba una dotación media de 5600 m³/ha/a, que se debería reducir progresivamente a 4000 m³/ha/a. Un conjunto de comunidades de este área han estado recibiendo a precario 7 hm³/a de ese transvase, en parte para abastecimiento, y hasta 4,5 hm³/a para riego de 3600 ha, para substituir parte de los 14,7 hm³ que se calcula que extraen mediante pozos. El estudio de impacto ambiental se ha resuelto favorablemente (resolución de 22–02–08, BOE de 17–03–08).

Las crecientes extracciones en la cabecera del Arroyo de La Rocina, en general sin título legal, para ser usadas en riegos de fresones en el área de Moguer, han llevado a la CHGQ a un trata-



miento detallado de las concesiones/autorizaciones en la parte de la Comarca del Condado que está dentro del Área de Doñana. En el año 2004 existían 488 solicitudes en tramitación y 59 denegadas o archivadas, en buena parte por estar dentro de la zona de prohibición de nuevas concesiones del Plan Hidrológico para la Unidad Hidrogeológica 05.51. En el Cuadro 6.1 se indi-

típico invernadero de fresones en el lado norte de La Rocina. Según DAP (2003), un 30 % de los cultivos de fresa en Huelva utilizan macrotúneles, que son la infraestructura más eficiente desde el punto de vista de la producción. Un 70 % utiliza microtúneles, que aún siendo menos eficientes resultan más baratos y fáciles de montar y desmontar. Foto: HG/CSIC.

Tabla 6.4. Resumen de actividad agraria en el Área de Doñana en el año 2001.

Datos extraídos de FD21 (2003) y Giansante (2003)

Cultivo	ha	Provincia	Riego	Comentarios
Arroz	28922	SE	Si río	Total 35000 ha con 11300 ha de agricultura
Olivar	4262	HU	Si	26% sup. agraria. área norte
Olivar	10493	SE	Si	
Cereales	11477		No	
Cultivos industriales	9034		No	
Cultivos forrajeros	6181		No	
Frutos y hortalizas	5463		Si	
Viñedos	5343	HU	No	7353 ha en el Condado de Huelva área norte. En 1980 había tres veces más
Fresón	4536	HU	Si	Oeste–Noroeste. Inicio en 1980; máximo en 2000 con 5250 ha. Ver Figura 6.5
Tubérculos	1031		No	
Frambuesa	545		Si	
Legumbres	396		Si	

Cuadro 6.1

Situación de los cultivos de fresas en el sector oeste del Área de Doñana según WWF (2007)

Sector: Oeste de la carretera de Almonte–El Rocío–Matalascañas

Lugares: Cabecera de La Rocina y Estero de Domingo Rubio

Municipios: Almonte, Bonares, Lucena del Puerto, Moguer, Palos de la Frontera, Rociana del Condado

Resultados:

- ❑ 450 ha en espacios RENPA (Red de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía)
- ❑ 2173 ha en montes públicos
- ❑ el 33% (36 km) de la longitud de los arroyos (109 km) está ocupado o muy deteriorado. En gran parte corresponde a la cabecera de La Rocina y a arroyos vertientes al río Tinto
- ❑ se estima un exceso de riego del 40%
- ❑ el 50% del agua utilizada no tiene título legal o está en trámite, sin que haya recaído autorización

can datos históricos de los cultivos de fresas en el sector oeste del Área de Doñana.

Según este inventario, en 2004 había un total de 440 solicitudes que comprendían 927 pozos para aplicar agua en 5734 ha, con una extracción superior a 16 hm³/a. De ellos se indican como tramitables 191 expedientes con 574 captaciones para 1224 ha, de los que son estrictamente tramitables 150 con 481 captaciones y 789 ha, en función de afecciones entre captaciones o a zonas con limitaciones. Del conjunto de pozos, un total de 446, principalmente en Almonte y Lucena,

están en montes públicos; 126 no tienen solicitud de legalización y en buena parte están en Lucena.

Demanda de agua para abastecimiento _____

Hasta fechas muy recientes el abastecimiento de la población asentada en el Área de Doñana estaba totalmente supeditada a la explotación del acuífero Almonte–Marismas. Actualmente la extracción de agua subterránea para abastecimiento se estima entre 6 y 7 hm³/año, de los que 2,8 son

Tabla 6.5. Estimación de la demanda agrícola de agua subterránea para riego en 2001 según datos de la Tabla 6.4.

Cultivo	ha	Dotación m3/ha/año	Demanda de agua hm3/a	Comentarios
Arroz	1700	11000–13000	18,7–22,1	Riego con agua subterránea
Olivar	4262	2000–2500	8,5–10,7	Similar a otras situaciones
Frutas y hortalizas	5463	6000–8000	32,8–43,7	Necesita afino
Fresón	4536	4500–5500	20,4–24,9	Necesita afino
Frambuesa	545	5000–6000	2,7–3,3	
Legumbres	396	6000–8000	2,4–3,2	
			Total: 85,5–107,9	

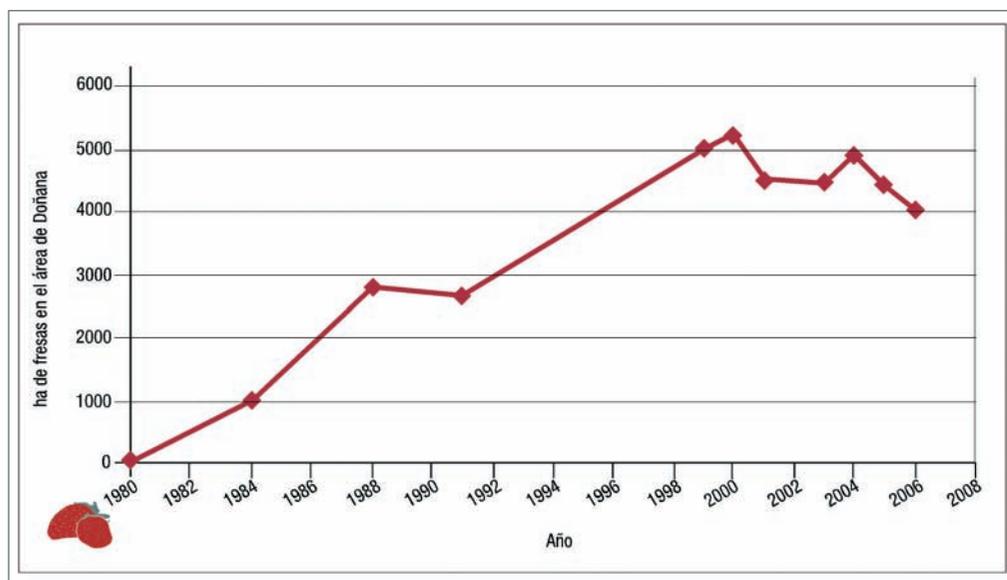


Figura 6.4.

Evolución de la superficie dedicada al cultivo de fresa y fresón en el Área de Doñana.

Datos extraídos de distintos documentos, entre ellos los boletines del Sistema Integrado de Información Agraria de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía (CAP, 2004 a 2007).

para Matalascañas, los cuáles tienen un marcado carácter variable (estacional de verano y puntual de fin de semana). No se usan aguas superficiales locales (arroyos) para el abastecimiento.

Estas cifras son similares a las del Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992), aunque con una leve tendencia a la baja, pues sólo ha habido un moderado crecimiento de la población estable y del número de visitantes turísticos y de fin de semana. Sin embargo, los cambios más importantes que se han producido desde entonces son la llegada de aguas para abastecimiento de origen exterior al Área de Doñana, que afectan a poblaciones periféricas. Tales son:

- a) Abastecimiento de Pilas, Aznalcázar y Villamanrique de la Condesa (por Aljarafe), con aguas suministradas por Emasesa desde el sistema de abastecimiento a Sevilla y su entorno.
- b) Mancomunidad de Aguas del Condado, con aguas importadas del embalse del Corum-

bel (afluente del Río Tinto en su margen derecho) para Almonte, Bollullos Par del Condado, Bonares, Lucena, Rociana e Hinojos. Dicho transvase sufre restricciones y la calidad del agua es deficiente por presencia de metales pesados. Por eso se mantienen los pozos de

Pozo de abastecimiento a Matalascañas, en el lado opuesto a la costa del terreno de la urbanización. Foto: EC.



abastecimiento a la Mancomunidad en el sector de El Rocío (2 a 3 hm³/a) e Hinojos (0,5 hm³/a), que en total suponen entre el 30 y el 45% del agua suministrada. En La Palma del Condado se capta el llamado acuífero Niebla–Posadas, fuera del ámbito del Área de Doñana.

c) Mancomunidad de Agua de la Costa de Huelva (GIAHSA) que distribuye aguas del sistema Chanza–Piedras a Moguer y Mazagón, pero no a Palos de la Frontera. Con seis sondeos complementa la distribución con casi 1,5 hm³/a de agua subterránea.

Se baraja la posibilidad de que el agua del embalse del Corumbel, además de llegar a El Rocío, se prolongue hasta Matalascañas. Sin embargo, el agua de los pozos es de mejor calidad (aunque con riesgo de exceso de nitratos), y tiene la garantía de poder mantener el abastecimiento en años secos, como demuestra la experiencia.

Demanda de agua para la vegetación y las formaciones palustres _____

Buena parte de la vegetación natural y el bosque plantado (principalmente pinos) utiliza la humedad del suelo edáfico, que se repone por infiltración de la lluvia. Son especies que han de soportar un marcado déficit hídrico en verano, en especial en las arenas eólicas, que tienen una baja retención de humedad.

Son numerosos los lugares en que el nivel freático es poco profundo o incluso aflora. Allí existen especies vegetales freatófilas o éstas fueron substituidas por eucaliptus, que son también freatófitas que forman o formaban extensas man-

chas y franjas capaces de evapotranspirar a nivel potencial todo el año. Su extensión ha sido variable según las grandes secuencias húmedas y secas, y no ha sido inventariada con detalle. Como se dicho anteriormente, actualmente una gran superficie dentro de las áreas protegidas ha sido talada y erradicada, a partir de 1995.

Los descensos del nivel freático producidos por la explotación del agua subterránea han disminuido la extensión de freatofitas, aunque no se conoce la evolución temporal. Dichas freatofitas pueden evapotranspirar entre 900 y 1200 mm/año, o sea 9000 a 12000 m³/ha/año, aunque se carece de estudios directos.

La superficie de nivel freático aflorante en forma de lagunas y arroyos es muy variable según el año y comprende algunos centenares de manifestaciones –mayoritariamente concentradas en el manto eólico litoral– entre las que sólo unas pocas son actualmente permanentes a lo largo del año, como el conjunto de lagunas de Santa Olalla. Éstas evaporan a nivel potencial y no suponen una parte importante del consumo hídrico del Área de Doñana, aunque sí lo son si se considera la vegetación de sus entornos, en buena parte de freatofitas. Su extensión ha ido disminuyendo con el tiempo a causa del descenso del nivel freático causado por las extracciones de agua subterránea. Como consecuencia, puede producirse una progresiva reducción del hidroperiodo o la desecación de las lagunas y su aureola de vegetación, de modo que algunas de esas lagunas pasan a ser temporales y dependientes de las lluvias, con encharcamiento más o menos prolongado si se conservan los sedimentos poco permeables de fondo de laguna.

Para mantener ciertos humedales del manto eólico (El Acebuche) se han instalado pozos profundos que bombean agua cuando hace falta, y que también sirve para la demanda humana de las instalaciones. Hace años la extracción era casi permanente y podía estar en torno a 1 hm³/año, pero en la actualidad se sigue un patrón estacional más cercano al natural. También se bombea agua subterránea de niveles confinados para mantener algunos humedales de la marisma, como los lucios de El Lobo, MariLópez y Palacio de Doñana.

Utilización de fertilizantes

Pocos trabajos abordan el uso de fertilizantes en el área de Doñana. Los datos existentes son de difícil recopilación sin un notable trabajo de campo y el recurso a las asociaciones agrarias, aunque ya hay datos localizables en Internet. Muchos agricultores son muy cautelosos para dar información, o incluso la pueden dar sesgada o tergiversada. Además hay notables cambios de un año a otro, y han ido evolucionando a lo largo del tiempo.

En lo que hace referencia al cultivo del fresón, se resumen a continuación algunos datos relevantes procedentes tanto de DAP (2003) como aportados por el personal del WWF involucrado en un proyecto piloto para la mejora de la eficiencia el uso del agua en el riego del fresón en una finca cercana a la Pequeña Holanda. Se dan como orientación de las condiciones de la actividad agraria de regadío en cuanto a la utilización de agroquímicos.

Los suelos del manto eólico son poco deficientes en fósforo y por ello sólo se suele aplicar fosfato monosódico al inicio de las campañas



(inicio del desarrollo de la parte vegetativa de la planta) y dosis bajas de fosfato monopotásico (periodo de fructificación).

En épocas anteriores se fumigaba el suelo con bromuro de metilo para su desinfección. Al estar actualmente prohibido su uso, se utiliza cloropirrina, metan-sodio y dicloropropeno. Para reponer la actividad biológica del suelo tras la desinfección se aplican abonos orgánicos, principalmente estiércol de granjas avícolas, ovinas y vacunas, en forma de pellets o gránulos.

La utilización de abonos nitrogenados es general, con una dosis de 100 kg N/ha, de los que la vegetación utiliza hasta el 80% del nitrógeno contenido. Con dosis de 400 kg N/ha se producen pérdidas por lixiviado de hasta el 50%. Ver Cuadro 6.2.

Cada vez es más común que para la preparación de la parcela de cultivo se realicen análisis físico-químicos del suelo por especialistas, los cuales diseñan la fertilización conveniente. El abonado orgánico se aplica en julio mediante esparci-

Pozo agrícola para regadío en el área norte de El Rocío. Foto: EC.

Uso de fertilizantes en el Área de Doñana

Según DAP (2003) y comunicaciones del personal de WWF, los aportes minerales son variables según las parcelas, pero en general incluyen sulfato amónico, dolomita, diversos complejos N–P–K (en %, como 15–15–15; 9–18–27; 0–10–25 + 24 CaO), lithothamne 400 (36 Ca + 3 Mg) y patentkali (30 K + 42,5 S). Se busca la liberación lenta de los nutrientes, que tienen un casi 19% de N (5,3% amoniacal, 6,7% como urea, 6,8% de N de liberación controlada), con una permanencia en el suelo de 6 a 10 semanas.

En el riego por goteo se aplican fertilizantes y bioestimulantes orgánicos líquidos, ácidos húmicos y fúlvicos, aminoácidos y extractos de algas. La parte mineral soluble en agua comprende (proporción N–P–K en %): $\text{PO}_4\text{H}_2\text{NH}_4$ (12–61–0), $\text{PO}_4\text{H}_2\text{K}$ (0–52–34), NO_3K (12–0–46), SO_4K_2 (0–0–48), $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$, SO_4Mg y $(\text{NO}_3)_2\text{Mg}$, de forma adaptada a cada estado fenológico. La mezcla la prepara el fabricante a demanda del agricultor, con el asesoramiento de un técnico agrícola. Una dosificación típica es 150 kg de NO_3NH_4 , 80 kg de $\text{PO}_4\text{H}_2\text{NH}_4$, 350 kg de NO_3K , 200 kg de $(\text{NO}_3)_2\text{Ca}$, 100 kg de $(\text{NO}_3)_2\text{Mg}$, 33 L con ácidos húmicos y 18 L con microelementos. La clásica dosificación de 0,1 kg por millar de plantas, que puede llevar a alta ineficacia, se ha mejorado con los sistemas de sensores en el suelo, tanto para ahorro económico (precio creciente de los fertilizantes) como para limitar la contaminación de las aguas subterráneas.

por y posterior enterrado del mismo por labor superficial de los 20–25 cm superiores. La fertilización mineral se hace de forma similar en el mes de septiembre. El abonado de cobertera (ferti-riego) se fracciona según el estado fenológico.

Conclusiones _____

Para una gestión realmente sostenible del ciclo del agua es necesario conocer con precisión las magnitudes tanto de la demanda hídrica como de los usos y consumos, todos ellos desglosados para los distintos usos existentes en la zona.

En el Área de Doñana, hasta hace muy pocos años sólo se ha contabilizado la demanda y los consumos del uso humano, consistente básicamente en los agrarios y urbanos. Pero incluso en una zona donde el agua es el principal recurso productor de riqueza, hasta hace pocos años esta contabilidad se ha realizado usando métodos indirectos que sólo proporcionaban valores aproximados, con una elevada incertidumbre asociada.

Prueba de ello es la poca precisión de muchos de los datos recogidos en este capítulo. Afortunadamente hoy en día es posible disponer de datos fieles de algunas variables tales como superficies dedicadas a distintos cultivos, gracias a la utilización sistemática por parte de la Administración de la tecnología de tratamiento de imágenes de satélite. Otras variables, como el uso de agua subterránea, aún requieren mejorar las técnicas de medición, pero probablemente se conseguirá en poco tiempo.

Respecto a la demanda, los usos y los consumos del medio natural, sólo muy recientemente está emergiendo la consciencia, en buena parte promovida por la entrada en vigor de la Directiva Marco del Agua, de Europa, sobre la necesidad de cuantificarlos e integrarlos en los planes de gestión del agua. Es de esperar que esta integración se realice con base en una información robusta, obtenida mediante tecnologías y métodos de estudio y cuantificación contrastados y validados.

Capítulo VII



Descarga de agua subterránea por el acantilado de El Arenosillo a la playa de Torre del Oro. El agua produce arrastre de arenas que forman un abanico de deyección sobre la playa. La vegetación de pie de acantilado se alimenta de estas descargas. La descarga de agua subterránea contribuye a la incisión de pequeños barrancos y facilita el retroceso del acantilado.

Foto: JMPA.

Funcionamiento hídrico del Área de Doñana en estado natural y balance del sistema acuífero

Evolución del conocimiento

La suficiente y adecuada conservación de un espacio natural y la protección de los legítimos intereses de la población afectada requieren un buen conocimiento del funcionamiento de los sistemas naturales que lo constituyen. En relación con el sistema hídrico, hay que considerar los aspectos relativos al ciclo del agua, tanto de la parte superficial como de la parte subterránea, así como de las interrelaciones entre ambas, tanto en lo que respecta a la cantidad como a la calidad.

Al final del *Capítulo 3* se hace un inventario sintético de los principales proyectos, informes y estudios de investigación realizados sobre la hidrología del Área de Doñana. Por tanto, no se va a repetir aquí todo lo allí escrito, pero sí se hará referencia a los estudios o grupos cuyo trabajo supuso un avance notable en el estado del cono-

cimiento sobre el funcionamiento del sistema acuífero de Doñana.

El conocimiento existente sobre las aguas subterráneas en el Área de Doñana y su entorno comenzó a partir de los estudios realizados entre las décadas de 1960 y 1970 para la evaluación de los recursos hídricos subterráneos del Bajo Guadalquivir (IGME-FAO, 1970 y 1973). Aunque lo realizado tuvo un buen nivel técnico, los estudios fueron parciales ya que tuvieron objetivos predominantemente desarrollistas, con limitaciones económicas y de tiempo, y también con la insuficiente perspectiva que se suele tener al comienzo de un estudio. Un cambio importante de paradigma se produjo a mediados de la década de 1980 con el inicio de los trabajos académicos de investigación hidrogeológica por parte de la Universidad Complutense de Madrid y de

un estudio isotópico ambiental de las aguas subterráneas. Desde entonces hasta la actualidad se han llevado a cabo varios proyectos de investigación hidrogeológica centrados en distintos aspectos, como la identificación de mecanismos y cuantificación de la recarga, estudios del origen de la calidad natural del agua, modelación hidrogeoquímica del sistema acuífero, modelación regional del flujo, modelación del flujo en el entorno de las lagunas peridunares, mejora del modelo geológico–hidrogeológico, papel de los humedales en la atenuación natural de la contaminación agrícola, ...

Con todo ello, en 1991, cuando se redactó el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992) ya se tenía un razonable buen conocimiento del funcionamiento de las aguas subterráneas, sobre todo en el sector occidental del acuífero (área de El Abalarío, la principal área recarga), y se habían realizado algunos estudios sobre las aguas superficiales en las cuencas vertientes a la marisma. El mencionado Dictamen (CIED, 1992) resaltó nuevas necesidades de conocimiento, que se continuaron con diversas colaboraciones adicionales de otros organismos y con la cada vez más activa incorporación del IGME, en concreto de su oficina de proyectos de Sevilla. La actividad ha continuado hasta el momento presente (*ver Capítulo 3*).

En el momento actual el conocimiento de la hidrología subterránea de Doñana es razonable y están acotados los aspectos en los que dicho conocimiento es aún insuficiente, fundamentalmente los relacionados con la entrada y comportamiento de contaminantes agrícolas y atmosféricos, y con el papel de los humedales como sumidero o fuente de solutos.



El conocimiento de la hidrología superficial está algo más atrasado, aunque en los últimos años se ha realizado un notable avance debido a los estudios impulsados en el marco del Programa de Investigación del Corredor Verde del Guadiamar (derivado del accidente de Aznalcóllar) y del Proyecto Doñana 2005. Los trabajos han sido realizados por la Escuela Técnica de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid y por la Escuela de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad Politécnica de Cataluña (grupo FLUMEN).

Queda aún pendiente el estudio detallado de la relación aguas subterráneas–aguas superficiales en distintas áreas del dominio de arenas, donde el agua subterránea tiene un papel relevante en la generación de masas de agua superficial, tanto lagunas como arroyos. Los modelos numéricos de flujo de agua subterránea realizados no permiten conocer ese detalle, debido fundamentalmente a la inexistencia de un mapa digital del terreno de

Salida de agua subterránea descargada al mar en el acantilado de El Arenosillo frente a Torre del Oro. Se trata del arroyo de Río Oro. Foto: CMA. JA.

la parte libre del acuífero (arenas) que tenga suficientemente resolución y cobertura espacial.

Aporte atmosférico de agua y sales al sistema hídrico

Dada la escasez de aportes fluviales procedentes de áreas externas al Área de Doñana, la fuente principal de recursos hídricos es la lluvia. La precipitación que cae sobre el territorio del Área de Doñana genera escorrentía superficial y recarga de forma difusa al acuífero. Además, fuera de los momentos de lluvia (o sea durante gran parte del año), en estado natural los cursos superficiales permanentes y la mayoría de los estacionales reciben y transportan agua de origen subterráneo. Es el caso de los arroyos mayores (La Rocina, del Partido, Cañada Mayor) y también de todos los pequeños arroyos, caños, cañadas y algaidas que se generan en las arenas y arenas limosas que forman la parte aflorante del acuífero y que fluyen hacia la marisma, hacia el arroyo de La Rocina o al arroyo del Partido, o hacia el litoral por el acantilado de El Asperillo.

La cuantificación de los aportes hídricos por la precipitación al Área de Doñana se puede realizar razonablemente con los datos de las estaciones existentes dentro de la propia Área, si se apoyan y correlacionan con series históricas de estaciones externas, como las de Huelva y Sevilla-Tablada (*Capítulo 4*), aunque el detalle diario de precipitaciones tormentosas puede tener notables variaciones de un lugar a otro. No hay estudios de detalle al respecto.

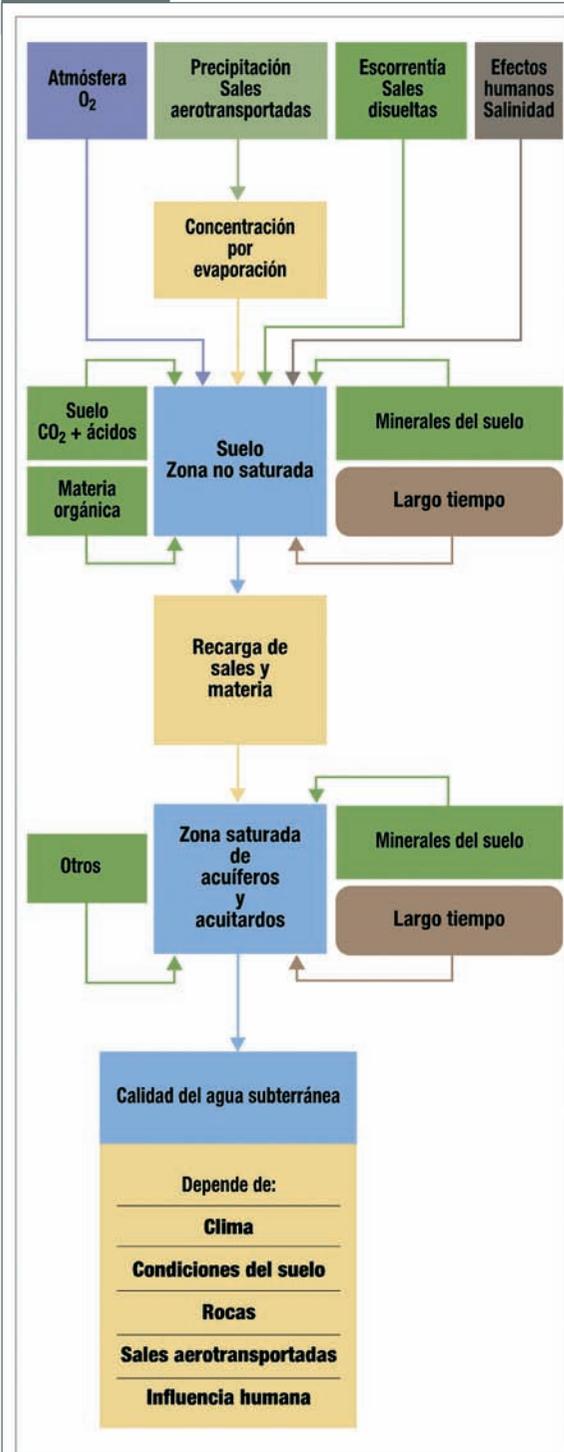
El aporte atmosférico de sales al medio hídrico proporciona la composición química mí-

nima de los cuerpos de agua superficial y subterráneos. Los datos existentes sobre la composición de la lluvia en Doñana son escasos en el tiempo y están concentrados espacialmente en el Palacio de Doñana y en El Acebuche, y se derivan en gran manera de tesis doctorales. Alcalá (2006) los ha recopilado. La lluvia de Doñana tiene una composición ligeramente ácida ($\text{pH} < 7$) y en ella dominan los iones cloruro y sodio (efecto de proximidad del mar), aunque se trata de agua muy poco mineralizada.

Una vez infiltrada en el terreno, el agua de lluvia aumenta su mineralización, fundamentalmente por disolución de minerales, gases (principalmente CO_2 del suelo) y materia orgánica, y también por la concentración que produce la evapotranspiración (evapoconcentración). Ver *Cuadro 7.1*. En buena parte de Doñana los minerales de las formaciones aflorantes son poco solubles, en su mayoría arenas de cuarzo, por lo que el segundo proceso puede contribuir más a la mineralización del agua freática que el primero. Aún así, buena parte de las aguas superficiales y subterráneas en buena parte del territorio, y singularmente en el manto eólico litoral, son poco mineralizadas, de tipo clorurado sódico y con $\text{pH} < 7$, es decir que conservan la marca de la lluvia (Iglesias et al., 1996; Manzano et al., 2005).

La composición química de la lluvia que cae sobre grandes áreas suele variar espacialmente, pero en el caso de Doñana se desconoce si esos cambios son significativos por no haberse realizado estudios específicos. Tampoco existe en el Área de Doñana una red de observación de la deposición atmosférica seca, como se comenta en el *Capítulo 4*. Entre estos aportes algunos podrían incorporar solutos no deseados al medio hídrico.

Cuadro 7.1



Evolución hidrogeoquímica del agua de recarga

El agua de lluvia tiene sales disueltas, aunque a pequeña concentración, y gases incorporados de la atmósfera, entre los que el CO_2 (dióxido de carbono) y el oxígeno tienen especial importancia por las reacciones químicas que inducen en el suelo y en el terreno. Las sales disueltas son en parte de procedencia marina (aerosol marino), procedentes de las gotículas de agua del mar que produce el oleaje y transporta el viento. Otra parte procede de la disolución de polvo atmosférico y de ciertos gases naturales o de producción artificial, como el SCO (sulfuro de carbonilo) y el SO_2 (dióxido de azufre) que aumentan el contenido en SO_4^{2-} (ión sulfato), o como el NH_3 (amoníaco) y por oxidación el ión NO_3^- (ión nitrato). El contenido más característico para estudios de recarga a los acuíferos es el Cl^- (ión cloruro).

Así, el agua de lluvia aporta sales (deposición húmeda) y lava la parte soluble del polvo depositado sobre los vegetales y el suelo (deposición seca).

En el suelo edáfico, donde las plantas tienen sus raíces, se produce una concentración salina ya que las plantas transpiran agua, dejando muchas de las sales en la parte de agua no evaporada, que es la que se va a recargar. Lo mismo sucede con la evaporación directa. En el suelo el agua infiltrada disuelve además CO_2 , que en sus poros está a presión parcial en general mayor a mucho mayor que la atmosférica a causa de la respiración de los organismos y oxidación de la materia orgánica allí acumulada. Así ese agua, que se hace más ácida, puede meteorizar (hidrolizar) minerales del suelo y del terreno subyacente, lo que aporta cationes, aumenta las concentraciones de CO_3^{2-} (ión bicarbonato) y de SiO_4H_4 (silice disuelta), tal como indica la figura. El oxígeno se puede llegar a consumir en parte o del todo, según las circunstancias.

En el proceso descendente de ese agua por el medio no saturado continúan los anteriores procesos hidroquímicos, en tanto se mantengan las condiciones descritas. Una vez que el CO_2 se ha consumido cesa la hidrólisis de los minerales, y por lo tanto la incorporación de iones, ya que en general los minerales no son solubles si no es por reacción química. El consumo del O_2 (oxígeno) puede llevar a que se reduzca el NO_3^- a N_2 (gas nitrógeno) si hay materia orgánica disponible, con lo cual se elimina como soluto reactivo, ya que el N_2 es un gas inerte en condiciones normales. En situaciones reductoras más intensas se disuelven minerales de hierro y manganeso dando iones Fe^{2+} y Mn^{2+} , e incluso se llega a formar NH_4^+ , y en condiciones más extremas CH_4 (gas metano).

Así, la recarga a los acuíferos del Área de Doñana es más salina que la lluvia local, con efecto marino creciente con la proximidad a la costa. Donde existe el manto eólico la evapoconcentración es pequeña, y ésta es mucho mayor cuando las arenas son limosas y arcillosas, como sucede en áreas de la parte norte, donde la recarga es notablemente más mineralizada.

Durante el flujo por el medio no saturado y por los acuíferos el exceso de CO_2 se consume disolviendo carbonatos, que en general son restos de conchas incorporadas a las arenas, si es que están presentes. En caso contrario el agua se mantiene ácida; los carbonatos que pudieron existir ya fueron disueltos anteriormente y sólo quedan en porciones del acuífero casi sin flujo. Los cloruros se mantienen inalterables salvo que haya mezcla con aguas marinas actuales o antiguas. Este hecho permite estudiar y valorar el movimiento del agua subterránea, además de considerar el origen de la salinidad. Este último aspecto se puede detallar más considerando la relación la relación Cl/Br (cloruros / bromuros), ya que ambos iones son conservativos (no sufren modificaciones en el terreno) y dependen de la procedencia del agua y de procesos de contaminación (Custodio y Herrera, 2000; Alcalá y Custodio, 2008).

En el área de recarga, en general el medio es oxidante (mantiene parte del oxígeno atmosférico disuelto) y el SO_4^{2-} y NO_3^- son estables. Pero donde abunda la materia orgánica, como en los terrenos próximos a los ecotonos, lagunas y turberas del Área de Doñana, el NO_3^- desaparece, aparece Fe^{2+} disuelto, y en sedimentos de laguna además se pueden producir sulfuros a partir del SO_4^{2-} , que se incorporan a los sedimentos. Es posible que exista CH_4 en las aguas subterráneas profundas bajo la marisma, aunque por ahora no se ha medido. Desde luego existe a mucha mayor profundidad, ya en el substrato de los acuíferos, y se explota, pero eso está fuera del interés de este libro.

Muchas reacciones químicas están catalizadas biológicamente. En general son lentas, pero los tiempos de permanencia del agua en el terreno son también largos, de años a decenas de años, o incluso centenares y milenios en las partes profundas.

Aspectos generales del funcionamiento de las aguas superficiales en la red fluvial

En el Área de Doñana y su entorno cercano existen tres ríos notables: Guadalquivir, Tinto y Guadamar. Sin embargo, ninguno de ellos aporta caudales significativos al Área de Doñana, y alguno incluso detrae algo de agua, como es el caso del Tinto. El río Tinto es un receptor de escorrentía en la mayor parte de su cuenca, pero al pasar junto al borde noroeste del sistema acuífero de Doñana recibe algunos arroyos de alimentación principalmente subterránea (excepto en época de lluvias) los cuales tienen su cabecera en la misma zona que algunos afluentes de La Rocina (área entre Moguer, Lucena y Bonares). No obstante la descarga es pequeña y el río Tinto se considera uno de los límites del Área de Doñana.

El río Guadamar vierte a la marisma, aunque está artificialmente desviado para que descargue al Guadalquivir (ver más adelante). Los otros cursos de agua que vierten a la marisma por

su borde norte pueden drenar aguas subterráneas locales y únicamente pueden producir recarga en áreas afectadas por las extracciones de agua subterránea, como se comenta en el *Capítulo 8*.

El río Guadalquivir actualmente se limita a cruzar el área, ya que discurre en gran parte sobre sedimentos impermeables de marisma y en el resto está aislado por obras. En su tramo final de estuario puede recibir reboses de la marisma, pero su efecto mareal está controlado por compuertas.

En el marco del Proyecto Doñana 2005 (MIMAM, 1999) se ha realizado un estudio del comportamiento hidrológico de las cuencas que aportan escorrentía superficial a las Marismas (MIMAM, 2001). Según estos estudios, la aportación media del Guadamar en el encauzamiento de Entremuros para el período 1942–94 es de $209 \pm 117 \text{ hm}^3/\text{año}$ para una desviación estándar. Los caudales medios mensuales oscilan entre los aproximadamente $13 \text{ m}^3/\text{s}$ de enero a marzo, y los inferiores a $3 \text{ m}^3/\text{s}$ de junio a octubre. Estos caudales no son del todo naturales pues incluyen desagües de algunos arrozales y están modificados por la existencia del embalse del río Agrío, en cabecera de la cuenca, y por los riegos en la vega del Guadamar, hoy disminuidos por la creación del Corredor Verde del Guadamar.

Debido a la escasez de datos fiables en las estaciones de aforo, el análisis de los caudales de avenida del río Guadamar se ha realizado a partir de una simulación numérica del comportamiento hidrológico de la cuenca. Los caudales calculados a la entrada del encauzamiento de Entremuros para diferentes períodos de retorno, obtenidos en el marco del proyecto del Corredor Verde del Guadamar, son los que se muestran en la *Tabla 7.1*.

Ensanchamiento del arroyo de La Rocina, rodeado por el bosque de ribera. El origen de estos ensanchamientos podría deberse a la mayor facilidad de erosión de las arenas por las crecidas, en áreas de descarga de aguas subterráneas. El bosque de ribera evapotranspira notables cantidades de agua subterránea en verano, de modo que la descarga al arroyo disminuye mucho o cesa temporalmente.

Foto: EC (1993).



Tabla 7.1. Periodo de retorno de caudales para el río Guadiamar. (DEHMA, 2001)

(Años)	5	10	25	50	100	200	500
Caudal (m ³ /s)	439	631	900	1140	1335	1564	1873

Tabla 7.2. Aportaciones de tres arroyos en tres años hidrológicos, en hm³

Año	1995–1996	1999–2000	2000–2001
La Rocina	81	37	43
El Partido	189	43	123
Cañada Mayor	56	13	36

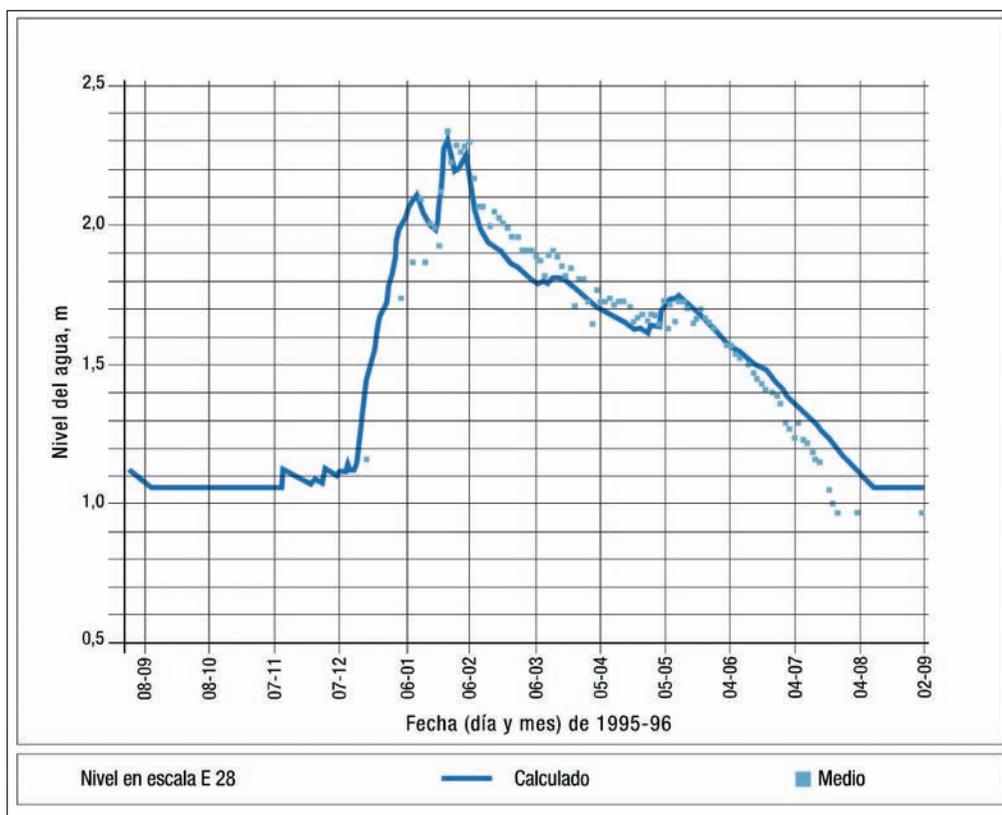
Las aportaciones de los arroyos de La Rocina, del Partido y Cañada Mayor se muestran en la *Tabla 7.2*. Los caudales de avenida del Arroyo del Partido en el Puente de la Matanza (una vez incorporado el arroyo de la Parrilla) son de 358 m³/s para un período de retorno de 100 años, y de 620 m³/s para 500 años.

Consideraciones sobre el funcionamiento hidráulico de las marismas del Guadalquivir

Las marismas del Parque Nacional de Doñana constituyen un sistema hidráulico muy complejo, siendo aceptablemente bien conocidos los aspectos descriptivos de su funcionamiento, pero no así los cuantitativos. En la actualidad aún existe poca información referente a aspectos de gran interés hidrológico como son la evolución temporal de los caudales entrantes y salientes de las marismas, la evaporación y evapotranspiración, las evoluciones temporal y espacial de los niveles de agua y de sus características físico-químicas y biológicas, las características del movimiento del agua y la influencia que en ello tiene el viento.

El territorio donde se sitúan las marismas presenta un escaso relieve, quedando definida la red de drenaje por sutiles variaciones en la altimetría. Esta red de drenaje condiciona en gran medida los flujos de agua, sobre todo al inicio del llenado y al final del vaciado. Por ello, para estudiar la hidrodinámica de la marisma se debe disponer de una buena información topográfica, muy en particular del relieve, lo que supone una notable dificultad dada la gran extensión y la alta precisión altimétrica requerida, del orden de centímetros. Para conseguirlo se ha utilizado la altimetría láser de barrido aerotransportada, en la que la distancia al suelo se obtiene con una precisión del orden de algunos centímetros, con precisión final de unos 15 cm. Dado que se obtiene una elevada densidad de puntos altimétricos, al final se posee un mapa digital del terreno prácticamente con la resolución espacial que se desee. En los aproximadamente 300 km² de marismas inundables se ha referenciado un punto cada 3 m², además de determinarse con cierta precisión la altura y distribución de la vegetación existente en septiembre de 2002, cuando se realizó la campaña. La cartografía digital se completó en 2004

Figura 7.1.
Resultados preliminares de la modelación matemática del agua en la marisma. Comparación de niveles medidos según la escala limnimétrica con los calculados en el Lucio del Rey para el año hidrológico 1995–96. Datos del Grupo de Investigación FLUMEN -UPC.



(Ibáñez, 2008). Lamentablemente la zona volada no se extendió al área de las arenas, lo que hubiese aportado un inestimable soporte a los estudios hidrogeológicos, con poco esfuerzo y coste adicionales.

El modelo numérico que simula la hidrodinámica de las marismas del Parque Nacional de Doñana, realizado en el marco del Proyecto Doñana 2005, permite el cálculo de la evolución temporal de niveles y velocidades del agua en diferentes puntos mediante una aproximación unidimensional para el flujo en la red de cauces y una aproximación bidimensional para el análisis del flujo en el resto de las marismas. En la Figura 7.1 se compara la evolución temporal de ni-

veles medidos con los calculados en la escala limnimétrica situada en el Lucio del Rey.

Actualmente se ha incorporado una red de medida en continuo de variables hidrometeorológicas (*ver Capítulo 4*). También se dispone de un mapa digital del terreno con una cuadrícula de 2 x 2 m que permite diferentes utilidades, como la obtención de perfiles transversales, mapas de pendientes y relaciones cota–volumen de agua y cota–superficie de agua. Los resultados se representan volumétricamente y en área en la Figura 7.2, cuyos valores obtenidos coinciden razonablemente con los obtenidos por Urdiales (1999) a partir de mediciones en escalas limnimétricas.

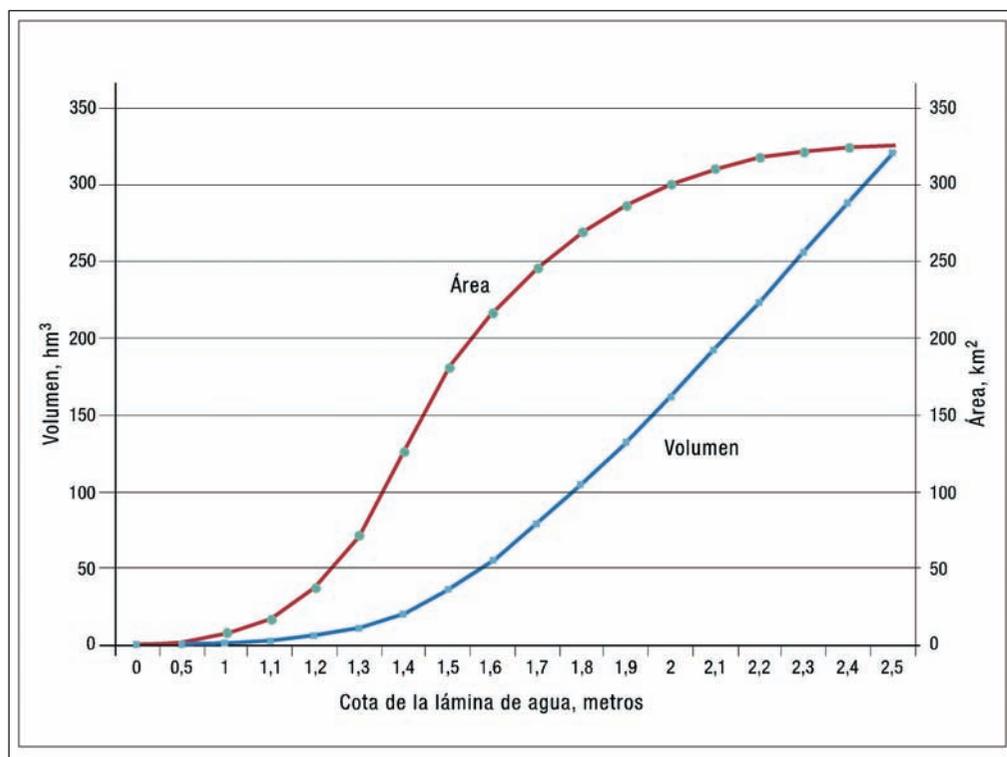


Figura 7.2.

Relación entre el volumen de agua almacenada y la superficie de agua en la marisma del Guadalquivir, con la cota del agua.

Datos inéditos del Grupo de Investigación FLUMEN-UPC.

La información sobre la calidad del agua de la marisma es aún escasa y dispersa, pero es de esperar que la red de sensores que está instalando la Estación Biológica de Doñana como Infraestructura Científico Técnica Singular, junto con los estudios discretos que se puedan llevar a cabo en proyectos concretos, permitan en breve disponer de datos suficientes, con la calidad necesaria para obtener un buen conocimiento de la calidad del agua de las marismas y de los factores de control a escala global.

Humedales diversos

El Área de Doñana se caracteriza por la extraordinaria abundancia de humedales, que tie-

nen muy distintos orígenes geomorfológicos y funcionamiento hidrológico, pero buena parte de ellos dependen directamente del agua subterránea (Custodio, 1995; Manzano, 2001 a y b; Manzano et al., 2002; Coletto, 2003, Serrano et al., 2006). Existe una buena aproximación a su clasificación genético hidrológica (PAH, 2002) y un reciente inventario (Montes et al., 2009).

En el funcionamiento hidrológico y, por tanto en la ecología de estos humedales, influyen numerosos factores (Custodio, 2000), tales como el origen del agua y el modo de llenado del humedal, el modo de vaciado del mismo, su hidropereodo (frecuencia y permanencia de la inundación), la mineralización del agua y el tipo iónico (Manzano, 1999 y 2001 a y b). Debido a la dependencia que tiene buena parte de los hu-

medales de Doñana del agua subterránea, un factor determinante de la hidrología de los mismos es su ubicación respecto al flujo regional en el sistema acuífero. En función de otros factores más locales, la variedad de tipos genético-hidroológicos es grande; no obstante, es posible establecer unos pocos tipos hidroológicos principales y sus características más relevantes, según se resume en la *Tabla 7.3*. Algunos de ellos se esquematizan en la *Figura 7.3*.

En el área de recarga regional al acuífero, sobre las arenas abundan los humedales permanentes y temporales originados por descargas locales de aguas freáticas en época húmeda a

pequeñas depresiones erosivas (deflación eólica, arroyada) o sedimentarias (zonas bajas entre trenes de dunas consecutivos, como los corrales). Esto se debe a que, salvo en las áreas donde se explota intensivamente el acuífero, el nivel freático es en general poco profundo e intercepta con facilidad la topografía del terreno. En época seca la evaporación freática directa y la transpiración vegetal hacen descender la posición del nivel freático lo suficiente como para que éste quede bajo la superficie del terreno. En estas condiciones, las lluvias esporádicas pueden acumular pequeñas láminas de agua en esos humedales. Estas aguas se mantienen colgadas durante un tiempo

Tabla 7.3. Principales tipos hidroológicos e hidroquímicos de humedales de Doñana en relación con su ubicación respecto a la red hídrica subterránea. Modificado de Manzano (2001a)

Ubicación	Tipo hidroquímico	Clasificación hidroológica
Marisma	Agua salobre Tipo Na-Cl	Estacionales o esporádicos, epigénicos (encharcamientos residuales o lucios) Permanentes, hipogénicos (naturales: ojos; laguna el Hondón; artificiales: Lucio de Mari López, Lobo) Estacionales, hipogénicos o mixtos (masas de agua frente a desembocaduras de caños)
Agua de recarga del acuífero (sector central del manto eólico litoral)	Aguas poco mineralizadas Tipo Na-Cl o Na-Ca-Cl-HCO ₃	Estacionales, hipogénicos (Ribetehilos, Ánsares, Peladillo, Mogeá,...) Permanentes, hipogénicos (Acebuche, Los Pájaros –en funcionamiento natural–) Estacionales o esporádicos, epigénicos (Caño del Loro, Jiménez) Mixtos (Sancho Mingo, N de la Vaca,...)
Área de descarga del acuífero (todos los contornos del manto eólico)	Aguas de mineralización media Tipo Ca-HCO ₃ o Ca-Na-HCO ₃	Estacionales, hipogénicos (arroyos, caños, cañadas y algaidas vertientes a La Rocina, La Vera y La Retuerta; arroyos de El Asperillo) Permanentes, hipogénicos o mixtos (lagunas peridunares –Santa Olalla, El Hondón, El Sopotón–; arroyos –La Rocina del Partido, Cañada Mayor,...)

Notas: Epigénicos, debidos al aporte dominante de aguas superficiales y subsuperficiales (infiltración que descarga horizontalmente a poca profundidad, por encima de capas poco permeables).
Hipogénicos, debido al aporte dominante de aguas subterráneas.

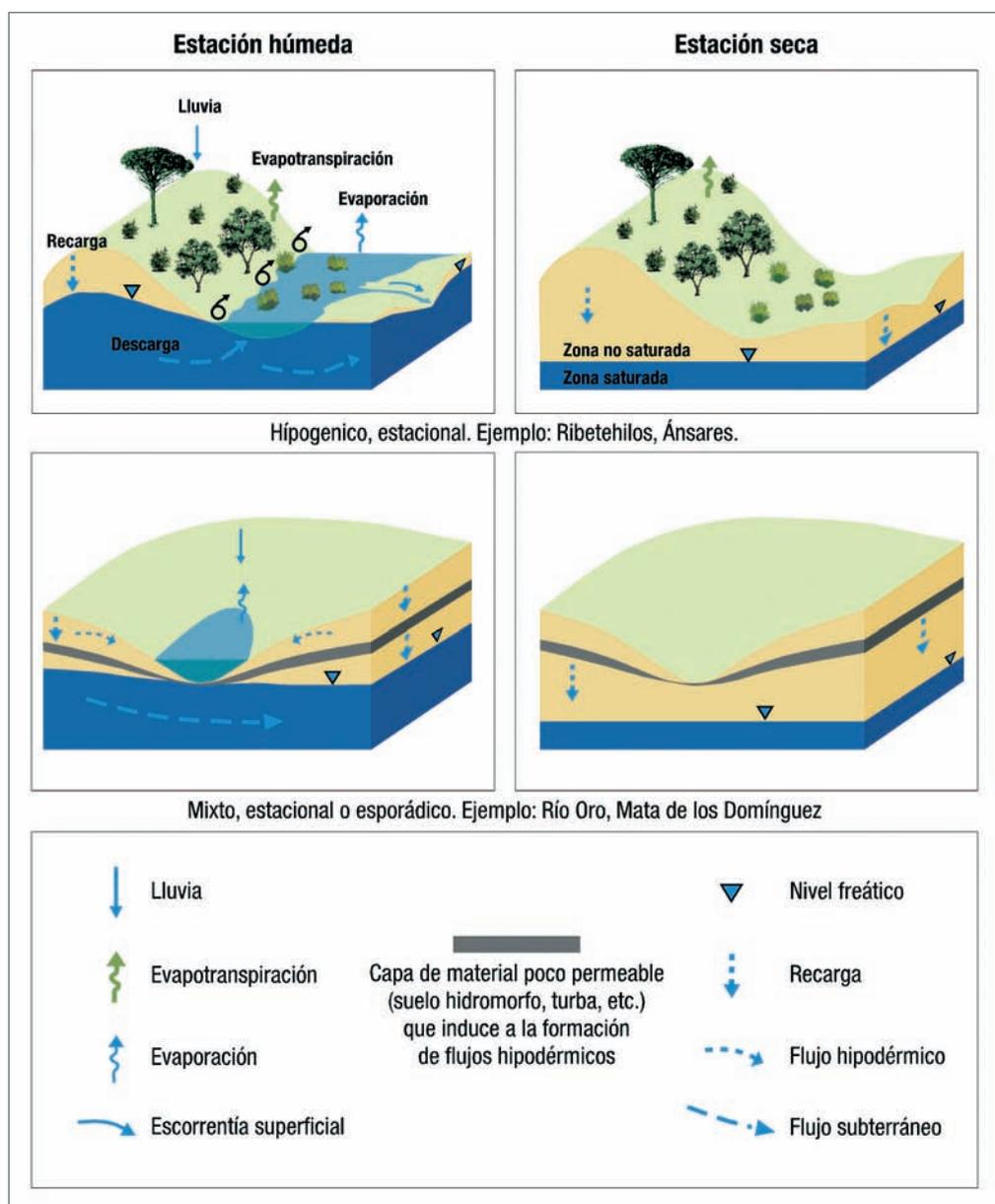


Figura 7.3.

Esquemas del funcionamiento y clasificación hidrológica de algunos tipos de humedales existentes en el sector occidental del manto eólico litoral del Área de Doñana, de acuerdo con la estación del año, según se trate de una situación hipogénica (alimentación por descarga de aguas subterráneas), epigénica (aporte dominante de aguas superficiales) o mixta. Modificado de Manzano (2001a).

gracias a la relativa impermeabilización del vaso lagunar por los restos orgánicos y materiales finos acumulados, y desaparecen habitualmente por evaporación. Debido a los cambios de uso del territorio y a la explotación de aguas subterrá-

neas, hoy quedan pocos humedales sobre arenas que sean permanentes de forma natural (complejo Dulce-Santa Olalla-Las Pajas; laguna de Las Madres); otros se mantienen de forma artificial, bien por alimentación mediante pozos (El

Huerto, Las Pajas, Acebuche), bien por excavación del vaso, habitualmente mediante zacallos (excavación en la parte más baja de una laguna hasta llegar al nivel freático, para crear abrevaderos permanentes para el ganado), como es el caso de El Alamillo, Moguer, Mata de los Domínguez, Ánsares y muchas más.

Los humedales ubicados en la zona de recarga tienen aguas de mineralización muy baja en general, aunque variable, tanto espacial como temporalmente, debido principalmente a causas climáticas. En época lluviosa son menos mineralizadas que en época seca debido al efecto de la dilución por lluvia; en época seca son más mineralizadas, incluso salobres, a causa de la evaporación. En general son de tipo clorurado sódico o intermedio entre este tipo y el bicarbonatado cálcico. Los cambios temporales de mineralización y tipo iónico dependen sobre todo de cambios en el balance entre las entradas y las salidas de agua y de las reacciones químicas que ocurren en el seno de la laguna, en las cuales el papel de la biota es crucial.

Un tipo muy frecuente de humedales ubicados en las zonas de descarga del acuífero son los suelos húmedos densamente vegetados, con o sin lámina libre de agua. Estos últimos se denominan criptohumedales y se ubican en las partes más bajas de los arroyos (algaidas) y también en depresiones interdunares erosivas o sedimentarias. En condiciones naturales suponen una descarga permanente de agua freática que permite mantener todo el año vegetación acuática y freatófitica. Es el caso de los pequeños arroyos, caños y cañadas que descargan a La Rocina y a la marisma por La Vera y La Retuerta, y también el de algunos arroyos permanentes, barrancos y

manantiales que descargan al mar por el acantilado de El Asperillo (río del Loro, etc.). También el arroyo de La Rocina es un drenaje lineal de agua subterránea, tanto freática como profunda, que mantiene un bosque de ribera relativamente bien conservado. Según los lugareños, los arroyos que descargan a la marisma por el norte (del Partido, Cañada Mayor, etc.) tenían una densa vegetación de ribera alimentada por agua freática, pero la vegetación fue eliminada hace tiempo para utilizar el terreno en cultivos y vías de comunicación. En condiciones naturales, sobre todo en el tramo bajo, el agua es de origen freático la mayor parte del año, ya que la escorrentía de la lluvia sólo es importante con lluvias intensas. Esta descarga de agua freática en el ecotono norte, a lo largo del contacto arenas-marisma, es aún relevante entre Matasgordas y el límite con la marisma transformada (arroyo de La Juncosilla, cerca de Hato Blanco). En la franja de terreno menos antropizada (menos afectada por la actividad humana), desde el cono de deyección del arroyo de la Cañada Mayor hasta La Juncosilla, aparecen caños (Carnicerías) y arroyos (Portachuelo, Juncosilla) permanentes o semipermanentes, y en la cabecera de estos aparece un rosario de lagunas estacionales que hace algunos años eran permanentes (de la Anguila, de la Lengua, Juan Sardina,...). La foto aérea de la zona muestra huellas de antiguos rebosaderos de agua freática en la zona de marisma roturada justo al oeste del Palacio del Rey.

Los humedales de la zona de descarga tienen en general aguas de mineralización media a alta, variable a lo largo del año debido a procesos locales de evaporación y reacciones químicas, lo que modifica la salinidad de las descargas de

aguas subterráneas, las que son de composición muy estable.

También sobre el área del acuífero confinado, es decir en la marisma, hay diversos tipos de humedales. Algunos son de alimentación subterránea en origen, ya que la marisma, antes mareal y hoy fluviopluvial, recibe agua de arroyos y caños, los cuales drenan el acuífero de las arenas al norte y noroeste. Entre los distintos tipos de humedales de la marisma están: encharcamientos estacionales de aguas dulces a salinas que son residuo de la inundación invernal (algunos lucios, como los de El Lobo o Mari López, se mantienen artificialmente en periodos de sequía con el aporte de agua subterránea bombeada desde las gravas y arenas profundas confinadas, para conservación de comunidades de aves acuáticas); encharcamientos temporales, con algunas masas de agua permanente en el contacto con las arenas, tanto en el borde norte de la marisma (área de Coto del Rey–El Raposo–La Galvija) como en el borde oeste (La Caquera–La Algaida), que son el resultado de la descarga del agua freática de las arenas al quedar limitadas por las arcillas de marisma. A este último tipo pertenecen los ojos de marisma, que son pequeñas áreas circulares de arenas permanentemente saturadas por flujos de agua subterránea ascendente desde niveles arenosos, no necesariamente profundos, y también la laguna de El Hondón (en la Retuerta), única masa de agua permanente en la mitad sur de la marisma y cuyo origen es la descarga de agua subterránea del cordón dunar litoral, con aportes de lluvia en época húmeda. A modo testimonial de lo que debió ser el funcionamiento natural de la marisma, en la margen derecha del Guadalquivir, cerca de la desembocadura, aún quedan un retazo de marisma mareal.



Buena parte de la extraordinaria biodiversidad por la cual es conocida Doñana es el resultado de combinar los distintos tipos hidrológicos de humedales con su ubicación, salinidad del agua y tipo químico de la misma y forma de variabilidad temporal.

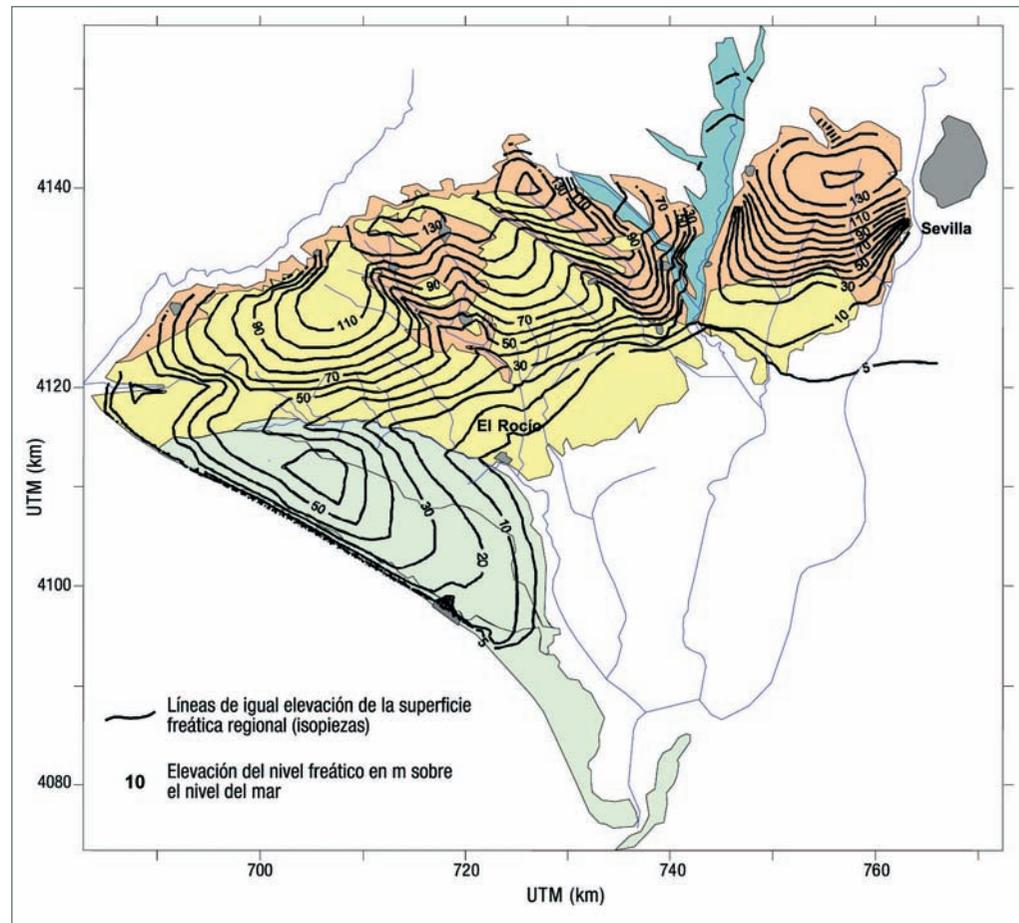
“Ojo” en la marisma (Ojo de las Gangas), en Agosto de 2006, con La Vera en el ángulo superior derecho. Foto: HG/CSIC

Recarga y descarga del sistema acuífero —

El papel del manto eólico en la recarga al sistema acuífero del Área de Doñana es de gran importancia. Al tratarse de arenas finas–medias, con una granulometría bastante regular, tienen una permeabilidad superficial elevada y una relativamente baja capacidad de campo. El resultado es una elevada tasa de recarga de las aguas subterráneas y una baja escorrentía superficial. Por otro lado, donde la vegetación de sotobosque es poco densa y afloran las arenas, éstas pueden adquirir repelencia al agua (Moral et al., 1996), de modo que al inicio de las lluvias el

Figura 7.4.

Piezometría representativa de la situación seminatural (con moderadas extracciones), a escala regional, sin diferenciar entre nivel freático y niveles piezométricos profundos (modificado de UPC, 1999). Las depresiones corresponden al efecto de drenaje de los arroyos y de la vegetación freatofítica de sus proximidades. El agua subterránea fluye a esos arroyos, al mar a lo largo de la costa, a la parte inferior del río Tinto (ría de Huelva) y a la marisma a lo largo de los ecotonos de La Vera y Norte. La figura incluye al acuífero del Alfaraje y parte inferior del valle del Guadalquivir. Por ser las elevaciones freáticas inferiores a 5 m, no hay indicaciones en el acuífero de la barra arenosa (flecha) con dunas que se extiende entre Matalascañas y la desembocadura del Guadalquivir.



agua no moja (no penetra), escurre y se acumula en las depresiones próximas del microrrelieve, donde se puede producir una recarga incrementada, que resulta en una mayor proporción de la lluvia caída (de Haro et al., 2000). La concentración de la recarga debido a la repelencia parece ser relevante en años secos con tormentas.

Fuera del manto eólico, en los sectores norte y noroeste del acuífero, las arenas son de granulometría más irregular, con una notable fracción fina de tamaño limo y arcilla, y por lo tanto es mayor la posibilidad de escorrentía superficial. También la capacidad de campo es mayor, lo que se refleja

en vegetación y bosque en mejores condiciones, pero que comporta una menor proporción de recarga respecto a la lluvia. Así, el territorio no es homogéneo en cuanto a recarga, si no variable. La presencia del manto eólico juega un papel esencial, pues se trata del área de acuífero libre con mejores condiciones para la recarga.

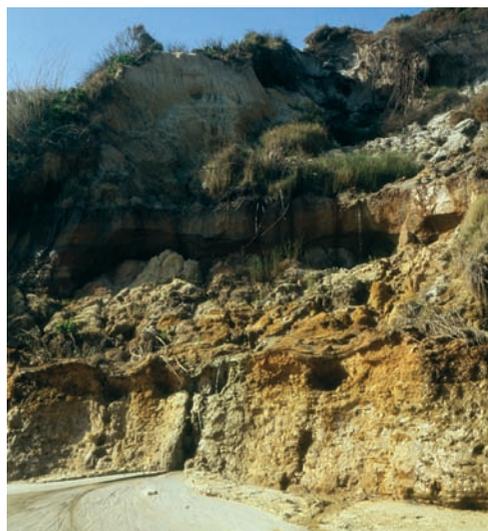
La única fuente de recarga al acuífero es la infiltración de la lluvia que cae sobre las arenas. Los excedentes de riego no generan aumento de la recarga neta ya que el riego se realiza con aguas extraídas del propio acuífero, pero modifican la calidad del agua subterránea local. La escorrentía

superficial sobre el terreno en época de lluvias no genera recarga significativa, ya que en ese momento los niveles freáticos también suelen estar muy cerca de la superficie del terreno. En época seca la escorrentía superficial se genera por descarga de flujos subterráneos. La superficie freática regional (*Figura 7.4*) reproduce fielmente la topografía del terreno, con algunas modificaciones locales recientes debidas a la intensa extracción localizada de agua subterránea (Suso y Llamas, 1993; Manzano, 2001b), como se comenta en el *Capítulo 8*. La *Figura 7.4* muestra que los cauces fluviales son zonas lineales de descarga de agua subterránea, unos permanentes y otros estacionales. También muestra cómo la topografía y las características hidráulicas favorecen la formación de un domo piezométrico en el sector occidental de arenas (manto eólico litoral), cuyas cotas máximas (unos 60 metros) coinciden con la zona topográficamente más elevada, en el entorno del antiguo poblado de El Abalarío.

El sector SE del acuífero confinado (gravas y arenas) contiene agua con elevado tiempo de permanencia (varios miles de años) y de salinidad inicialmente marina, a veces evaporada (evapoconcentrada) en lagunas o lucios durante la formación de los sedimentos, y modificada posteriormente por distintos procesos físicos y químicos en el acuífero (Baonza et al., 1982; Manzano et al., 2001; Manzano y Custodio, 2004).

La descarga natural del sistema acuífero tiene lugar de varias formas:

- 1) Al mar, la mayor parte de forma difusa (Custodio, 1993), pero también concentrada a lo largo de toda la franja costera. Los numerosos manantiales y rezumes del acantilado



Salidas de agua subterránea en el acantilado costero de El Asperillo, cerca de Torre del Loro (u Oro). La descarga por encima de la playa está favorecida por las intercalaciones de capas de reducida permeabilidad. Estas descargas favorecen el progresivo retroceso del acantilado por desmoronamiento. Parte de la descarga se hace a lo largo de la franja costera intermareal de forma difusa no visible.

Foto: EC (2004).

de El Asperillo–El Arenosillo son buena muestra de ello.

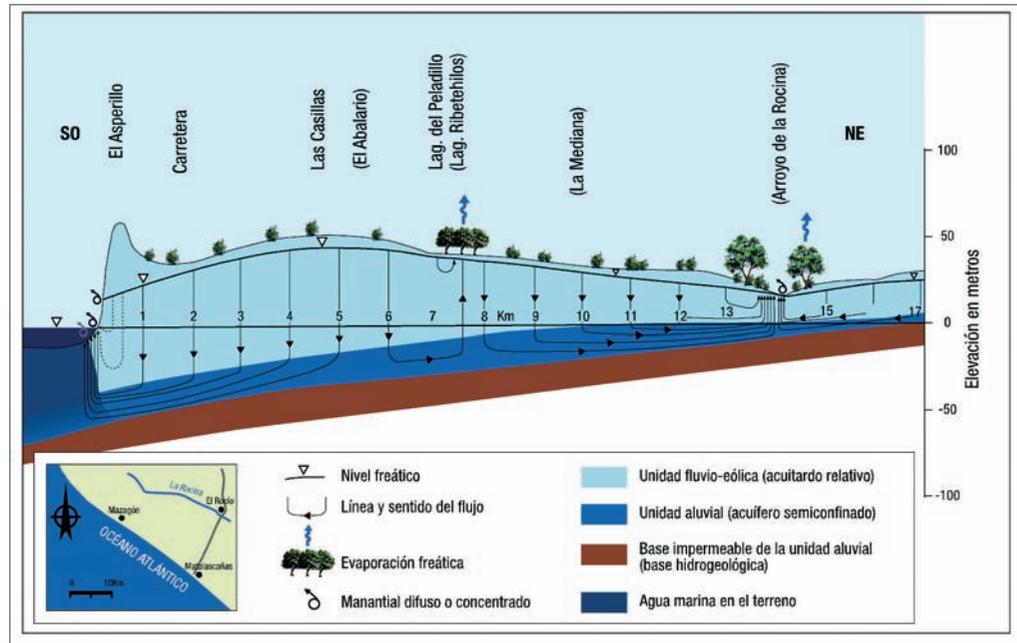
- 2) A los arroyos, en forma de descarga lineal o difusa procedente tanto de flujos someros como de flujos profundos ascendentes desde niveles relativamente profundos (Estero de Domingo Rubio, Las Madres, La Rocina, del Partido, Cañada Mayor, arroyo del Loro,...). También hay descarga del acuífero de Doñana al tramo bajo del río Guadamar y, posiblemente, tramo inferior del río Tinto.

- 3) A lo largo del contacto arenas–arcillas en los contornos norte y oeste de la marisma, por evaporación directa desde el nivel freático (cuya escasa profundidad en el sector occidental lo favorece), tanto de aguas someras de recarga local como de aguas más profundas que ascienden verticalmente

- 4) Mediante transpiración de freatofitas, especialmente en el área entre El Abalarío y La

Figura 7.5.

Esquema simplificado e idealizado del flujo de agua subterránea entre el mar y el Arroyo de la Rocina por el área de El Abalarío (según Custodio y Palancar, 1995). Debido a la existencia de una capa de gravas profundas más permeables que el recubrimiento de arenas finas fluviales, con algunas intercalaciones arenoso-limosas aún menos permeables, el flujo lateral del agua subterránea hacia la costa y el arroyo de La Rocina se produce en gran parte en profundidad, mientras que en las arenas el flujo tiene una componente preferentemente vertical, como se ha comprobado por simulación numérica. El manto eólico entre la costa y La Mediana favorece una alta tasa de recarga por la lluvia.



Rocina, y entre Los Cotos/Los Sotos y la marisma.

5) Mediante descarga en época de niveles altos a los centenares de humedales (lagunas, algaidas y pequeñas depresiones topográficas) de distinto origen geomorfológico que se hallan en la superficie de las arenas cuaternarias y pliocenas (Manzano, 2001b; Manzano et al., 2002; PAH, 2002; Montes et al. 2008), donde se produce evaporación.

La Figura 7.5 es una idealización de la red de flujo de agua subterránea entre La Rocina y el mar a través del domo topográfico de El Abalarío, y la Figura 7.6 lo es de lo que sucede entre la zona de Moguer–Mazagón y la marisma, también a través de El Abalarío. Véanse los esquemas ilustrativos del Cuadro 3.1.

Una parte pequeña, no cuantificada, del flujo de agua subterránea, en vez de descargar en el

contacto con las arcillas de marisma continúa su camino hacia el acuifero confinado, donde terminarían descargando a la superficie de la marisma mediante flujos ascendentes lentos a través de las arcillas (Konikow y Rodríguez–Arévalo, 1993). Aunque aún faltan estudios de detalle, parece que el caudal es en todo caso pequeño (UPC, 1999).

La posible descarga al mar de agua dulce desde el acuifero confinado bajo las marismas, caso de existir, es poco conocida y probablemente pequeña, ya que el acuifero contiene ahí agua salina confinada. Sobre este agua salina, que también ocupa los poros de las arcillas, el cordón dunar de arenas de Matalascañas–Malandar contiene el nivel freático creado por la recarga local sobre las dunas. El agua subterránea del cordón dunar descarga por un lado hacia el mar y por el otro hacia los distintos tipos de humedales pre-

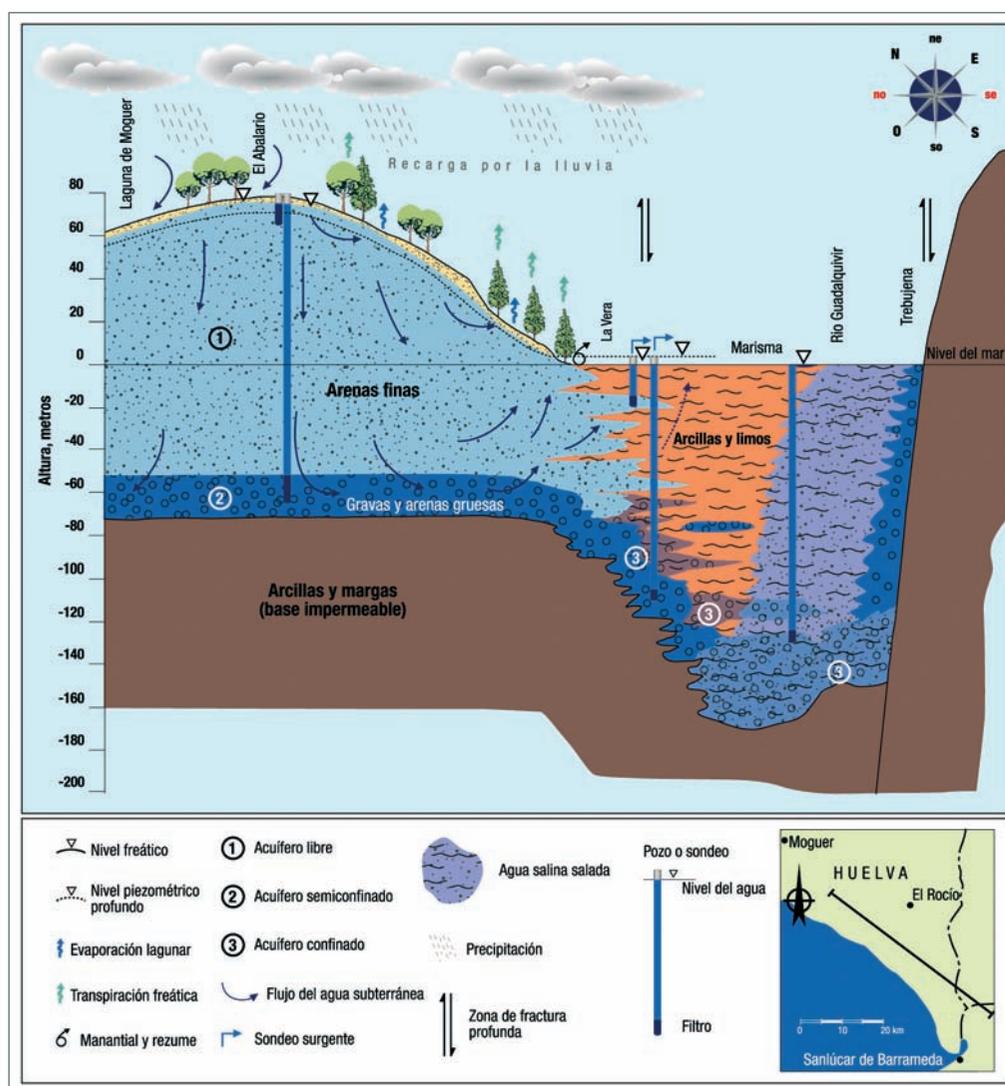


Figura 7.6.

Esquematzación del flujo del agua subterránea entre el sector oeste de las arenas de El Abalarío hasta la Marisma, indicando las descargas naturales. La figura tiene las dimensiones verticales exageradas. Vease la explicación de la figura 7.5. Tomado de Custodio y Palancar (1998).

sentes en los corrales interdunares (Coletto, 2003; Montes et al., 2009). Pero aunque la conexión hidráulica entre las arenas y gravas confinadas bajo la marisma hace que en estado natural éstas sean niveles acuíferos surgentes (con nivel piezométrico por encima de la superficie del terreno), no parece posible que haya descarga profunda hacia el mar ya que el nivel piezométrico del

agua dulce a la profundidad de las gravas no basta para compensar el aumento de presión del agua debido a la mayor densidad del agua marina (1,025 respecto a 1,000), como se comenta en el *Capítulo 3*.

Así, las aguas salinas confinadas bajo la marisma, que corresponden al ambiente marino en que se depositaron los materiales (Konikow y

Rodríguez–Arévalo, 1993; Baonza et al., 1984; Manzano et al., 2001), no han sido desplazadas por el agua dulce recargada en las arenas periféricas ya que en el borde del área confinada la cota del terreno es insuficiente para compensar el mayor potencial del agua salina más densa que existe en profundidad (Custodio y Llamas, 1976; Custodio y Bruggeman, 1987). Las aguas que se recargan actualmente en las áreas arenosas al norte y oeste deben descargar, principalmente, en el contacto con la marisma (ecotono) o en una franja reducida alrededor de la misma. El tránsito entre el agua dulce y el agua salada es relativamente rápido, aunque variable en la vertical y de un lugar a otro, dependiendo de las circunstancias locales.

El esquema de funcionamiento descrito ha debido ser el operativo desde la última estabilización del nivel marino hace unos 6000 años (Zazo et al., 1996 y 1999) hasta hace unos 30 años. Durante las últimas tres décadas el sistema de flujo natural se ha modificado localmente debido a los bombeos intensivos y concentrados justo en zonas

próximas a las de descarga natural del acuífero a lo largo del contacto arenas–arcillas de marisma (alrededores de El Rocío y de Villamarique de la Condesa) y en el sector Mazagón–Palos–Moguer. Este aspecto se comenta en el *Capítulo 8*.

Los tiempos medios de permanencia del agua subterránea en el terreno son muy variables según las condiciones de cada lugar. Mediante el estudio del contenido en los isótopos ambientales tritio y radiocarbono en el agua se han deducido los tiempos característicos para el agua subterránea en el manto eólico litoral (Iglesias, 1999; Baonza et al., 1984; Manzano et al., 2007; Custodio, 1994). Ver *Figura 7.7*. Estos tiempos son:

- a) La transferencia física del agua de recarga desde el suelo edáfico hasta el nivel freático oscila entre menos de un año a pocos años; el agua de los manantiales costeros del escarpado de El Asperillo y de las descargas someras al arroyo de La Rocina tiene pocos años de permanencia en el terreno (6–7 años). El tiempo de respuesta hidráulica (tiempo para que el nivel freático ascienda tras un evento de recarga) es menor.
- b) El agua de los pozos con menos de 40 m de profundidad tiene menos de 40 años de permanencia en el terreno, mientras que los pozos más profundos tienen agua con más de 50 años de permanencia en el terreno; las descargas de flujos regionales tienen varios centenares de años de tiempo de permanencia.
- c) Las descargas de flujos regionales tiene varios centenares de años de tiempo de permanencia.
- d) Las aguas de los pozos profundos bajo la marisma tienen edades entre 1000 y 15.000 años.

Pozo manual en La Vera. Se usa para alimentar el abrevadero. Está excavado en arenas de la franja de descarga de aguas subterráneas.

Foto: MM.



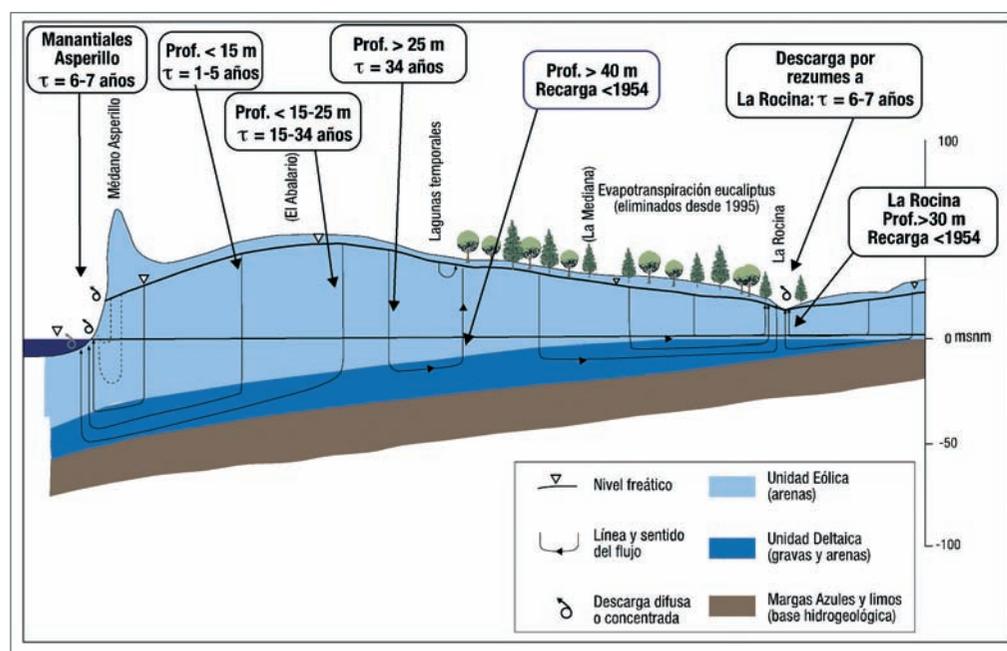


Figura 7.7.

Modelo conceptual de flujo en el manto eólico litoral y tiempos de tránsito (τ) del agua subterránea a distintas profundidades y localidades según la modelación de los datos medidos con tritio (H^3). El muestreo de distintas líneas de flujo fue posible gracias a disponer de sondeos puntuales, con una única rejilla corta y distinta penetración. Manzano et. al. (2009).

Las características hidrogeoquímicas y la calidad de las aguas subterráneas del Área de Doñana dependen del lugar, aunque en general están marcadas por la baja reactividad química de los materiales, ya que dominan las arenas silíceas, mientras que los carbonatos, que son minerales más solubles, están presentes sólo localmente: en el cordón dunar costero, en el borde de La Rocina-La Vera, tanto en los niveles más someros de arenas como en los más profundos, y en el borde occidental del manto eólico.

En la parte central del manto eólico, donde la recarga es importante y no quedan carbonatos en el terreno por haber sido ya disueltos por el agua de recarga ácida (incorpora CO_2 del suelo edáfico), las aguas subterráneas son de baja mineralización. Esta mineralización disminuye con la mayor distancia a la costa debido a la menor influencia del aerosol marino. La influencia ma-

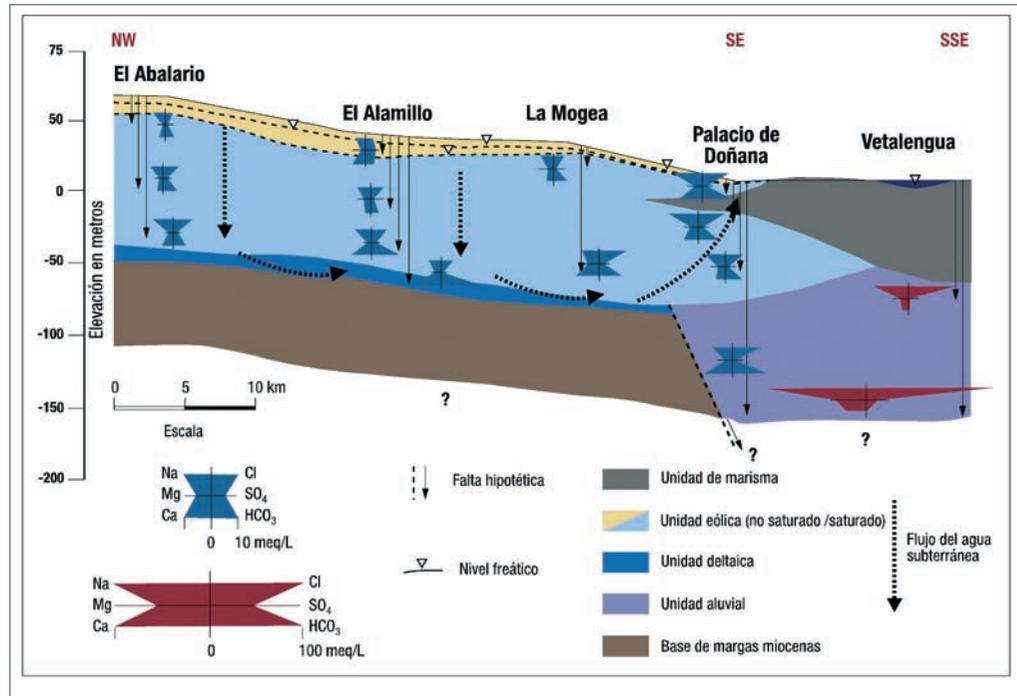
rina se refleja en el carácter clorurado-sódico, y la importante recarga produce contenidos en cloruro en el entorno de 30–50 mg/L.

En las áreas en que no existe manto eólico, y tanto más cuanto mayor fracción fina tenga la arena (mayor capacidad de campo), la evapotranspiración es mayor y la recarga resulta más concentrada en sales, pudiendo llegar a diferenciarse notablemente de las aguas anteriores, aún continuando su carácter clorurado sódico, hasta llegar a tener 200 mg/L o más de cloruro. Evidentemente ahí la recarga es claramente menor.

Cerca de los bordes de la marisma, en el cordón dunar litoral y en profundidad pueden existir restos de carbonatos en los sedimentos debido a no haber sido aún lixiviados, por ser muy recientes o por la lenta tasa de renovación del agua. Esto se ve bien en la Figura 7.8, que muestra un perfil hidrogeológico en el sector acuífero del manto

Figura 7.8.

Esquematación de la composición química del agua subterránea mediante diagramas de Stiff modificados, según un perfil entre El Abalarío y la marisma. Las aguas de recarga poco mineralizadas se mantienen así hasta cerca de las áreas de descarga, donde pueden incorporar restos de carbonatos del terreno existentes en las capas profundas. Bajo la marisma las aguas son fuertemente mineralizadas por existencia de aguas marinas antiguas. Nótese el cambio de escala de los diagramas en rojo. Modificado de Manzano et al., (2007a).



eólico desde la zona central (El Abalarío) hasta la marisma. Se observa cómo las aguas incorporan carbonatos sólo en las capas profundas de la parte central el manto eólico y en los bordes del mismo.

En los niveles de arenas y gravas confinados bajo la marisma se encuentra agua salina, a veces hipersalina (más salina que la del mar), que es de origen marino, penetrada hace más de 10.000 años durante la fase de estuario o congénita con los sedimentos, y quizá agua evaporada de lagunas costeras, mareales o no (Manzano et al., 2006). No se conocen aún los procesos concretos por los cuales este agua llegó en ocasiones a ser mucho más salina que la de mar original. Esta masa de agua hipersalina se ha encontrado incluso en sondeos muy profundos (300 m) en el borde sudoeste de la marisma (Vetalegua), y se desconoce cómo tiene lugar el tránsito entre

estas aguas y las aguas dulces que se encuentran a la altura de Matalascañas.

Localmente pueden existir notables anomalías químicas en las capas más someras de arenas del manto eólico, generalmente asociadas a la presencia de lagunas y caños. Tal es el caso de aguas que se recargan y circulan por medios ricos en materia orgánica, donde se produce un pH y potencial redox capaz de reducir el Fe(III) a Fe(II) y disolverlo. El Fe²⁺ disuelto se precipita luego masivamente por reoxidación y aumento del pH en el entorno de las áreas de descarga. Los cambios de estado redox tienen lugar con ocasión de lluvias intensas, o con las primeras lluvias del otoño. En esas ocasiones es posible observar caños en La Vera generados por la descargas de agua subterránea con agua de color rojizo debido a la elevada concentra-

ción de oxihidróxidos de hierro, que proceden de la oxidación por el aire del contenido disuelto de Fe^{2+} .

Como ya se ha dicho, la mayoría de las lagunas del manto eólico son naturalmente áreas de descarga de agua subterránea local (de los cuerpos de dunas circundantes), y en ocasiones también de líneas de flujo profundas, como sucede en Santa Olalla. La evaporación de agua libre y la transpiración del agua freática por la vegetación circundante produce una evapoconcentración, en especial en verano, que puede hacer que el agua inicialmente dulce llegue a ser salobre y aún salina, y que esta característica se propague al acuífero inmediato. La dinámica es compleja y debe considerar los sucesivos ciclos de inundación–secado y el comportamiento de los sedimentos (Coletto 2003; Lozano, 2004). En el *Capítulo 9* se describe un ejemplo de cómo la acción antrópica está modificando el funcionamiento natural del medio, alterando la composición química del agua subterránea en torno a ciertas lagunas, como la del Charco del Toro. Es la consecuencia del impacto de los bombeos sobre los niveles piezométricos, con la consiguiente desconexión laguna–acuífero.

El estudio de todas esas circunstancias se ha hecho combinando la información hidrodinámica con los estudios hidrogeoquímicos e isotópicos ambientales, que no se describen aquí, pero que se desarrollan en diferentes publicaciones y tesis doctorales ya mencionadas. Estos estudios son ahora suficientes para apoyar un modelo conceptual sólido, pero que aún tiene puntos débiles e incógnitas, que deberán completarse en el futuro.

Recarga a los acuíferos del Área de Doñana —

La recarga a los acuíferos es una de las magnitudes clave para cuantificar las aguas subterráneas, y al mismo tiempo una de los más arduas de obtener, como se comenta en el *Capítulo 3*.

Para evaluar la recarga media multianual al Área de Doñana se han aplicado diversas técnicas, entre ellas:

a) Balances diarios del agua en el suelo, en lo posible calibrados a partir de la evolución de detalle de los niveles freáticos (Trick, 1998; Iglesias et al., 1998; Poncela et al., 1993; Olías, 1993; Samper et al., 1991), apoyándose en el modelo BALAN en sus diferentes versiones (Samper, 1997; Samper et al., 1999).

b) Balance multianual del aporte atmosférico de cloruros en el suelo (Custodio, 1997, 2009; Alcalá, 2006; Custodio y Llamas, 1976/1985; Iglesias et al., 1997), a partir de los datos de ese aporte (deposición) obtenido en algunas de las tesis doctorales (Iglesias, 1999; Coletto, 2003; Olías, 1995).

Detalle de un “ojo” en la marisma en época seca.

Foto: HG/CSIC



Tabla 7.4. Estimación de la recarga (R) por la lluvia (P) en el área de El Abalarío por el método del balance en el suelo de la aportación atmosférica de cloruro (Custodio 2009a). La desviación estándar es una medida de la incertidumbre en la recarga.

Lugar	Recarga		Desviación estándar	
	mm/a	R/P	mm/a	R/P
Franja costera	95	0,17	50	0,09
Franja interior costera (*)	145	0,24	75	0,13
Domo de El Abalarío	140	0,23	85	0,14
La Mediana	165	0,25	100	0,16
Sur de La Rocina	125	0,21	80	0,15
Norte de La Rocina	70	0,11	40	0,06
La Vera	125	0,21	70	0,12

(*) = franja interior costera, tras las dunas de El Asperillo

c) Estudio de perfiles de humedad y de cloruros del agua del suelo en diversas localidades (López y Giráldez, 1999; de Haro et al., 2000).

Los resultados varían de un lugar a otro en función no sólo de la precipitación (poco variable en el Área de Doñana) sino sobre todo de las características del suelo y de la vegetación. La recarga es mucho mayor en suelos arenosos eólicos que en las arenas fluvio-marinas, que son más retentivas y con enraizamientos más profundos.

Algunos valores representativos de la recarga media anual son:

Arenas limosas (borde norte; Aljarafe)	20 mm/a
Arenas fluvio-marinas	90 mm/a
Manto eólico	150–170 mm/a

Para el área de El Abalarío, donde hay manto eólico, se obtienen valores de 150–200 mm/año (hasta 250 mm/año), y para el área de Los Cotos (al este de El Abalarío, hasta las lagunas del complejo de la Santa Olalla) los valores medios son de 135 a 150 mm/año (Lozano, 2004). Valores similares se han encontrado recientemente en trabajos inéditos de la UPCT y la UPC para el Proyecto Doñana 2005, en el área de Los Sotos, en los que se refleja el cambio producido tras la

erradicación del eucaliptal. Las perturbaciones térmicas del terreno tienden a indicar valores más elevados, aunque con una gran incertidumbre. Otros resultados de interés son los que figuran en la *Tabla 7.4* y se muestran gráficamente en la *Figura 7.9*. Las variaciones de la recarga de un año a otro son importantes.

En las *Tabla 7.5* y *7.6* se resumen los resultados de parte de las estimaciones realizadas, en la que se pueden ver las notables variaciones de un autor a otro, además de las variaciones espaciales y temporales.

La incertidumbre de las estimaciones es elevada y no ha sido determinada en los otros métodos aplicados, salvo lo indicado en la *Tabla 7.4*.

En la *Figura 7.10* se muestra la relación entre recarga (R) y precipitación (P) para el área de El Abalarío. Se deduce la relación $R=P-260$ para $P<350$, estando R y P en mm/año. Sin embargo en años secos aún hay recarga de modo que para $P<350$ mm/a es $R=0,3P$. Olías (2003) da una relación algo modificada, pero que prácticamente coincide con la anterior ($P=1,015P-330$ con $r=0,99$). No se ha determinado la incertidumbre asociada.

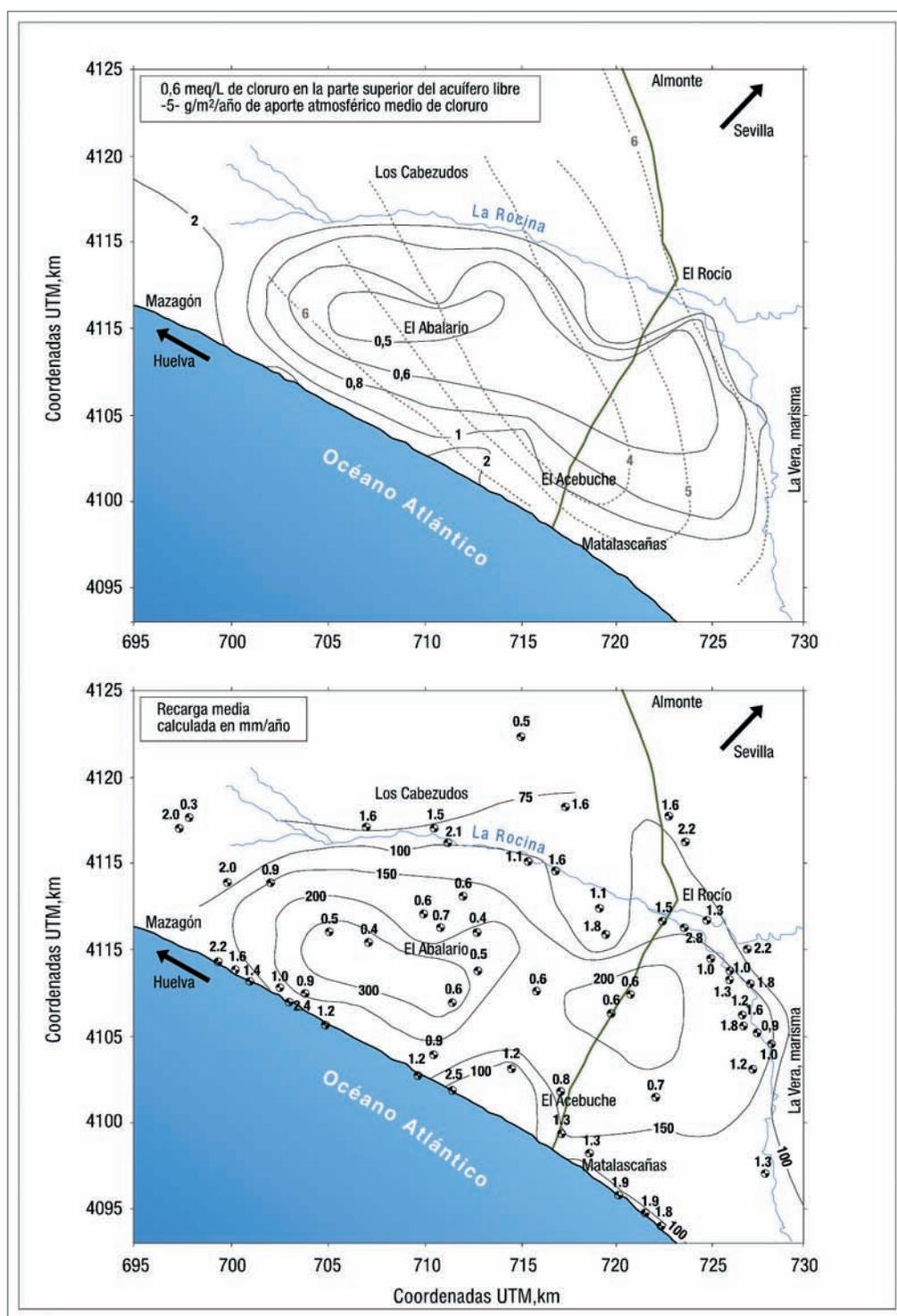


Figura 7.9.

Recarga al acuífero de El Abalarío (según Custodio, 2009). La figura superior muestra el contenido en cloruros de la parte superior del acuífero libre (mg/L) y el valor de la deposición media de cloruro atmosférico ($\text{g m}^{-2}\text{año}^{-1}$), y la figura inferior la tasa de recarga anual media que se deduce, en mm/año.

Tabla 7.5. Diversas estimaciones de la recarga a los acuíferos del Área de Doñana, que en buena parte se refieren al área de El Abalarío, donde las condiciones son más favorables. Los resultados son muy variables y dependen del modo de estimación y área de referencia. No se consideran las que son de carácter muy local o en condiciones especiales, como ensayos en áreas sin vegetación (cortafuegos).

Autor	Estimación media		Método y comentarios
	R, mm/a	Área	
FAO (1970)	30–90	PTAAM	Posiblemente referidos al área sin manto eólico
Poncela et al. (1992)	150–200	Abalarío	Tritio ambiental
Trick (1998)	250–270	Abalarío	Balance en el suelo (Visual BALAN). No considera efecto de eucaliptus
Trick (1998)	100–200	Abalarío	Modelación numérica (MODFLOW). Considera efecto de eucaliptus
Samper et al., (1991)	300	Abalarío	Balance en el suelo (Visual BALAN)
Olías et al. (1993)	238	Mimbrales	42% de la precipitación
Olías (1995)	51 / 98	Rociana	Balance Cl e isótopos del agua
Olías (1995)	147	Hinojos	Balance Cl
Iglesias et al. (1996)	70–210	Abalarío	Balance Cl (R=140±70 mm/a)
Iglesias et al. (1996)	200–250	Abalarío	30±15% de la precipitación
López y Giráldez (1995)	190	Abalarío	Modelación de zona no saturada
Lozano (2004)	88–134	Sotos / Cotos	Balance en el suelo
Juárez (com. personal)	125–200	Sotos	Balance en el suelo (Visual BALAN)
Custodio (2009)	75–300	Abalarío	Balance de Cl.

Balance hídrico de las aguas subterráneas —

Se entiende por balance hídrico a la resolución de la ecuación, en un cierto volumen y para un determinado intervalo de tiempo:

Entradas de agua – salidas de agua – variación del agua almacenada = ϵ

en la que ϵ es el término de error por incertidumbre en los diferentes términos, y que idealmente debería ser cero o mucho menor que los otros términos.

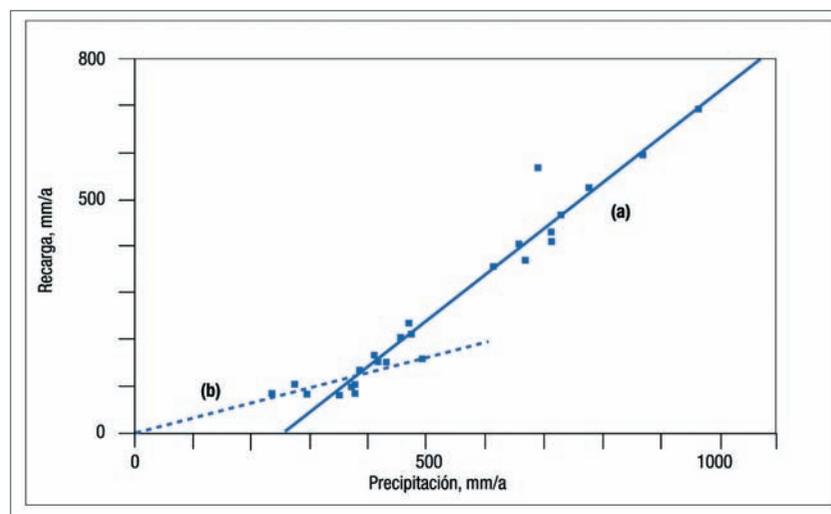
Tabla 7.6. Valores anuales de la recarga estimada en las áreas indicadas. P es la precipitación (mm/año) y R la recarga (mm/a).

Año	Área de El Abalarío				Cabezudos	Acebucho	Asperillo
	R	R	R	R	R (R/P)	R (R/P)	R (R/P)
1989–90	582	563	—	—	—	—	—
1990–91	277	290	—	—	—	—	—
1991–92	79	243	—	—	—	—	—
1992–93	49	192	38	102	—	38 (0,12)	21 (0,07)
1993–94	—	—	—	—	61 (0,17)	190 (0,50)	175 (0,38)
1994–95	—	—	190	—	126 (0,32)	—	—
1995–96	—	—	27	102	84 (35)	52 (0,23)	36 (0,16)
1996–97	—	—	—	697	170 (0,16)	—	—
1997–98	—	—	—	599	567 (0,71)	—	—
Autor	(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(d)	(d)

(a) Olías (1995), perfiles de humedad, lisímetros. (b) Olías (1995), modelo de la zona no saturada. (c) López y Giráldez (1999), modelo en zona no saturada – Thornthwaite. (d) López y Giráldez (1999), modelo en zona no saturada – Thornthwaite. (e) Ordóñez et al. (1993), métodos de estudio del suelo.

La realización con cierto detalle del balance hídrico de las aguas subterráneas del Área de Doñana requiere una modelación numérica que tenga en cuenta los numerosos cambios que se han ido sucediendo en la explotación y en el uso del territorio desde finales de la década de 1960, y que se calibre con las series de datos de niveles piezométricos y el conocimiento preciso de algunos datos hidráulicos procedentes de ensayos en pozos y sondeos. No es posible la calibración con los caudales de descarga, por no ser conocidos. Estos datos hidráulicos se encuentran en diversos trabajos y se reúnen en Trick (1998), Lozano (2004), UPC (1999) y Palancar y Cantos (1996). *Ver también Capítulo 3.*

Se han realizado diversos modelos numéricos de simulación. Entre los generales están los que promovió el IGME para el PTAAM, con sofisticación progresiva. Estos trabajos llevaron luego al modelo general de la UPC, construido



y calibrado en el año 1999 con ocasión del análisis de las consecuencias del accidente de ruptura de la balsa de lodos mineros de Aznalcóllar (UPC, 1999). Posteriormente el IGME ha venido trabajando en otro modelo. La tesis doctoral de Trick (1998) incluye una modelación

Figura 7.10.

Relación recarga–pluviometría anual para el área de El Abalarío, Doñana. Modificado de resultados de Trick (1998) y reproducido en de Haro et al. (2000) y en Custodio et al. (2007).



“Zacallón” en el área lagunar de El Abalarío. Un zacallón es una excavación artificial del terreno para dar acceso al ganado al agua freática de forma permanente. Foto: CMA. JA.

Tabla 7.7. Recarga media al acuífero por áreas, con indicación de la forma de descarga natural. Las cifras son inciertas y deben tomarse como orientativas. Se trata además de cifras medias multianuales, que no representan a un año concreto, o a periodos húmedos o secos.

Área	Superficie	Naturaleza	Uso del territorio	Recarga media		Descarga natural
	km ²			mm/año	hm ³ /año	
1 Norte	446	Suelo limoso	Cultivo extensivo, bosque	40–60	18–27	EF, AR
2 Sur Villamanrique C.	96	Arenas	Pastizales	100–150	10–14	EF, ECN
3 Resto Marismas	1022	Arcillas	Marisma	0–1	0–1	—
4 Ayo. de La Rocina	38	Arenas	Bosque de ribera, regadío	100–150	4–6	RO
5 Sur de La Rocina	64	Arenas	Matorral, regadío	150–200	10–13	RO, ECO, EF
6 Norte de La Rocina	64	Arenas	Matorral, regadío	100–150	6–10	RO
7 Norte de El Rocío	64	Arenas	Regadío	80–100	5–6	ECO
8 Ecotono Norte	70	Arenas y limos	Pastizal, cultivos	100–120	7–8	ECN
9 Cabecera N. de La Rocina	96	Arenas limosas	Bosque	40–60	4–6	RO
10 Cabecera S. de La Rocina	108	Arenas	Bosque	80–100	9–11	RO
11 La Vera–La Retuerta	89	Arenas y limos	Bosque en galería, pastizales, dunas	100–120	9–11	ECO, M
12 Lagunas del PND	96	Arenas	Monte	150–200	14–19	ECO, M
13 El Abalarío	153	Arenas	Monte, bosque	150–200	23–30	RO, M
14 Zona Costera	96	Arenas	Arenales dunares	200–250	19–24	M
15 Moguer	198	Arenas	Bosque, regadíos	100–120	20–24	RT
	2700				158–210	

EF = Evapotranspiración freática. RO = La Rocina. ECO = Ecotono oeste. ECN = Ecotono norte. M = mar. RT = Río Tinto. AR = Arroyos locales

parcial del área de El Abalarío y la de Lozano (2004) del sector El Abalarío–Los Cotos, hasta el ecotono oeste, calibrado con cierto detalle. Pero no existe un modelo general satisfactorio pues hay áreas aún poco conocidas y difíciles de encajar, como la parte costera bajo la marisma. Sin embargo, la buena reproductividad que ofrecen estos modelos respecto a lo observado los hace herramientas muy útiles, a pesar de que la información sea incompleta, haya áreas insuficientemente cubiertas y el conocimiento de las descargas naturales a arroyos, caños y áreas de evaporación sea a veces muy incierto.

Para un diagnóstico grosero, pero rápido y suficientemente ilustrativo, se ha seguido la técnica del balance hídrico por áreas, la misma que se empleó en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992),

pero con un detalle territorial algo mayor (*Figura 7.11*). El territorio del Área de Doñana se ha dividido en 15 áreas, más o menos coincidentes con las de los informes piezométricos de la CHGQ. Estas áreas se representan en la *Figura 7.12* y las correspondientes superficies se dan en la *Tabla 7.7*, en la cual se indica además la recarga media y donde se realizaba la descarga natural.

Para la asignación de la tasa de recarga se ha utilizado la descripción de la naturaleza del terreno indicada en la *Tabla 7.7*. El resultado es que en los 2700 km² del área considerada, la recarga media multianual está probablemente entre 158 y 210 hm³/año, aunque la incertidumbre (coeficiente de variación, que es el cociente entre la desviación estándar y el valor medio) puede valer 0,2 ó 0,3, y ocasionalmente incluso más.

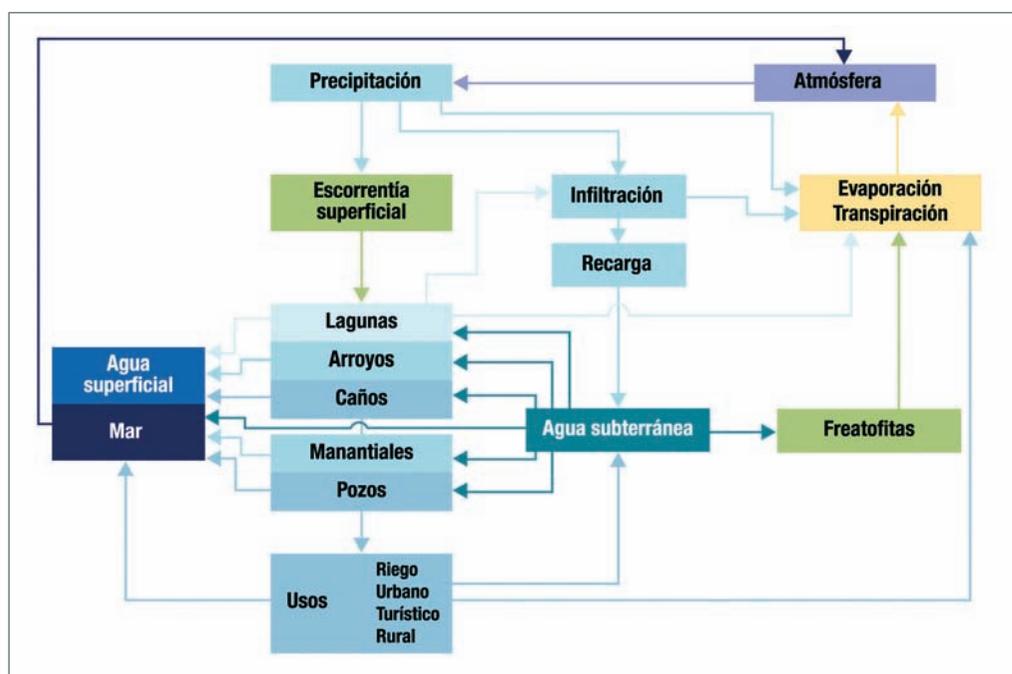


Figura 7.11.

Diagrama esquemático de los elementos del balance de agua en el Área de Doñana. Se parte de la precipitación atmosférica y se vuelve a la atmósfera a través de los procesos en relación con las aguas superficiales y subterráneas. Cada término supone un flujo y un almacenamiento.

En la *Tabla la 7.8* se distribuye la recarga entre los diferentes modos de descarga para el caso de un supuesto estado natural medio del acuífero (*Figura 7.13*), es decir sin extracciones de agua subterránea y con la vegetación natural (Stevenson y Harrison, 1992), sin las plantaciones de pinos, y sobre todo de eucaliptos. Como se comenta en el *Capítulo 6*, y según Sousa (2004), el inicio masivo de ambas plantaciones fue en 1947. En 1952 había 12.000 ha de eucaliptos, que se quedaron en 5000 ha en 1987 y en buena parte se han erradicado del Parque Nacional y de las áreas protegidas entre 1995 y el año 2000. En 1965 había 14.000 ha de pinar. Ver *Figura 7.14* para el área de El Abalarío. Las diferentes salidas consideradas son la evapotranspiración freática del monte negro y bosque en galería de algaidas, caños y arroyos, la descarga al arroyo de La Rocina, la descarga a otros arroyos (del

Partido y La Cigüeña en el norte; los del área de Moguer en el oeste), las salidas al ecotono norte y al ecotono oeste (incluyendo La Retuerta), y al

Pozo y abrevadero restaurado recientemente, en la Casa de Hato Villa. Los pozos captan agua subterránea de capas de arena poco profundas. Actualmente están equipados con pequeñas bombas que permiten tener siempre agua en el abrevadero.

Foto: MM (2007).



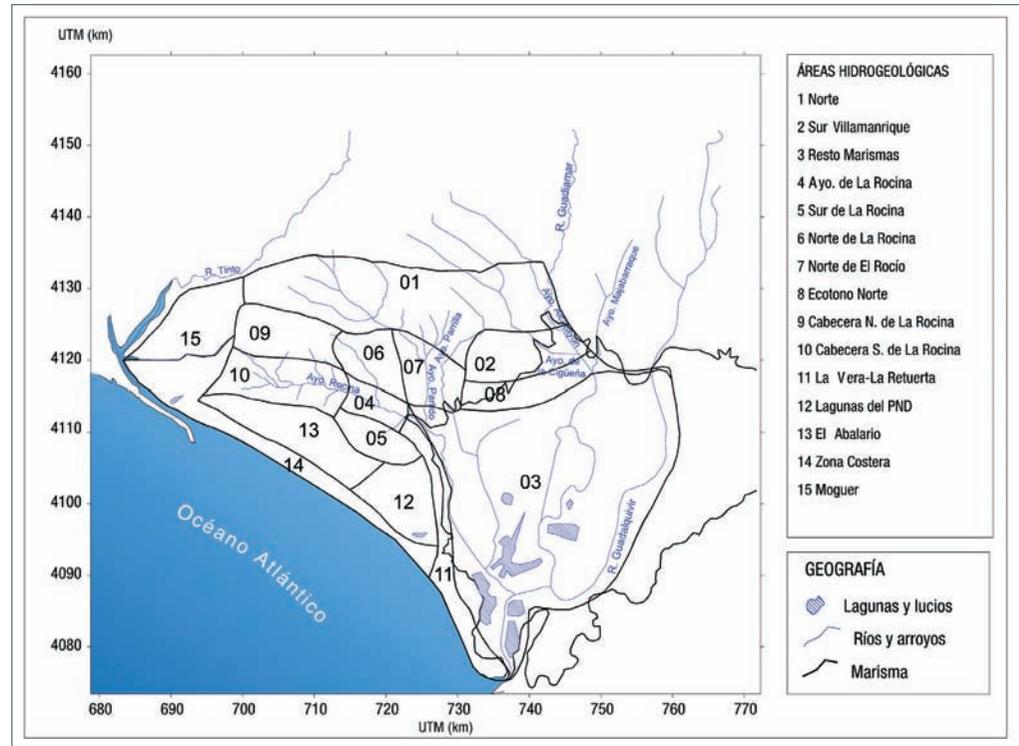
mar a lo largo de la costa o por pequeños manantiales en el acantilado arenoso costero. La distribución se hace en proporción a las longitudes de descarga y a las áreas de influencia. Un área puede tener atribuida su descarga a otra área si así lo hace subterráneamente. El resultado general es el que indica la *Tabla 7.9*, que se corresponde razonablemente con lo indicado en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992). Según el modelo de flujo de agua subterránea de la UPC (1999) la recarga es de 172 hm³/año, también similar, y algo menor que los 213 hm³/a indicados en el Atlas Hidrogeológico de Andalucía (IGME, 1998).

Calidad natural de las aguas en el Área de Doñana

El fondo natural de la calidad de un agua subterránea se puede definir como aquellas condiciones físico químicas de la misma que se derivan de procesos puramente naturales. Así, cualquier impacto sobre la calidad del agua se evalúa por comparación con ese fondo natural. Dicho fondo natural varía espacialmente, aún dentro de un mismo acuífero (Manzano et al., 2003).

El primer factor que contribuye al fondo natural del agua de un acuífero es la composición química de la lluvia que origina la recarga. La lluvia aporta solutos de origen marino y continental y gases disueltos, en distintas proporciones. Depende de la procedencia y trayectoria de los

Figura 7.12.
Áreas hidrogeológicas definidas en el Área de Doñana para realizar el balance hídrico.



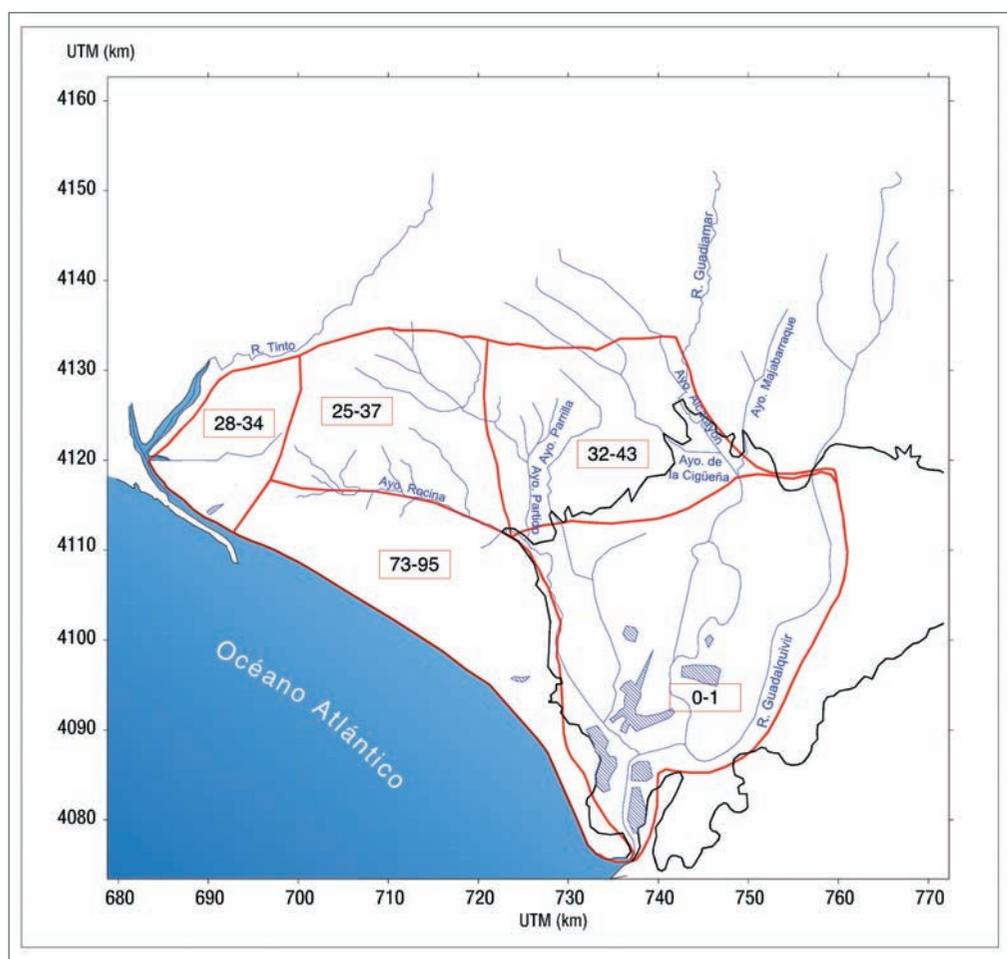


Figura 7.13.

Distribución aproximada por grandes zonas de la recarga por la lluvia en el Área de Doñana. Valores medios, máximos y mínimos esperables, en $\text{hm}^3/\text{año}$.

frentes nubosos que producen recarga. Una vez en el suelo se produce una concentración salina por evapotranspiración –evapoconcentración– que es variable de un lugar a otro. A este proceso se suma el conjunto de interacciones agua–terreno que tienen lugar desde el momento de la infiltración de la lluvia y durante el tránsito del agua subterránea por el medio. Los principales procesos son: disolución de CO_2 en el agua durante el paso por la zona edáfica; precipitación y disolución de minerales; adsorción de sustancias disueltas en el agua, en arcillas, materia orgánica

y oxihidróxidos de hierro; intercambio iónico de unos solutos por otros (principalmente cationes), procesos de oxidación–reducción (inorgánicos y biológicos), biodegradación, etc.

El origen principal de los solutos es geoquímico (procede de las interacciones agua–roca y de los ciclos naturales de los elementos químicos), de aportes atmosféricos y de reacciones químicas. Son función del tiempo y no todos los componentes tienen igual tiempo de residencia. Por lo tanto, el fondo químico natural regional de un acuífero en un lugar determinado es un rango de

Figura 7.14.
Evolución de la superficie de
monocultivos forestales y de la
población en el área de El Abalarío
Modificado de Sousa y García Murillo,
(2003).

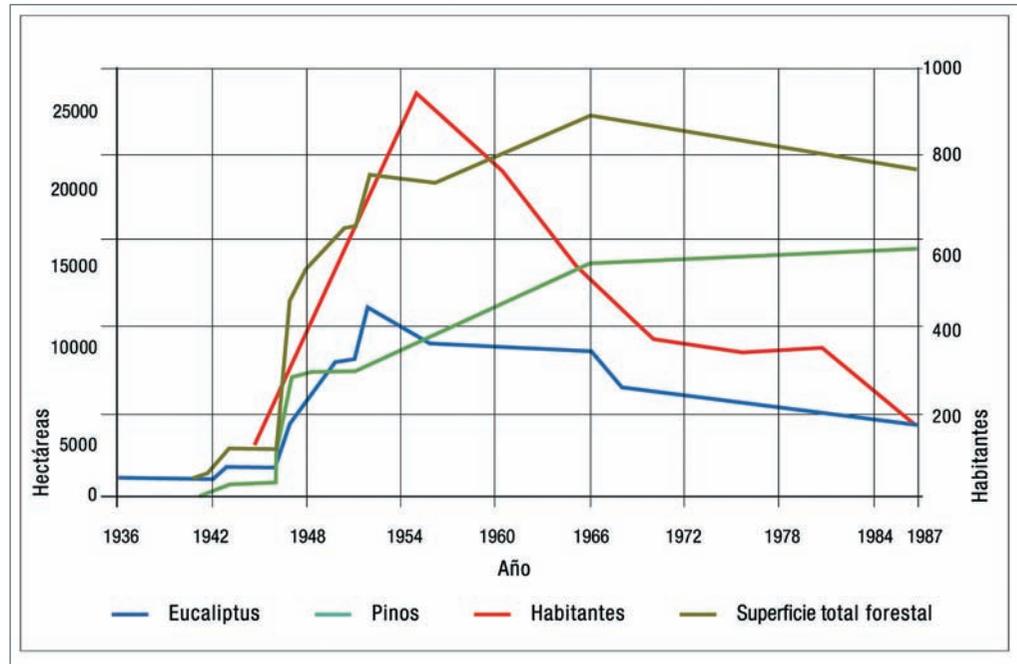


Tabla 7.8. Balance hídrico medio estacionario del acuífero por áreas en la situación natural, es decir, sin extracciones significativas del agua subterránea ni la evaporación freática y eucaliptus.

Área	Recarga	Balance natural medio, hm ³ /año					
		EF	R ₀	Arroyos	ECN	ECO	Mar
1 Norte	18–27	4–6	—	10–14	3–5	1–3	—
2 Sur Villamanrique C.	10–14	2–3	—	1–2	7–10	—	—
3 Resto Marismas	0–1	0–1	—	—	—	—	—
4 Ayo. de La Rocina	4–6	1–2	3–4	—	—	—	—
5 Sur de La Rocina	10–13	2–3	3–4	—	—	5–6	—
6 Norte de La Rocina	6–10	—	6–10	—	—	—	—
7 Norte de El Rocío	5–6	—	—	—	—	5–6	—
8 Ecotono Norte	7–8	—	—	7–8	—	—	—
9 Cabecera N. de La Rocina	4–6	—	4–6	—	—	—	—
10 Cabecera S. de La Rocina	9–11	2–3	7–8	—	—	—	—
11 La Vera–La Retuerta	9–11	1–2	—	—	—	5–3	3–3
12 Lagunas del PND	14–19	2–3	—	—	—	9–14	3–4
13 El Abalarío	23–30	2–3	8–11	—	—	—	14–16
14 Zona Costera	19–24	—	—	—	—	—	18–23
15 Moguer	20–24	2–3	—	13–15	—	—	5–6
	158–210	18–29	31–43	31–39	10–15	25–32	43–52

EF = evapotranspiración freática. R₀ = descarga al arroyo de La Rocina.

Arroyos = descarga a otros arroyos del norte (El Partido, La Cigüeña, ...) y del Oeste en el entorno de Moguer.

ECN = descarga difusa y semidifusa al ecotono norte y borde de marisma

ECO = descarga difusa y semidifusa al ecotono oeste (La Vera y La Retuerta). Mar = salidas difusas y por manantiales a la costa

Tabla 7.9. Resultados del balance hídrico medio estacionario de los acuíferos del Área de Doñana, en estado natural.

Concepto	hm ³ /año	hm ³ /año CIED, 1992	Comentarios
Recarga	158–210	130–250	en el intervalo
Evapotranspiración freática	18–29	30–55	ecotono norte
Descarga a La Rocina	31–43	25–50	en el intervalo; parece real
Descarga a arroyos	31–39	30–50	en el intervalo, aunque no del todo coincidentes
Descarga al ecotono norte y marisma	10–15	30–55	similar si se acumula la evapotranspiración freática
Descarga al ecotono oeste	24–32	25–45	similar
Descarga al mar	43–52	20–50	similar, pero superior

valores. La heterogeneidad litológica y el hecho de que el agua se mueva contribuyen a esa variabilidad. En estado natural la posición media espacial de las líneas de flujo es relativamente fija, pero las extracciones las han modificado notoriamente en el Área de Doñana, pero aún sin tiempo suficiente para alterar la distribución de las composiciones en las partes de menor renovabilidad del sistema acuífero, en general las más profundas.

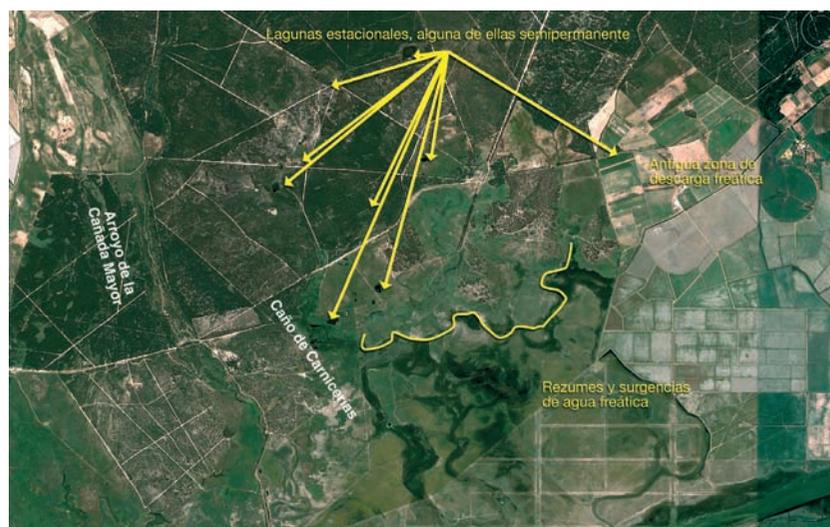
Existen datos sobre la calidad del agua subterránea en Doñana desde los primeros años de la década de 1970, cuando se realizó el estudio hidrogeológico del Bajo Guadalquivir. Durante esa década y la siguiente, primero el IRYDA y luego el IARA gestionaron una red de vigilancia del acuífero Almonte–Marismas que se comenta en el *Capítulo 4*. También en la década de 1970 el IGME comenzó los trabajos del Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS). Estos proporcionaron un conocimiento geológico, hidrogeológico e hidrogeoquímico básico del acuífero de Doñana. La red de control de calidad de aguas subterráneas, aunque muy modificada, perdura hasta la actualidad.

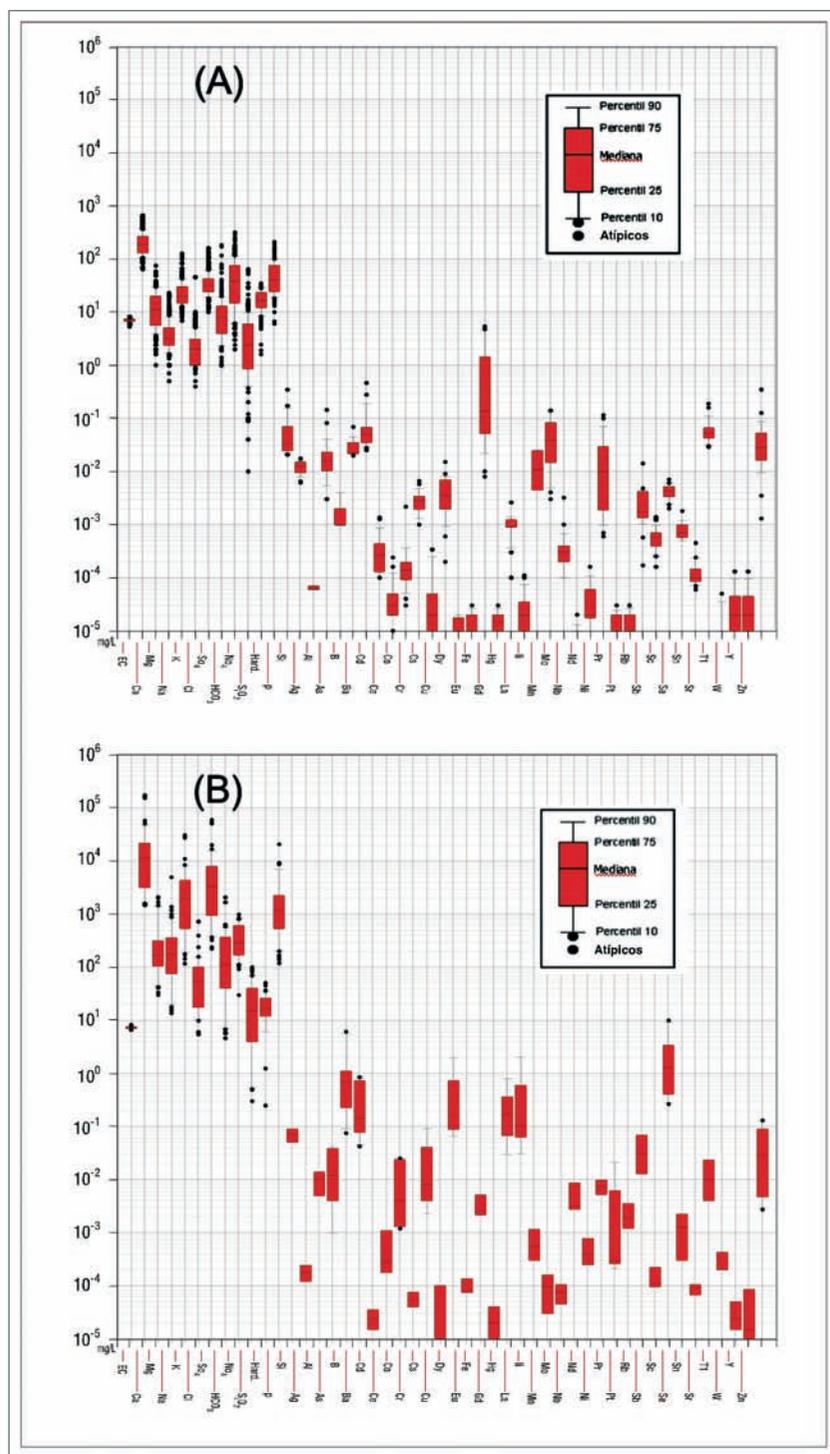
La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir ha realizado ocasionalmente campañas ex-

tensivas, bien para el control de la calidad del agua subterránea o bien para estudios específicos, como el extenso muestreo llevado a cabo en 1982–83 junto con el CEDEX, para el primer estudio hidroquímico e isotópico ambiental a escala regional del acuífero de Doñana (Baonza et al., 1984).

Para el Área de Doñana, con la información existente, procedente en buena medida de las redes de observación de organismos públicos (INM, CHGQ, IGME, EBD, PND, PNatD, IARA) y de los datos generados por grupos uni-

Descarga de agua subterránea a lo largo del ecotono norte, entre la Cañada Mayor y Hato Blanco. Se observa la existencia de numerosas lagunas al norte y noroeste del Palacio del Rey, una franja continua de descarga de agua freática en el contacto arenas–marisma (indicada por la línea amarilla) y los depósitos de materia orgánica en antiguos fondos lagunares y caños en los terrenos roturados de Hato Blanco. Junta de Andalucía. Texto sobrepuesto: Marisol Manzano.





versitarios con una larga historia investigadora en Doñana (UPC, UCM, UPCT), ha sido posible establecer una primera aproximación al fondo químico natural del acuífero (Manzano et al., 2005, 2007; Custodio et al., 2007). En la *Figura 7.15* se da un ejemplo del fondo natural de las aguas subterráneas del manto eólico. De forma comparativa se muestran los valores estadísticamente representativos del pH, la conductividad eléctrica, las concentraciones de los iones mayoritarios y de bastantes componentes minoritarios y trazas en muestras de agua representativas de los sectores menos mineralizados del acuífero (arenas eólicas al oeste de la marisma, con conductividad eléctrica < 1 mS/cm) y de las aguas salinas y saladas (conductividad eléctrica > 1 mS/cm) del manto eólico en el entorno de lagunas con intensa evaporación y evapotranspiración y en el norte de la marisma.

Figura 7.15.

Comparación de la composición química del agua subterránea del acuífero de Doñana. A) aguas dulces (conductividad eléctrica < 1 mS/cm). B) aguas salinas (conductividad eléctrica > 1 mS/cm). La figura permite establecer los valores característicos del fondo químico natural del acuífero. Modificado de Manzano et al. (2005). Los "atípicos" son valores que se salen claramente de la distribución considerada "normal".

Capítulo VIII



Vista aérea hacia el oeste del sistema lagunar de Santa Olalla–Dulce–Las Pajas en época seca. En el lado superior izquierdo se ve el cordón eólico litoral de dunas semiactivas. Son lagunas de descargas de agua subterránea.

Foto: HG/CSIC.

El ciclo perturbado del agua y del agua subterránea en Doñana

Introducción.

El ciclo del agua en Doñana en estado natural se describe en el *Capítulo 7*. Se caracteriza por unas recargas debidas a la lluvia y por unas descargas que mantienen caudales en ríos, arroyos y caños, humedales y criptohumedales (con vegetación de freatofitas). Estas descargas tienen una composición química característica. Todo esto influye en la composición, estructura, funcionamiento y dinámica de las comunidades de organismos al condicionar los hidroperiodos.

Los efectos antrópicos, que se exponen abreviadamente en el *Capítulo 9*, son debidos a cambios de uso del territorio, a captaciones y extracciones para atender a demandas poblacionales y, sobre todo, de riego agrícola. A efectos de contaminación proceden de la actividad humana en la zona de recarga en el Área de Doñana, prin-

cialmente la agricultura, que incorpora nutrientes, plaguicidas, otros agroquímicos y metales pesados a los flujos hídricos, y también de más allá, por vertidos urbanos y de transformados agrarios en áreas de la periferia, y de la polución atmosférica procedente principalmente del polígono industrial de Huelva. Estos efectos antrópicos modifican la cantidad de las descargas hídricas, la profundidad del nivel freático, la calidad de las aguas subterráneas y los hidroperiodos, además de aumentar la cantidad de energía necesaria para la extracción del agua de los acuíferos.

Aportaciones atmosféricas

Las aportaciones atmosféricas de componentes mayoritarios en general varían poco respecto

al estado natural, aunque hay algunos cambios de interés.

Según Querol et al. (2006), en Huelva la composición dominante de las partículas en aire de hasta 10 μm son de origen mayoritariamente industrial (33%). Se caracteriza por los componentes mayoritarios SO_4 , NO_3 y NH_4 , y por los trazas V, Ni, Ti, Cu y Zn. Una segunda fuente (32%) de partículas es el tráfico, cuya composición es cercana a la industrial, y dominan el NO_3 y las partículas carbonosas, así como las trazas de Cu, Zn, Sb y Fe, que son componentes habituales de neumáticos y frenos. Una tercera fuente (27%) es la litológica, dominada por Ba, Sr, Ti y Cs. En mucha menor proporción están las partículas debidas al aerosol marino (5%), otras fuentes no determinadas (3%), y lo que diferentes autores llaman “componente regional” (<1%). En ausencia de industria y de tráfico significativo, la composición de las partículas en aire procedentes del oeste (Huelva) estaría dominada por partículas del terreno y por aerosol marino. Esto ha debido suponer un cambio significativo en las concentraciones de ciertos solutos en el agua de recarga del Área de Doñana, aunque se desconoce hasta que punto tiene consecuencias adversas para los ecosistemas y para la potabilidad.

Los estudios realizados en los últimos años para estudiar la recarga a los acuíferos y para conocer el origen del fondo natural de la calidad del agua subterránea apuntan hacia un mayor aporte atmosférico de sales en fase sólida (polvo) y de solutos, que deterioran la calidad del agua de lluvia (Iglesias, 1999; Manzano et al., 2006), cuyo origen es exterior al Área de Doñana. La lluvia que se infiltra aporta una cantidad de azu-

fre que excede a la aportada por el aerosol marino, incluyendo el exceso natural debido al SCO (sulfuro de carbonilo) y de fuentes difusas generales. En las zonas agrícolas este aporte extra puede justificarse fácilmente por el uso de fertilizantes, pero no en las zonas que nunca han sido cultivadas. Se trata de aportes procedentes del polígono industrial de Huelva, ya sea en forma gaseosa (SO_2 , que se oxida a SO_4^{2-} en el aire) o particulada. Las partículas que se depositan sobre la superficie del terreno y de la vegetación son luego lixiviadas por la lluvia.

Aguas superficiales en cauces _____

La escorrentía superficial general no parece diferir significativamente de la que se produce en estado natural, dentro de la poca precisión con que se conoce, aunque puede haber disminuido por la reducción de humedales. Se considera como estado natural la existencia de agricultura tradicional y la cobertura vegetal que es parte del

Encauzamiento de Entremuros, en la marisma, para recoger las aguas procedentes del río Guadamar y conducir las directamente al estuario del Guadalquivir. Situación después de la limpieza practicada tras el accidente minero de Aznalcóllar. Foto: EC. (1999).



paisaje hasta el segundo tercio del siglo XX, que es el resultado de una notable interacción entre territorio y población. Los cambios son mayores en lo que respecta a la composición química ya que se ha modificado la calidad de la precipitación y ha aumentado la población y sus actividades en la periferia que aporta agua al Área de Doñana.

Cabe esperar modificaciones significativas en las áreas de explotación agrícola intensiva, en especial en el área transformada por el PTAAM, con un incremento de la escorrentía superficial, en parte a causa de drenajes para rebajar la cota del nivel freático, pero no está cuantificado. Tampoco está cuantificado el efecto de la introducción del bosque de pinos y de eucaliptus, ni de la reciente erradicación de buena parte de estos últimos, así como por las modificaciones de uso de la masa forestal, como es el carboneo y la recolección de biomasa. Se desconoce el posible efecto.

En las áreas urbanas y de servicios agrícolas aumenta la escorrentía superficial de la lluvia sobre terreno desnudo, pavimentos y edificaciones, además de que se añaden sustancias de origen antrópico que cambian el pH y las características

físico-químicas del agua. Tampoco estos efectos están cuantificados, aunque se apuntan modificaciones importantes en El Rocío y en Matalascañas. Se trata de superficies pequeñas y los efectos son locales.

Del total de 500 km de cauces existentes en el Área de Doñana, unos 80 km están muy antropizados y otros 200 muy alterados, con eliminación de la vegetación de ribera, ocupaciones del dominio público y de la llanura de inundación en avenidas, y existe contaminación por vertidos diversos. Sólo unos 100 km de cauces se pueden considerar en buen estado (WWF, 2001a) y están protegidos (Estero de Domingo Rubio, La Rocina, Cañada Mayor, de Pilas). En otros la depuración realizada no es suficiente o no se práctica (WWF, 2001b; FD21, 2002).

En el conjunto de poblaciones que existen en el área de las cuencas fluviales que vierten al Área de Doñana, en 2001 había 12 estaciones depuradoras de aguas residuales, seis de ellas dentro de la misma. Otras 12 estaban previstas. En la *Tabla 8.1* se resumen las características esenciales de parte de esas estaciones. No se ha realizado una actualización de estaciones y funcionamiento de las mismas.

Tabla 8.1. Estaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas (modificado de Giansante, 2003).

Planta	Estado en 2002	Comentarios
Aznalcázar (Huevar, Sanlúcar la Mayor)	No opera	12700 m ³ /día, biológica
Villamanrique-Pilas	No opera	10500 m ³ /día (incluye vertidos de almazaras)
Villafranco/Isla Mayor	Planificada	
Bollullos Par del Condado	No ha operado	
Hinojos	Opera	vierte a Cañada de La Mayor
Hinojos	Opera	vierte a Arroyo del Algarbe
Almonte-Rociana	Opera	deficiente
El Rocío	Opera	es la nueva, de 2002
Matalascañas	Opera	con tratamiento terciario; riego de campo de golf

Los vertidos se hacen a los cauces que aportan agua al Área de Doñana, excepto la planta de Villafranco/Isla Mayor, que lo hace fuera del área, y la de Matalascañas, que por su situación costera lo hace directamente al mar, de modo que este agua no está disponible de nuevo. Esta última estación tiene el problema de la gran estacionalidad y variación semanal del agua que recibe.

A los vertidos poblacionales se unen los agroindustriales, entre los que destacan los que guardan relación con la industria aceitunera. Es un vertido estacional muy contaminante en cuanto a salinidad y aditivos químicos (sosa), y contenido en materia orgánica. El vertido de esos efluentes a la red urbana es un gran trastorno para las estaciones depuradoras, como es el caso de Villamanrique de la Condesa, y el vertido a

los cauces produce una seria afección a los ecosistemas, como ha sucedido tradicionalmente con el arroyo Alcarayón (cuenca baja del río Guadiamar).

Las transformaciones y actividades realizadas en las cuencas que aportan caudales superficiales a la marisma han provocado un notable incremento en el transporte sólido a través de sus cauces, lo que supone una mayor velocidad de colmatación de sus tramos bajos. Este proceso es visible en los arroyos de La Rocina y Cañada Mayor, y es mucho más patente en el arroyo del Partido. El 74% de la superficie de la cuenca del arroyo del Partido (300 km²) es campiña agrícola deforestada, donde los cultivos y las técnicas tradicionales de laboreo han sido substituidos por otros que favorecen en gran medida la pér-



Figura 8.1.

Detalle aéreo del sur de El Rocío, con el tramo final del arroyo de La Rocina (izquierda), el puente de La Canariega, la marisma de El Rocío (centro) y el curso de la Madre de La Marisma (extremo derecho inferior), con el gran abanico aluvial de arenas de erosión que se ha ido formando en la desembocadura del arroyo del Partido (derecha).

Imagen Instituto de Cartografía de Andalucía (2009).

dida de suelo. Así, cabe citar la disminución de los cultivos de vid o arbolado con gran densidad radicular, la utilización de maquinaria que permite arar a gran profundidad y el laboreo según las líneas de máxima pendiente. Giansante (2003) cita valores de la erosión de 60–105 t/ha/a para el nuevo olivar. Los cauces también están sometidos a unas acciones que favorecen su inestabilidad y su erosión, y en especial la eliminación de la vegetación de ribera y el pastoreo abusivo. Como consecuencia, las aportaciones sólidas a la red de drenaje, y en particular al cauce principal, se han incrementado fuertemente en los últimos años.

Con anterioridad a 1981 el arroyo del Partido desaguaba a la marisma a través de diferentes cauces (rebosaderos) que eran activos (o no) según fuera el caudal circulante. Ello suponía una zona de desagüe muy amplia, con pequeñas velocidades y calados. En 1981 el arroyo del Partido fue encauzado en sus últimos 7 km, lo que supuso una concentración de caudales, con incrementos de velocidad y calado, por lo que el nuevo cauce ha resultado inestable, y se ha provocado una fuerte erosión remontante por las aguas de avenida.

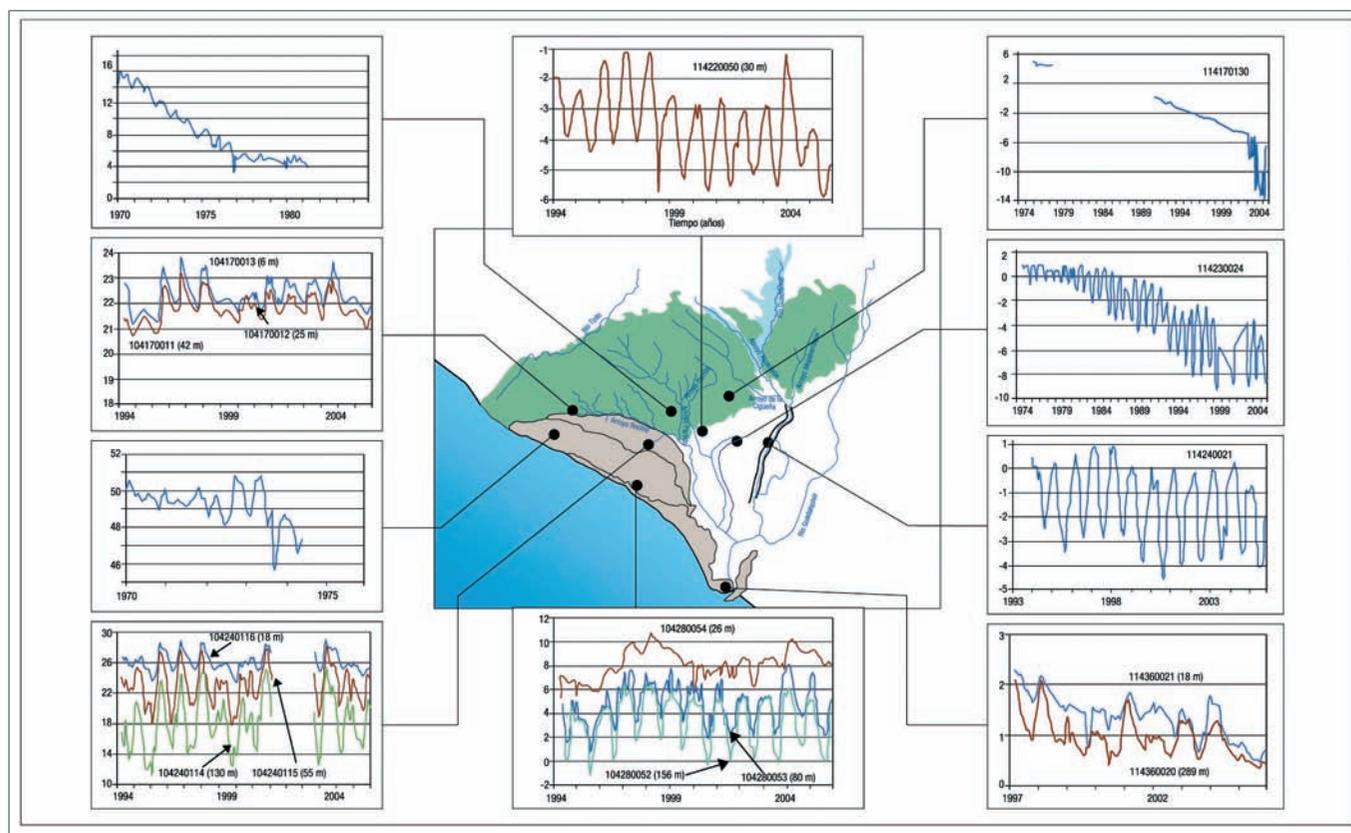
Así pues, en los últimos tiempos se ha incrementado notablemente la producción de sedimentos que se incorporan a la red de drenaje de la cuenca del arroyo del Partido, ya sea procedentes de su parte alta o del propio cauce en su tramo final. Como consecuencia las aportaciones de material sólido a la marisma han sido muy elevadas. Desde el momento de su canalización hasta 1998 se estima que el arroyo del Partido depositó 3 hm³ de sedimentos en una superficie de 200 ha, 150 de las cuales se sitúan en la ma-

risma. El cono de deyección así formado avanza hacia el este (zona de Matasgordas) y hacia el oeste (Caño Marín y Aldea de El Rocío) (*Figura 8.1*). Ello ha propiciado que en los últimos años, y para avenidas de cierta entidad, el Caño Marín actúe como rebosadero del arroyo del Partido. Estos aspectos han tenido una destacada consideración en el Proyecto Doñana 2005 (Mintegui, 2005), de modo que las tareas de restauración de la dinámica hídrica del arroyo están prácticamente terminadas.

La marisma _____

Las sucesivas intervenciones humanas han alterado notablemente el funcionamiento de la marisma, tanto en lo que respecta a las aportaciones del río Guadiamar como a las relaciones con el estuario del río Guadalquivir (Bayán, 2005a). El Proyecto Doñana 2005 ha incluido actuaciones orientadas a propiciar que las marismas de Doñana recuperen, en la medida de lo posible, la situación existente antes de la profunda transformación acaecida al inicio de la segunda mitad del siglo XX (Bayán, 2005b). Se trata de restablecer la hidrodinámica natural de los cursos superficiales de agua, de acuerdo con la topografía de la marisma, de modo que la distribución de salinidad de la marisma se aproxime a la natural y que mejore la calidad del agua al incrementarse la depuración de vertidos y su control, en especial tras haber cesado a finales de la década de 1990 las actividades mineras en la cuenca alta del río Guadiamar.

El Proyecto Doñana 2005 ha incluido también la restauración del Caño Travieso para que



los caudales de avenida del río Guadiamar sean conducidos a las marismas a través del mismo. Para ello la finca Los Caracoles se ha reincorporado a las marismas. También se considera la recuperación de la funcionalidad fluviomareal del Brazo de la Torre (antiguo brazo del Guadalquivir) para caudales ordinarios, mientras que en caso de caudales de avenida éstos son derivados hacia el restaurado Caño Travieso. También se contempla la permeabilización de la marisma en su límite oriental respecto al estuario actual del Guadalquivir, actuando sobre la Montaña del Río (dique en buena manera artificial que separa la marisma del río) y su prolongación.

Modificaciones en las aguas subterráneas

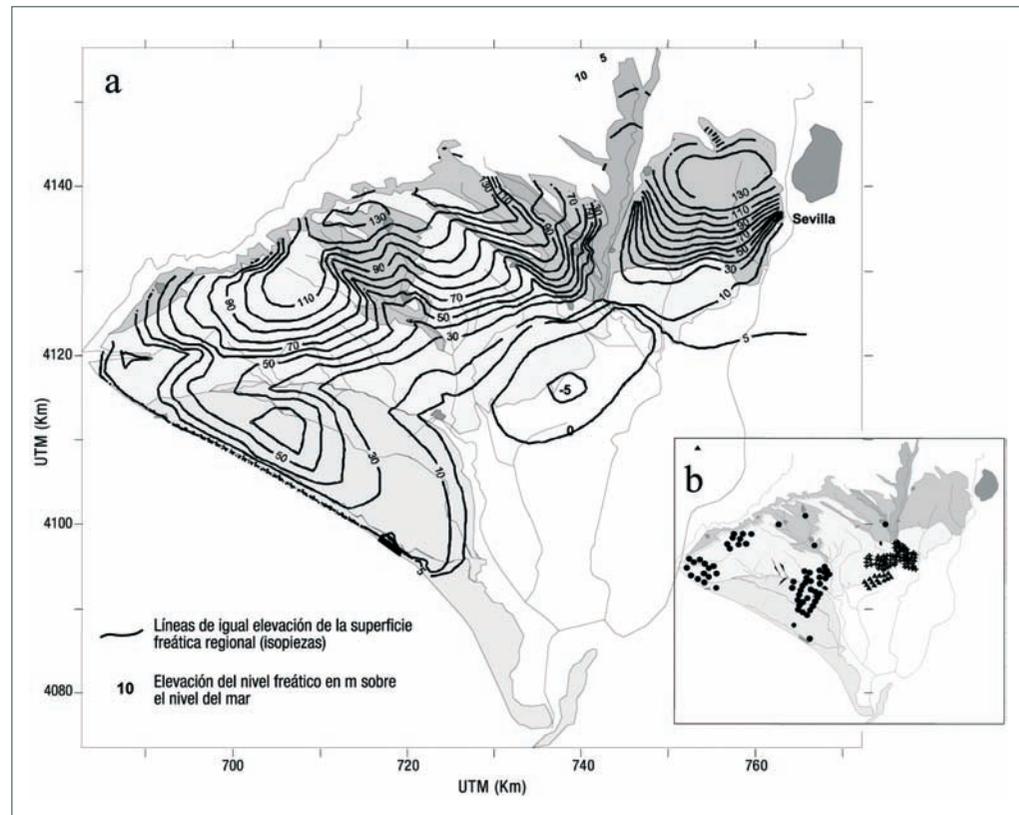
La extracción intensiva de agua subterránea durante más de dos décadas, localizada en zonas próximas a las de descarga natural del acuífero, ha ocasionado descensos acumulados locales de los niveles piezométricos profundos, lo que a su vez ha supuesto un descenso del nivel freático (Figura 8.1). Estos descensos no están aún estabilizados. Lo que se observa es una situación transitoria hacia una nueva posición de equilibrio, de acuerdo con la actual relación entre recarga y descarga artificial del acuífero. Esto supone, además de la progresiva disminución y desaparición de los

Figura 8.2.

Ejemplos de descensos freáticos y piezométricos acumulados en distintos lugares del acuífero en los primeros años tras el inicio de las extracciones intensivas de agua subterránea a partir de 1975. Se observa el efecto sobre el acuífero confinado bajo la marisma. Color gris: acuífero confinado bajo la marisma; color azul claro: acuífero libre bajo el manto eólico; color verde: acuífero libre en arenas de menor permeabilidad.

Figura 8.3.

Altura del nivel piezométrico/superficie freática en 1999 de las aguas subterráneas en el Área de Doñana y áreas próximas, ajustada a las observaciones existentes con el modelo de simulación numérica de la UPC (1999). En el mapa adjunto se indica la situación de los principales puntos de extracción. En el cono de depresión desarrollado en el entorno del ecotono norte se alcanzan descensos que llegan a 15–20 metros bajo el nivel del mar. Abarca una zona muy extensa en la cual hay arroyos, lagunas y vegetación freatofítica, todos ellos afectados por los descensos, y también algunas captaciones agrícolas salinizadas por el desplazamiento hacia el norte de las aguas subterráneas salinas congénitas que existen en los acuíferos bajo las marismas.



flujos subterráneos locales que alimentan a las lagunas y criptohumedales, una disminución de la descarga por rezumes en el contacto arenas–arcillas, la desaparición de las condiciones de surgencia en pozos y sondeos de La Vera, la disminución del flujo de goteo ascendente a través de las arcillas de marisma y la formación de un cono de depresión piezométrica (y freática) de grandes dimensiones en el sector noreste de la marisma (Figura 8.3), el cual ha inducido el desplazamiento de sur a norte de agua salina en los niveles permeables bajo la marisma y el consiguiente inicio de salinización de algunos pozos agrícolas de esa zona periférica, aunque hay muy escasa información sobre este último aspecto.

La modificación del flujo de las aguas subterráneas (Figura 8.4) ocasiona mayor movilidad de las aguas de los acuíferos profundos, que estaban casi estancadas. También produce una modificación de los flujos verticales (Figura 8.5) que acentúa o invierte las diferencias entre niveles freáticos y niveles piezométricos profundos. Así resulta que esas aguas más profundas, en general más ricas en calcio y bicarbonato, van siendo reemplazadas por aguas recientes. Tal debe estar sucediendo en pozos profundos, en especial cerca de las áreas de descarga en La Rocina y en el ecotono, pero los volúmenes de agua subterránea hasta ahora extraídos no han supuesto aún una suficiente renovación del gran volumen de agua almacenada

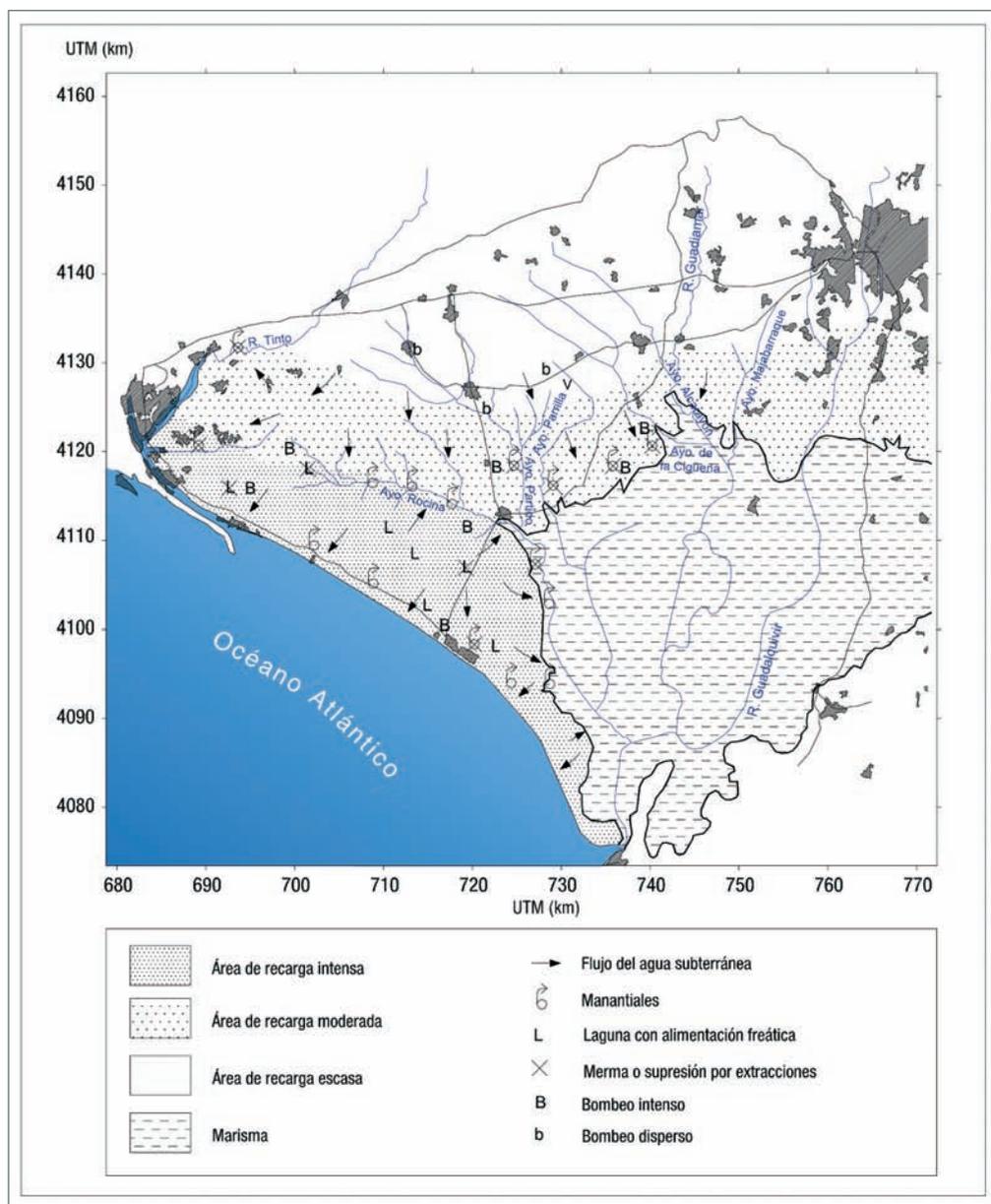


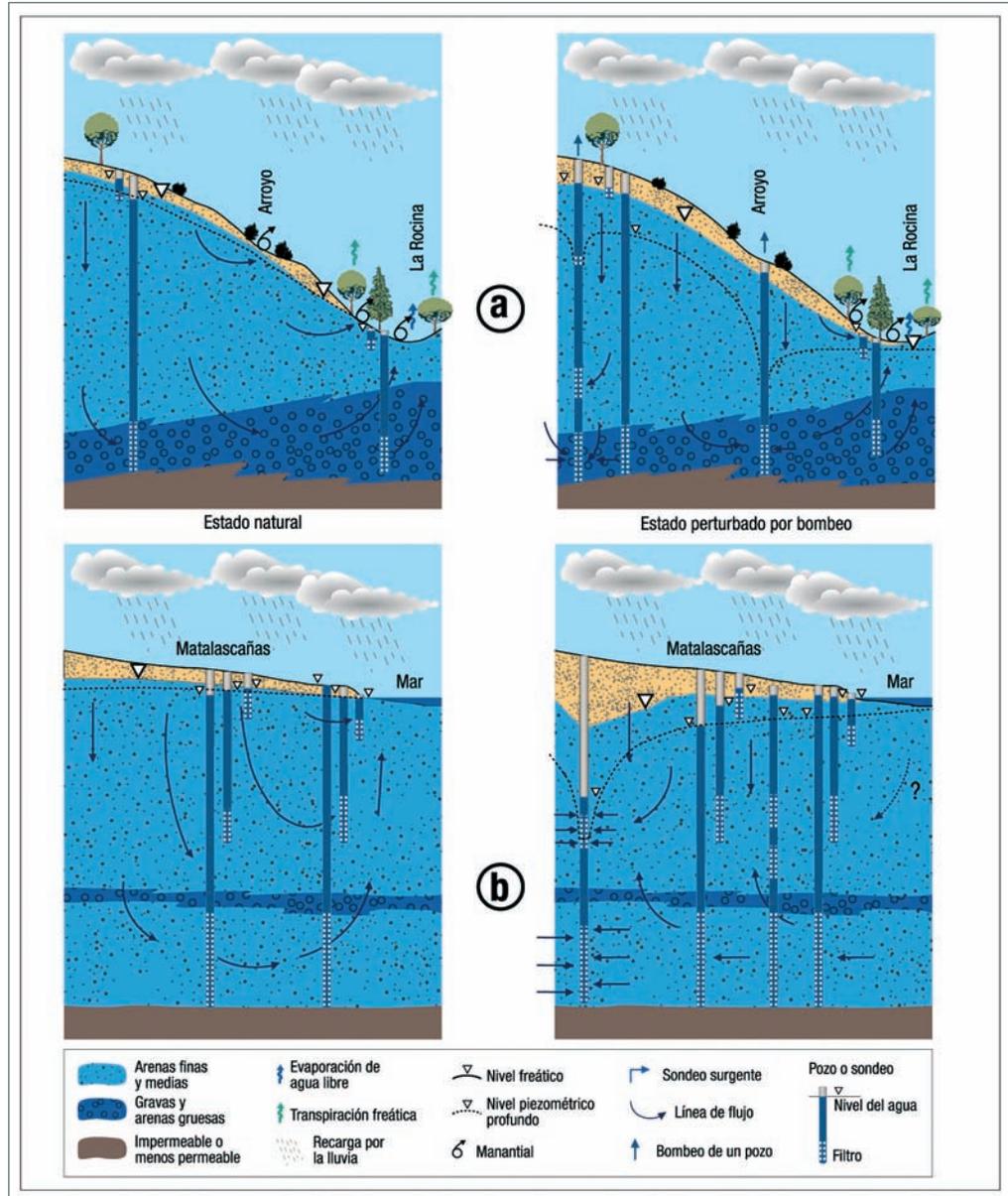
Figura 8.4.
Esquematación del funcionamiento de los acuíferos del Área de Doñana en situación influenciada.

en el sistema acuífero. Con las extracciones actuales el tiempo medio de renovación es groseramente de 100 años, aunque varía mucho de un lugar a otro. Sólo se tienen unos 30 años de explotación intensiva.

La acción antrópica sobre la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea es diversa. La más directa y conspicua es la derivada de la agricultura a través de lixiviación de fertilizantes, correctores del suelo y otros agroquímicos. Esto sucede en el

Figura 8.5.

Cambios en la posición de los niveles freáticos y piezométricos profundos, y en el sentido de los flujos verticales del agua subterránea entre la situación de funcionamiento natural del acuífero y la influenciada por bombeo. Se idealizan las situaciones de La Boca, en La Rocina, junto a La Canariega (arriba), y el área costera de Matalascañas (abajo). Según Custodio (2000).

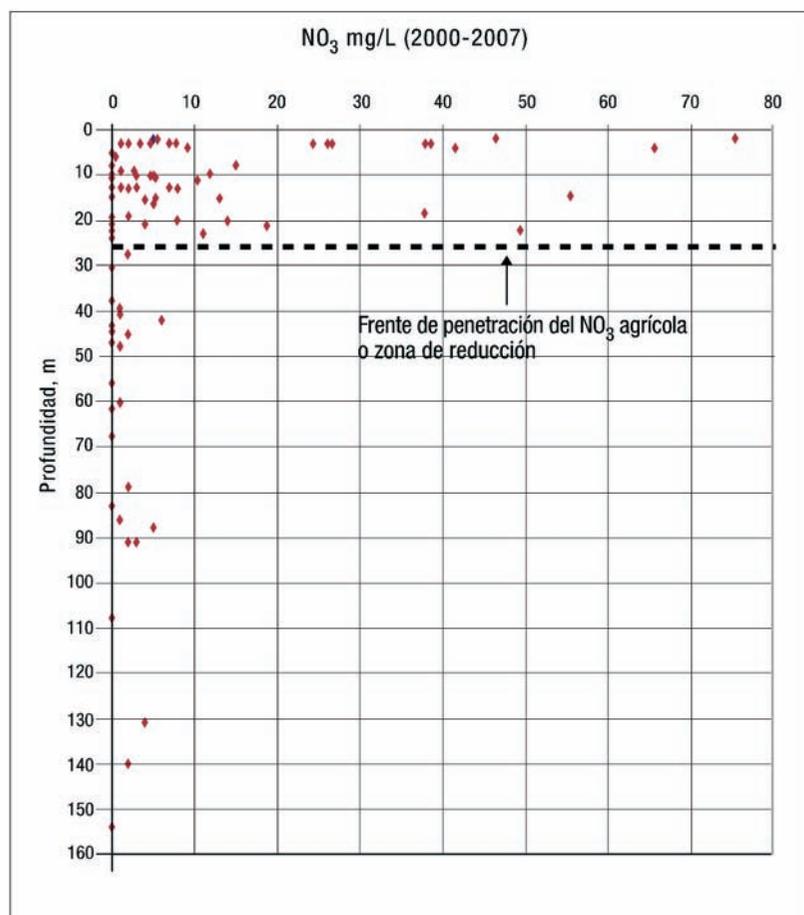


secano (aunque hay riego de apoyo y locales) del norte, y en los regadíos con aguas subterráneas locales. Esta contaminación es la menos conocida en sus detalles. El agua aplicada al terreno, a la que se suman nutrientes (abonos) y otros productos

agroquímicos (correctores del suelo, plaguicidas, herbicidas, vermícidias, ...), es concentrada por evapotranspiración (evapoconcentración). El agua resultante se recarga al acuífero subyacente. Cabe esperar que se trate de aguas con una salinidad

hasta un orden de magnitud mayor que las naturales y con un contenido relevante en nitratos y en otros agroquímicos. En unos lugares ya ha afectado a todo el espesor del acuífero y a los propios pozos (que incluyen algunos para abastecimiento), y se produce una extensión territorial según las líneas de corriente, aunque no está claro si actualmente han llegado ya a aflorar en arroyos locales, puesto que los niveles se mantienen artificialmente profundos. En otros lugares las aguas contaminadas están aún descendiendo por las arenas finas hacia los niveles más gruesos y permeables profundos, como sucede en el sector de acuífero bajo el manto eólico, donde es posible identificar que en 2007 el frente de avance de las aguas con impacto agrícola estaba a unos 25–30 m de profundidad (Figura 8.6). Donde las aguas contaminadas no alcanzan aún la rejilla de los pozos profundos, lo harán en algunos años, de forma paulatinamente creciente.

La descarga en los ecotonos de las aguas subterráneas afectadas se producirá con bastante retraso, pero cuando llegue puede suponer un cambio ecológico importante por el cambio de composición química y sobre todo por el aporte de nitratos. Se sabe aún muy poco sobre el posible transporte de los fosfatos y del ión potasio. Pero en esas zonas, la existencia de capas de menor permeabilidad bajo el manto eólico hace que en determinadas áreas de cultivo se produzca una descarga superficial natural o artificial de parte de los excedentes de agua de riego en arroyos locales, los cuales van a parar a La Rocina y al ecotono de La Vera, los cuales en parte se pueden infiltrar en el terreno aguas abajo. Esto es aún mal conocido y es objeto de uno de los estudios del Proyecto Doñana 2005. El Arroyo de



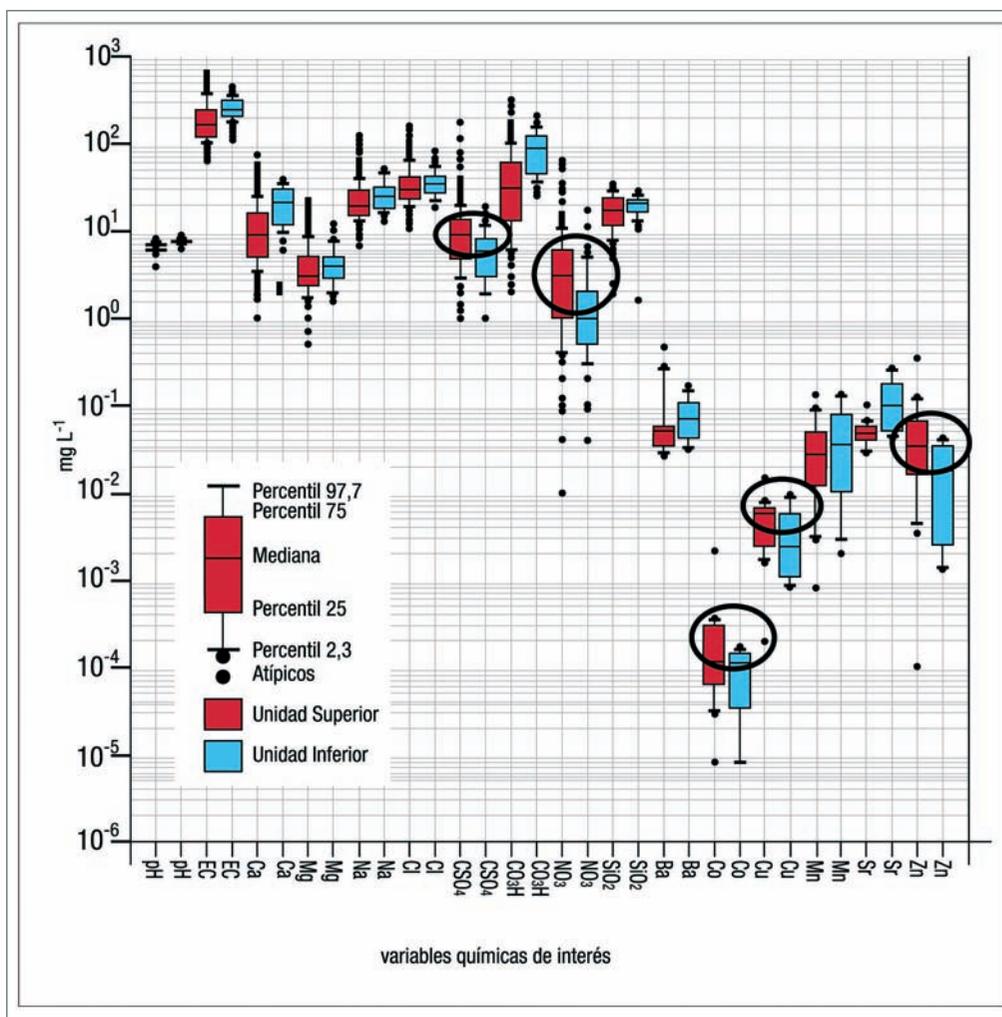
La Rocina parece estar ya recibiendo parte de esas descargas, tanto de forma difusa como concentrada, como indican las concentraciones de NO_3 medidas en las surgencias junto al arroyo a la altura del Palacio del Acebrón (15 a 20 mg/L) y en manantiales localizados en el talud de la margen sur, poco antes de la Casa del Sacristán (15 a 35 mg/L). En un sector de La Vera se encuentra agua freática con varias decenas de mg/L de NO_3 . Alrededor del Soto Grande se han medido concentraciones de nitrato entre 30 y 50 mg/L, hasta 70 mg/L. Puede que la degradación

Figura 8.6.

Concentraciones de nitrato (NO_3) medidas entre los años 2000 y 2007 en sondeos puntuales (de rejilla corta) ubicados en el acuífero libre bajo el manto eólico litoral, en la Finca El Tejar, a corta distancia al sur del arroyo de La Rocina. Se observa el frente de avance del agua con impacto agrícola hacia los 25–30 m de profundidad aunque también podría tratarse de una zona reductora (tema en estudio). Datos inéditos de los autores.

Figura 8.7.

Comparación de la composición química del agua subterránea en la Unidad Superior y en la Unidad Inferior del acuífero bajo el manto eólico. No existe una fuente litológica que justifique las mayores concentraciones estadísticas de SO_4 , NO_3 , Zn, Co, Cu, B y otros metales en la Unidad Superior, por lo que éstas se atribuyen a fuentes antrópicas tales como la agricultura y el aporte aéreo de partículas desde el polígono industrial de Huelva. Modificado de Manzano et al. (2005) y Custodio y Manzano (2007).



del suelo edáfico y de fondo de lagunas desecadas produzca un aporte no despreciable de sustancias minerales, así como los residuos del ganado introducido que pastorea en esa zona desde hace muchas décadas. Los arroyos que recogen drenajes agrícolas llevan nitratos al salir el agua de las balsas nuevas de Mimbrales, donde se han medido preliminarmente 10–20 mg/L , aunque en el cruce con la Vía Pecuaria ya han disminuido significativamente, y en la desembocadura

de Soto Grande no se han encontrado nitratos. La explicación es aún poco clara, pero seguramente combina dilución por descargas locales del acuífero freático con la toma selectiva por la vegetación y con el efecto de medios reductores locales allí donde abunda la materia orgánica.

En el sector de acuífero libre al oeste de la marisma se han encontrado, además de un exceso de sulfato, algunos otros metales de origen no litológico, que actualmente penetran en el

acuifero hasta alrededor de 30–35 m (Manzano et., 2005). El Zn, Cd, Cu y algunos otros pueden proceder de los agroquímicos usados en los cultivos o bien de aportes atmosféricos desde zonas externas a Doñana, pues todos ellos están presentes en las emisiones de las industrias de Huelva (*Figura 8.7*). En cualquier caso indican un aporte atmosférico de solutos al medio hídrico, de procedencia externa a la zona. Hasta el momento no se ha constatado que esos aportes supongan un deterioro significativo de la calidad del agua, pero podría ocurrir en el futuro.

La notable contaminación atmosférica que se genera en el polígono industrial de Huelva entrega a la atmósfera continuadas emisiones de SO₂, que se oxidan a SO₄²⁻ y afectan a la composición de la precipitación mas allá de lo que es esperable naturalmente (Alcalá y Custodio, 2005, Higuera et al., 2008). Su efecto ya penetra en el terreno acuifero hasta cierta profundidad.

Los descensos piezométricos a lo largo de los ecotonos a causa de las extracciones, en especial en El Rocío y en el ecotono Norte, no sólo han mermado o anulado las descargas de agua dulce subterránea que allí existían, sino que han cambiado las condiciones de equilibrio con el agua salina de los acuíferos bajo la Marisma. En consecuencia parece haberse producido una progresión del agua salina, que ahora impregna terrenos que antes contenían agua dulce y que ha ocasionado un aumento de la salinidad de algunos pozos. Esto se identifica por el cambio iónico correspondiente. No hay seguimiento del proceso. A pesar de que hay un buen número de análisis químicos desde 1970 (muchos más antes que ahora), su interpretación es difícil por tratarse de mezclas de agua de distintos niveles en pozos de

varias rejillas, sin que exista una serie temporal suficientemente larga.

En la cuenca de La Rocina los vertidos poblacionales afectan poco a la calidad de las aguas subterráneas, ya que son pequeños. Pero se desconoce lo que sucede en la cuenca del arroyo del Partido y los otros cauces hasta el río Guadiamar. Tampoco se conoce bien como el propio Guadiamar puede afectar al acuifero cuando su aluvial toma contacto con los mismos, que es donde está la gran depresión local de niveles freáticos por los bombeos, lo que favorece la infiltración. Este hecho se estudió con cierto detalle con ocasión del vertido de lodos pirríticos y aguas ácidas al río Guadiamar tras la rotura de la gran balsa de acumulación de estériles de la mina Aznalcóllar (Ayora et al., 2001), pero no ha habido ningún estudio hidrogeoquímico específico ni tampoco seguimiento de esa posible influencia. Además de los núcleos de población, existen urbanizaciones, a veces fuera de la ordenación urbana, principalmente en El Aljarafe, que producen vertidos

Casa de bombas para transferir agua desde el encauzamiento de Entremuros al antiguo cauce del Guadiamar a través de la marisma. Ha funcionado en raras ocasiones. Foto: EC. (1999).





Compuertas de Brenes en la Montaña del Río, que separa la marisma del estuario del Guadalquivir en su tramo bajo.
Foto: EC. (1999).

a pozos negros, fosas sépticas y a algunos cauces superficiales.

La eliminación de alpechines y otros residuos orgánicos de la industria de transformados agrícolas se hace en parte por infiltración al terreno en campos próximos, en las impropriadamente llamadas balsas de evaporación, ya que con frecuencia se infiltra más que se evapora si no están adecuadamente diseñadas. No se dispone de estudios al respecto. Esto sucede principalmente fuera del Área de Doñana, pero puede afectar a través de los aportes de las cuencas vertientes.

Los humedales _____

Los humedales situados cerca de las zonas de descarga regional del acuífero (alrededor de la marisma, tanto al norte como al oeste) son vulnerables al efecto sobre los niveles freáticos y piezométricos producidos por las extracciones de agua subterránea intensivas y concentradas en esas zonas, pero

no son los únicos. Los humedales del sector El Alamillo–El Acebuche–El Abalarío–La Mediana también han resultado afectados por el descenso freático resultante de combinar los bombeos agrícolas junto a La Rocina con el incremento de la evapotranspiración freática tras la introducción de eucaliptus en la zona hace algunas décadas. La vegetación freatofítica de Los Cotos, Los Sotos, La Vera y el contorno Norte de la marisma también tiene dificultades para alimentarse del nivel freático, que ahora es más profundo. Se han secado muchos árboles singulares que sin ser propiamente freatofitas se aprovechan de esa humedad del terreno. Como consecuencia de ello, muchos pequeños humedales situados cerca de las áreas cultivadas, que hace 20–30 años eran permanentes, hoy son estacionales o incluso esporádicos, inundándose sólo en años muy húmedos.

El descenso freático localizado en los bordes de la marisma supone la disminución de la descarga de agua a los múltiples arroyos y caños, cuyos aportes, ya sea directos o a través de La Rocina, son relevantes para la marisma en época seca (*Figura 8.8*). Muchos de los cursos de agua que antes eran permanentes ahora son estacionales y, además, llevan agua procedente de los excedentes de riego, lo que significa que introducen contaminantes tales como nutrientes, materia orgánica y plaguicidas, en zonas de alto valor ecológico. Adicionalmente, cambia la distribución de la duración de épocas secas y épocas húmedas (hidroperiodo), lo cual es muy relevante en cuanto a la accesibilidad de la vegetación al agua freática (Custodio, 2000; Trick, 1998; Trick y Custodio, 2004; Lozano, 2004).

También los descensos piezométricos producidos por las extracciones están afectando a las

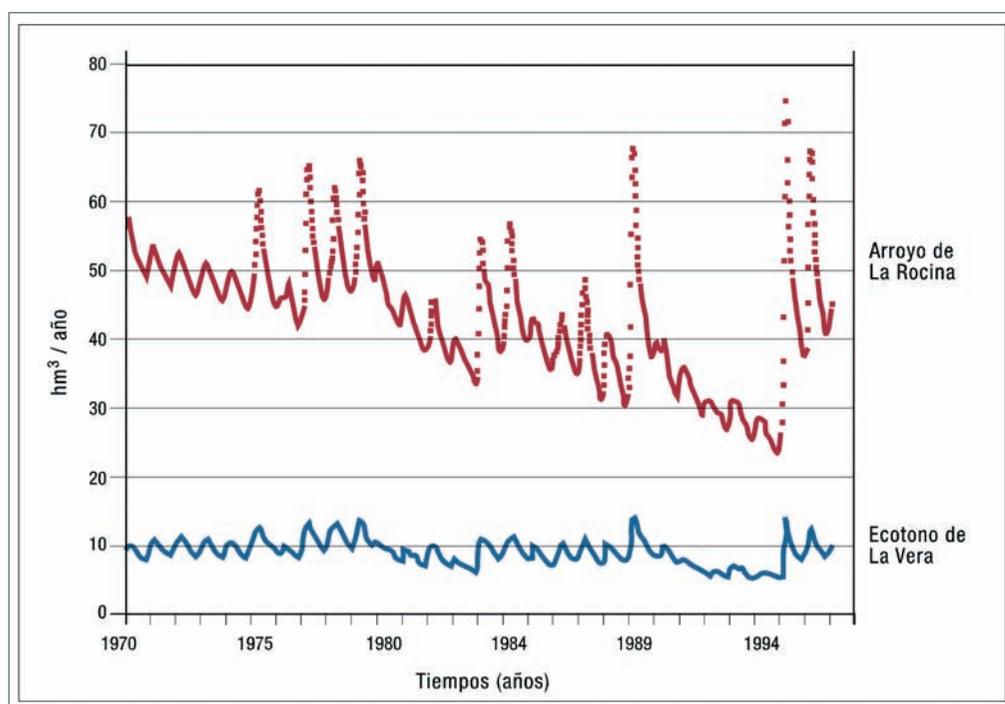


Figura 8.8.

Evolución de las descargas de agua subterránea entre 1970 y 1999 calculadas mediante modelación numérica del flujo de agua subterránea. El modelo está calibrado con datos de extracciones y de evolución piezométrica. Se observa el descenso acumulado interanual debido a las extracciones de agua subterránea, muy acusado en el arroyo de La Rocina y más suave, pero también importante, en el ecotono de La Vera. De UPC. (1999).

áreas lagunares, tanto en el lado oeste (extracciones para Mazagón y los campos de cultivo de Moguer) como en el complejo lagunar del entorno de Santa Olalla (extracciones para Matalascañas). Este descenso piezométrico tiene como consecuencia un cambio en la frecuencia de encharcamientos–deseccaciones, en la extensión del área que habitualmente está inundada, y en el comportamiento del vaso lagunar. En muchos casos dicho vaso lagunar ha pasado de ser un lugar de descarga permanente o temporal a ser un lugar de posible infiltración de las aguas pluviales recogidas directamente o procedentes del entorno. Ello supone un proceso progresivo de oxidación de los sedimentos depositados en el fondo de laguna, lo que conlleva la generación de sulfatos a partir de los sulfuros atrapados en los sedimentos lagunares durante las etapas de

frecuente inundación (Manzano et al., 2007; Coletto, 2003).

Balance hídrico modificado _____

La Figura 8.9 es una estimación de la evolución de las extracciones. Para el balance medio en condiciones de explotación similares a las actuales hay que hacer un reparto de las extracciones y de los posibles retornos de agua a las diferentes áreas consideradas. Ver Tabla 8.2. Se considera unas extracciones para regadío de 85 a 108 hm³/a, unos 7 hm³/a para abastecimiento y unos 3 hm³/a para usos ecológicos, pudiendo ser esas dos últimas cifras por exceso en las condiciones actuales estrictas, aunque son similares a las de 1991. Teniendo en cuenta los retornos de

riego se estima una extracción neta de 81 a 98 hm³/a. Es de notar que las extracciones agrícolas son superiores a las que se indicaban en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992), pero todo apunta a indicar que es lo que ha sucedido en la realidad, en especial recientemente, a pesar de los esfuerzos de contención y eliminación de situaciones legales e ilegales. Algunas estimaciones de organismos oficiales pueden incluso ser superiores a lo indicado. Una parte de lo que en CIED (1992) se atribuyó al área de Moguer ahora se atribuye a la cabecera de La Rocina. *Ver otros detalles en el Capítulo 6.*

Trabajando de forma similar a lo expuesto en el *Capítulo 7*, se puede preparar la *Tabla 8.3*. En

ella se supone la misma recarga media que en estado natural, lo que en principio es aceptable ya que se considera de forma separada la evapotranspiración freática y el bombeo actual asignado en la *Tabla 8.2*.

En estos balances no se ha considerado en detalle el área de Palos–Moguer, que ya recibe aguas para riego procedentes del transvase desde el territorio al oeste (*ver Capítulo 6*), con lo que el uso de agua subterránea puede que ahora sea menor y los retornos de excedentes de riego mayores que lo considerado. Pero el efecto en el conjunto es pequeño y en todo caso apuntaría a una situación en cabecera de La Rocina algo menos estresada. La futura aportación probable que se considera es de hasta 10 hm³/año.

Tabla 8.2. Asignación de las extracciones para regadío, abastecimiento y ecológicas, y de sus retornos al acuífero, según las distintas áreas. Se trata de cifras aproximadas, que en algunas áreas pueden ser muy inciertas y variar notablemente según la fuente de procedencia de los datos.

Área	Asignación de las extracciones, hm ³ /año					Total
	Regadío (+)	Retornos (-)	Abastecimiento (+)	Ecológicas (+)	Vertidos (-)	
1 Norte	6–10	1–1	—	—	—	5–9
2 Sur Villamanrique	21–23	2–3	1	—	—	20–21
3 Resto Marismas	0–1	—	—	1	—	1–2
4 Ayo. de La Rocina	9–10	1–2	—	—	—	8–8
5 Sur de La Rocina	27–35	3–4	—	—	—	24–31
6 Norte de La Rocina	1–2	—	1	—	—	2–3
7 Norte de El Rocío	6–8	1–1	—	—	—	5–7
8 Ecotono Norte	—	1–2	—	—	—	–(1–2)
9 Cabecera N. de La Rocina(*)	5–6	—	—	—	—	5–6
10 Cabecera S. de La Rocina (*)	6–8	—	—	—	—	6–8
11 La Vera–La Retuerta	—	1–2	—	1	—	–(0–1)
12 Lagunas del PND	—	—	—	1	1	0–0
13 El Abalarío	—	—	—	—	—	—
14 Zona Costera	—	—	4	—	1	3–3
15 Moguer	4–5	2–3	1	—	—	3–3
	85–108	12–18	7	3	2	81–98

Nota: los retornos de vertidos que pasan al acuífero se establecen según los usos del agua y el lugar de vertido (interior, cauce, mar). (*) En conjunto hasta 10 hm³/a importados.

Tabla 8.3. Balance hídrico medio estacionario del acuífero, por áreas, en la situación actual (2005) de extracciones y recargas. Se trata de cifras aproximadas, a veces con notable incertidumbre.

Área	hm ³ /año							
	Recarga	B	EF	RO	Arroyos	ECN	ECO	Mar
1 Norte	18–27	5–9	1–2	—	12–14	—	—	—
2 Sur Villamanrique	10–14	20–21	—	—	—	–(10–9)	—	—
3 Resto Marismas	0–1	1–2	0–1	—	—	–(1–2)	—	—
4 Ayo. de La Rocina	4–6	8–8	0–1	–(4–3)	—	—	—	—
5 Sur de La Rocina	10–13	24–31(*)	0–1	–(15–21)	—	—	—	—
6 Norte de La Rocina	6–10	2–3	—	4–7	—	—	—	—
7 Norte de El Rocío	5–6	5–7	—	—	0–(–1)	—	—	—
8 Ecotono Norte	7–8	–1(1–2)	—	—	—	8–10	—	—
9 Cabecera N. de La Rocina	4–6	5–6	–(0–1)	–0	—	—	—	—
10 Cabecera S. de La Rocina	9–11	6–8	0–0	3–3	—	—	—	—
11 La Vera–La Retuerta	9–11	–(0–1)	1–2	—	—	—	6–8	2–2
12 Lagunas del PND	14–19	0–0	1–2	—	—	—	10–12	3–4
13 El Abalarío	23–30	—	2–3	7–11	—	—	—	14–16
14 Zona Costera	19–24	3–3	—	—	—	—	—	16–21
15 Moguer	20–24	3–3	2–2	—	12–14	—	—	3–5
	158–210	81–98	7–13	–(5–3)	24–37	–(3–3)	16–20	38–48

B = extracción neta. **EF** = evapotranspiración freática. **RO** = descarga al arroyo de La Rocina. **Arroyos** = descarga a otros arroyos del norte (del Partido, Cigüeña, ...) y del oeste en el entorno de Moguer. **ECN** = descarga difusa y semidifusa al ecotono norte y borde de marisma. **ECO** = descarga difusa y semidifusa al ecotono oeste (La Vera y La Retuerta). **Mar** = salidas difusas y por manantiales a la costa. (*) Si se considera que se importan 10hm³/a, resulta que B es 14–21 y Ro –(5–11).

En la *Tabla 8.4* se resumen los resultados para la situación actual de extracciones y con las plantaciones de eucaliptos erradicadas de las áreas protegidas. Las cifras presentan posibles errores notables a causa de los descensos freáticos y la transferencia de agua subterránea o por superficie de unas áreas a otras. Sin embargo, llama la atención la gran merma de caudales de La Rocina y el posible drenaje de otros arroyos del norte y del oeste, aunque no es posible contrastarlo por la falta de aforos suficientes y de observaciones regulares de campo. En la *Figura 8.10* se representan esquemáticamente los resultados.

Los balances planteados son valores medios, sin tener en cuenta ni los cambios estacionales ni los interanuales, ni las variaciones en la reserva de agua subterránea. Por lo tanto se trata de una grosera aproximación, pero no es peor que algunos de los supuestos utilizados en cuanto a extracciones y recargas.

Es muy recomendable para una correcta gestión hacer los balances hídricos con detalle a partir de la modelación numérica, actualizando los modelos cada 2 a 3 años. Esto exige una mejora substancial en las redes de observación de cantidad: niveles, caudales superficiales, extracciones,

Tabla 8.4. Resultados del balance hídrico medio estacionario de los acuíferos de la Comarca de Doñana en estado actual de bombeo y con eucaliptos erradicados.

Se trata de cifras aproximadas, a veces con notable incertidumbre. Se compara con lo que se indicaba en CIED (1992).

Concepto	actual	CIED, 1992	Comentarios
Recarga	158–210	155–425	Estimación mejorada
Extracciones	85–98	73–82	Incremento
Evapotranspiración freática	7–13	—	Unir a ecotono norte
Descarga a la cabecera de La Rocina	-5 a -3 (5 a 7)	5–10	Mermada (con importación)
Descarga a arroyos	24–37	2–8	En parte es a La Rocina; la mitad es en el lado oeste. Muy incierto
Descarga al ecotono norte y marisma	-3 a -3	5–20	Similar, con evapotranspiración freática
Descarga al ecotono oeste	16–20	10–15	Similar
Descarga al mar	38–48	10–25	Incremento

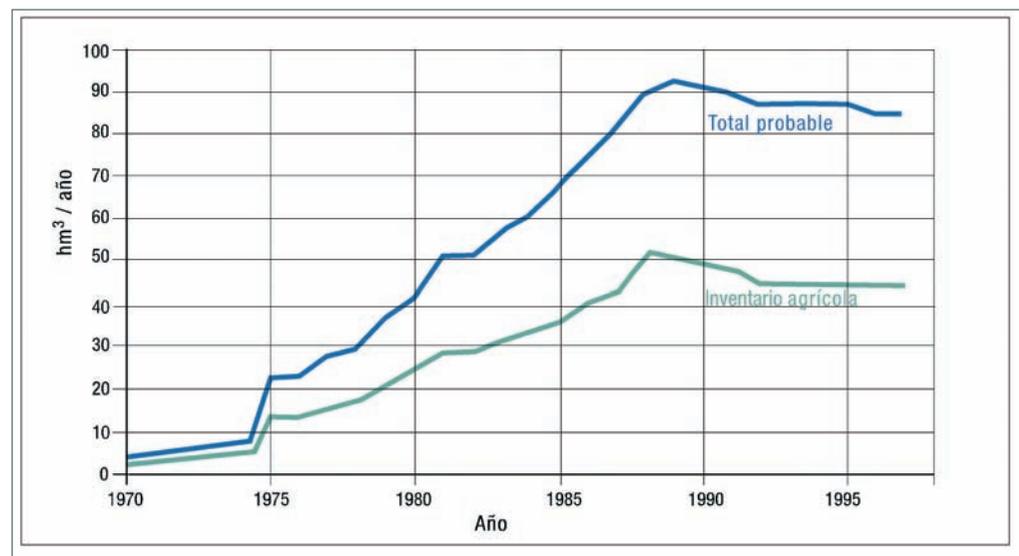
aplicaciones. La red de observación y obtención de datos es actualmente insuficiente para establecer el balance hídrico y para la calibración de modelos. En cualquier caso existe incertidumbre, lo cual es un hecho inherente a la naturaleza de los acuíferos y en general a la hidrología. Aunque no es posible suprimir la incertidumbre, sí se puede ir reduciendo mediante la modelación numérica periódica a partir de un conjunto suficientemente

completo de observaciones creciente con el tiempo y que sean lo más precisas posible.

La modelación realizada por Lozano (2004) en el área de Los Cotos muestra que para ese sector entre El Abalarío y el ecotono de La Vera, y entre El Rocío y el mar, la supresión de la recarga conduciría a un agotamiento exponencial de los niveles del acuífero, con un tiempo de semievolución (tiempo en reducirse los niveles freáticos

Figura 8.9.

Estimación de las extracciones de agua subterránea en el acuífero de Doñana según las informaciones agrícolas disponibles y su ampliación para incluir otros bombeos, según el modelo de simulación numérica de la UPC y otras fuentes. La incertidumbre en los valores anuales puede ser del 15 al 30%. Modificado de UPC (1999) y Corominas (1999). No se ha dispuesto de datos contrastados más recientes.



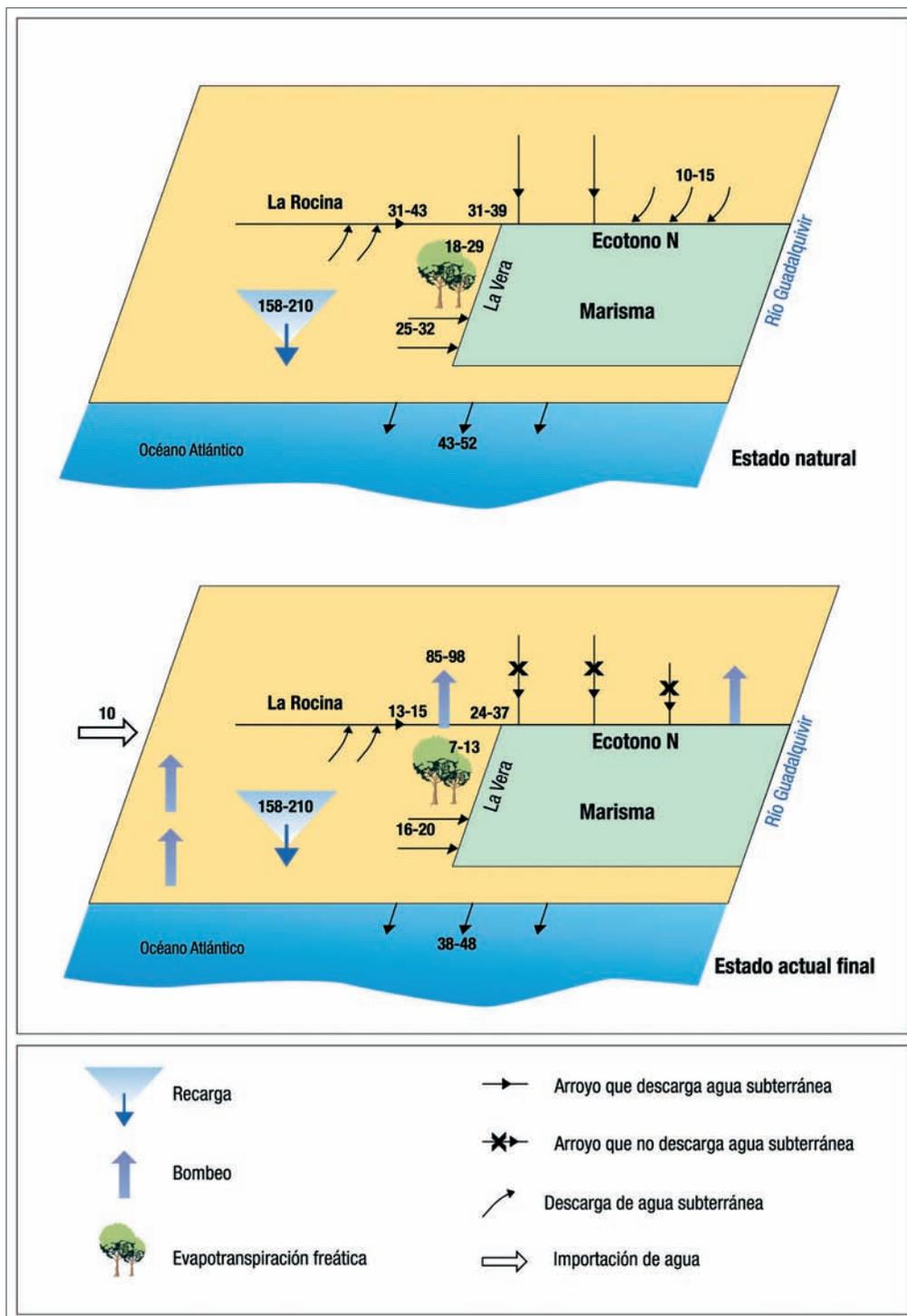


Figura 8.10.

Resultados sintéticos estimativos de los balances hídricos medios del sistema acuífero de Doñana, en $\text{hm}^3/\text{año}$, en estado natural (figura superior) y con el actual estado de extracciones (figura inferior) cuando se alcance el nuevo estado de equilibrio. En el año 2009 aún se está en evolución transitoria, en que se toma agua del almacenamiento subterráneo para mantener parte de las descargas. Se supone una importación de agua al sector oeste, que podría llegar hasta $10 \text{ hm}^3/\text{año}$ desde áreas externas.

Drenaje de campos de cultivo en arenas, en el lado sur del arroyo de La Rocina. El objetivo del drenaje es favorecer que no ascienda el nivel freático hasta la zona de raíces en un área con una capa de baja permeabilidad a poca profundidad.

Foto: MM.

a la mitad, tomando como referencia altitudinal el mar) entre 30 y 40 años. Eso quiere decir que existe una notable memoria interanual.

El alto valor del tiempo de semievolución hace que los cambios temporales sean lentos. En realidad las perturbaciones introducidas en el funcionamiento del acuífero lo han sido hace un tiempo igual o menor que dicho tiempo, con lo que aún se está lejos de una estabilización. Por eso el balance presentado para el gran acuífero

en explotación, que son valores medios, no se corresponde bien con la realidad observada, ya que las descargas a La Rocina y al ecotono de La Vera y también los niveles piezométricos en el entorno de las lagunas de Los Cotos son aún altos respecto a los valores finales. Eso quiere decir que, aún manteniendo la situación actual de explotación, se irá produciendo un progresivo impacto hídrico creciente en las áreas protegidas. El deterioro sólo puede detenerse con una reducción significativa de las extracciones.

Cuando se analiza el balance de las aguas subterráneas, una primera gran incertidumbre es la propia extracción real, ya que no hay un control efectivo. Además, una buena parte de las captaciones son y funcionan al margen de la normativa existente. Esto, junto a un conocimiento aún muy rudimentario o inexistente en muchas áreas de las descargas naturales en caños, arroyos y drenes, hace que las cifras de la situación en un año determinado sean en exceso inciertas y que no haya sistemáticamente datos para analizar las evoluciones con un modelo numérico que se pueda operar y recalibrar periódicamente.

La lenta evolución del sistema acuífero ante los cambios que se han impuesto, principalmente las extracciones agrícolas, supone que se está en una evolución transitoria hacia una menor descarga a La Rocina y al ecotono de La Vera, con un descenso de niveles en el área de lagunas, aún si no se modifican las extracciones actuales. La corrección de la evolución, y por supuesto la inversión de tendencias, requiere una disminución de las extracciones, cuyo valor debería modelarse numéricamente, una vez que se hayan fijado los compromisos a respetar y los objetivos sociales y ecológicos a cubrir.



Calidad del agua subterránea en el contexto de la Directiva Marco del Agua

En el *Capítulo 7* se comenta la calidad natural del agua subterránea del Área de Doñana. Las múltiples actividades en el Área de Doñana tienen el impacto ya descrito anteriormente en este capítulo, y que se sintetiza en el *Capítulo 9*. La polución del agua subterránea de origen antrópico se sobrepone al fondo natural, tanto espacial como temporalmente, y puede reconocerse mediante ciertos trazadores o indicadores químicos e isotópicos. Para adoptar las medidas de actuación convenientes es necesario identificar tanto las fuentes como los contaminantes potenciales, tanto dentro de la zona (agricultura, industria, vías de comunicación, núcleos urbanos, etc.) como fuera de ella, pues algunos contaminantes

pueden ser de origen foráneo y ser aportados por la circulación atmosférica a la zona de recarga del acuífero, o entrar como aguas fluviales.

Durante los últimos treinta y cinco años se han realizado varios estudios sobre la calidad del agua subterránea a escala regional, y bastantes más a escala local. Los estudios regionales han descrito las características químicas del agua y sus variaciones espaciales y temporales, relacionándolas con los posibles usos del agua (calidad) y con los focos de contaminación inventariados. Los estudios a escala local han tenido siempre objetivos particulares relacionados con situaciones (existentes o probables) de contaminación agrícola o de posible intrusión marina. Recientemente la CHGQ ha realizado una caracterización del estado de la calidad de los cuerpos (masas) de agua subterránea y una identificación de presiones e impactos en su ámbito es-



Laguna de Río Oro, en el entorno de El Abalario, en 1998. Se trata de una laguna de alimentación superficial e hipodérmica. En primer término se ve el armario de protección de un sensor de nivel piezométrico, que estuvo instalado en un piezómetro durante tres años para estudiar la relación de la laguna con el acuífero. Foto: MM.



Muestreo en un antiguo pozo en la marisma—La Vera, donde la surgencia de agua inicial que disminuyendo hasta quedar reducida a un pequeño caudal que mantenía a duras penas el abrevadero de ganado. Foto: MM (2001).

pacial de actuación. Aunque este tipo de estudios es útil para caracterizar el estado general o a gran escala del acuífero, el grado de resolución (espacial y temporal) de los mismos suele ser demasiado grosero como para detectar cambios no deseados en la cantidad y/o la calidad del agua subterránea. Lo antes expuesto respecto a los tiempos de respuesta del acuífero indica que para detectar esos cambios, como respuesta a perturbaciones del funciona-

miento natural, es necesario disponer de observaciones periódicas procedentes de redes de control y programas de medida muy sistematizados, con suficiente resolución espacial, y con un largo periodo de observaciones. Este último aspecto es fundamental cuando se trata de aguas subterráneas ya que la tridimensionalidad del flujo del agua en el terreno requiere mediciones puntuales distribuidas por el territorio y en profundidad, además de a lo largo del tiempo. Pero el caso más frecuente es que los estudios de la administración se basen en puntos de observación no puntuales, sino que integran distintas líneas de flujo, con distintos niveles piezométricos y con distintos tiempos de permanencia en el terreno y distinta mineralización. El tema de las redes de observación se trata con más detalle en el *Capítulo 4*.

La importación de aguas puede solucionar hidráulicamente alguno de los problemas de exceso de bombeo y contaminación, pero puede introducir cambios químicos —y a su través cambios biológicos— indeseables, que en todo caso deben ser analizados previamente con detalle y dentro de un programa de actuaciones bien definido en cuanto a los excedentes que se produzcan.

Capítulo IX



Laguna interdunar en el área sur de El Abalarío, con el vaso de la laguna seco e invadida de vegetación. Los pinos marcan el perímetro lagunar.

Foto: CMA. JA.

Impacto de las extracciones de agua subterránea en el funcionamiento hidrológico de los humedales del Área de Doñana

De lo expuesto en los *Capítulos 7 y 8* se deducen los principales impactos ecológicos y sociales de las extracciones de agua subterránea, ya que las tomas de agua superficial dentro del Área de Doñana tienen escasa relevancia. Una cuestión distinta es la del manejo del agua en la marisma, que aquí no se trata. En este Capítulo se reúnen aspectos ya contenidos en capítulos anteriores, a los que hay que referirse para mayores detalles. Se trata sólo de una síntesis.

La introducción de extensas áreas forestales de eucaliptus fue un primer impacto importante, que comenzó a gran escala en las décadas entre 1940 y 1960, como se comenta en el *Capítulo 6*. Algunas especies de eucaliptus introducidas, que se comportan como freatofitas, son capaces de extender sus raíces profundamente en busca de la franja capilar y del nivel freático, y lo hacen más rápida y eficazmente que la vegetación autóctona. Es el caso del área El Abalarío–La Mediana–La

Rocina, donde buena parte de las antiguas descargas de agua freática al conjunto de lagunas de Ribatehilos, La Mediana y otras desaparecieron casi por completo a causa de la introducción de dichos eucaliptus. La erradicación casi total de estos árboles en los parques entre 1995 y 2000, dentro de las actuaciones de conservación del Parque Natural y del Parque Nacional de Doñana, favorece que se evolucione hacia la recuperación de parte del funcionamiento hídrico original de esas lagunas. Pero esta recuperación está condicionada por la escasa cobertura vegetal en tanto no se haya restablecido la vegetación natural. En ese caso se evolucionará hacia una posición intermedia entre la observada con plantaciones arbóreas y la actual, si no aumentan las extracciones de agua subterránea. Véanse algunas consecuencias en la *Figura 9.1*.

La intensa extracción de aguas subterráneas para regadío, unida al hecho de que se realiza de

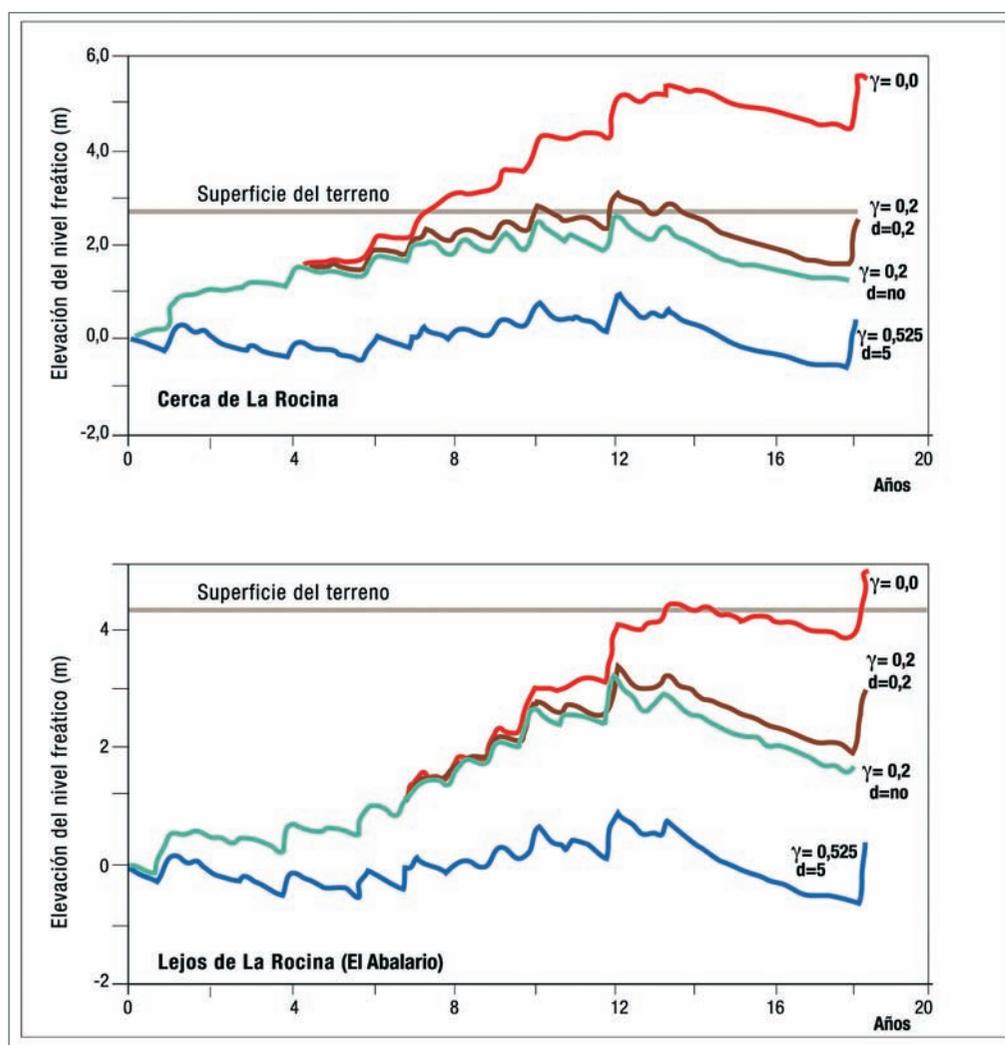


Figura 9.1.

Simulación del efecto sobre la posición del nivel freático de distintas alternativas de gestión de la vegetación en el área de El Abalarío, sin modificar la explotación actual del acuífero, según Trick (1998) y Custodio (2000). φ (en m/año) es la evaporación freática máxima y d (en m) es la profundidad máxima a la que se produce evapotranspiración freática. $\varphi = 0,525$ m/año y $d = 5$ m son los valores ajustados por modelación para eucaliptos; $\varphi = 0,2$ m/año y $d = 2$ m son los valores que se supone que representan la sustitución de los eucaliptos por la vegetación nativa original; $\varphi = 0,2$ m/año y $d = \text{"no"}$ son los valores para la sustitución de los eucaliptos por la vegetación original dejando que ésta se adapte a cualquier profundidad del nivel freático; $\varphi = 0,0$ m/año es el valor representativo de eliminar los eucaliptos sin sustituirlos por nueva vegetación. La figura sugiere que eliminar los eucaliptos sin reforestar la zona llevaría a un ascenso del nivel freático por encima de la superficie del terreno en unos 15 años. La sustitución de los eucaliptos por vegetación nativa que sólo alcance el nivel freático cuando éste está a menos de 2 m de profundidad produciría una elevación del nivel freático de unos 3 m. Si la nueva vegetación tuviera siempre acceso al nivel freático, independientemente de su profundidad, éste ascendería medio metro menos que en el caso anterior. Yendo hacia atrás en tiempo, se deduce que el impacto de la introducción de los eucaliptos sobre el descenso del nivel freático se estima que ha sido de decimétrico a métrico.

forma concentrada en determinados lugares (Los Hatos–Guadamar, entorno de El Rocío y límite oeste del Parque Nacional, Matalascañas, cabecera de La Rocina, entorno de Mazagón), ha producido tres impactos principales:

1) Descenso local de los niveles freáticos, de decimétrico a métrico, a veces de varios metros, y descenso de los niveles piezométricos profundos, de métrico a decamétrico, que en

el área de Los Hatos y Partido Resina han llegado a superar los 15 m. Según datos de la CHGQ, entre 1999 y 2000 el 85% de los puntos de observación mostraban descenso del nivel piezométrico.

2) Disminución de la descarga natural y su sustitución parcial por descargas artificiales a través de pozos (Suso y Llamas, 1990 y 1993; Llamas, 1990; Custodio y Palancar,

1995; Trick, 1998; Manzano et al., 2002; Trick y Custodio, 2004).

3) Localmente, inversión del gradiente hidráulico y del sentido de los flujos del agua subterránea, lo cual ha ido induciendo un lento desplazamiento de las aguas salinas confinadas bajo la marisma hacia algunas captaciones agrícolas en el sector NE de la misma, las cuales se están salinizando. El proceso es aún pobremente conocido por ser muy escasa la red de observación de que se dispone en las áreas presuntamente afectadas.

Desde el punto de vista del impacto de la explotación intensiva y localizada de agua subterránea sobre los ecosistemas, ésta ha tenido distinta incidencia. Localmente (entorno de El Rocío, La Rocina y en especial su cabecera, Villamanrique de la Condesa, Palos, Moguer,..) ha ocasionado modificaciones muy relevantes, especialmente en la composición, estructura y dinámica de la vegetación asociada con los humedales (cripto-

Laguna de Moguer en primavera de 1996 llena de agua pluvial. El acuífero freático que antes alimentaba la laguna, ahora está deprimido por las extracciones de agua subterránea del área de Mazagón-Moguer.
Foto: EC.



medales y formaciones palustres) de los mantos eólicos (Manzano et al., 2002b). Algunos de los cambios más evidentes son:

1) Reducción del agua disponible para las freatofitas naturales y para los caños de agua dulce que sustentan buena parte de las comunidades más higrófilas en verano. Los caños que desembocan en La Vera y las cañadas que desembocan en La Rocina tienen su origen y reciben descargas de los acuíferos freáticos. Un descenso decimétrico de la cota máxima anual de la superficie freática es suficiente para eliminar manifestaciones hídricas en superficie y para alejar el agua capilar del alcance de las raíces de la vegetación, como ya ha sucedido en la práctica totalidad del ecotono norte.

2) Modificación del hidropериодо (patrón temporal de inundación) de muchos pequeños humedales del manto eólico ubicados en áreas afectadas por descensos acumulados del nivel freático, los cuales se han transformado de permanentes en temporales, y de estacionales en interanuales (*Figura 9.2*). El sistema de lagunas peridunares que va desde Charco del Toro y El Brezo a Hermanillos está afectado en cierto grado por las extracciones de agua subterránea para el abastecimiento a Matalascañas, con algunas de las antiguas lagunas hoy casi desecadas.

El impacto de la explotación intensiva de las aguas subterráneas sobre la estructura y dinámica de la vegetación de los humedales de los mantos eólicos ha sido estudiado por Serrano y Serrano (1996) y Muñoz-Reinoso (2001), y comentado por Manzano et al. (2009); Manzano y Custodio (2008) y Cus-

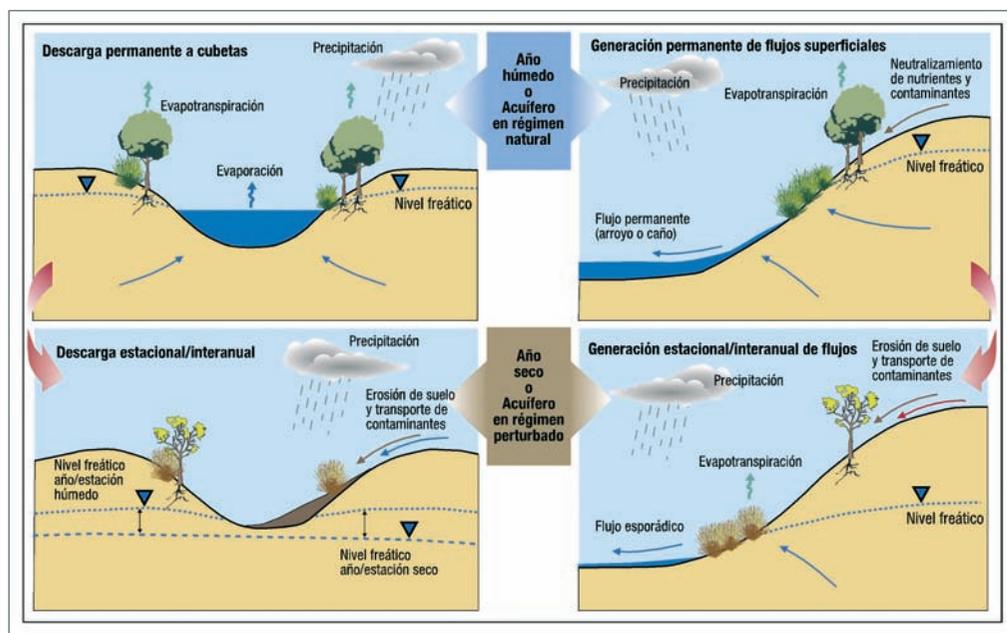


Figura 9.2.

Tipos de humedales dependientes del agua subterránea más frecuentes en Doñana. Derecha: lagunas generadas por la intersección del nivel freático con pequeñas cubetas o depresiones del terreno. Izquierda: pequeños cursos de agua (arroyos, caños, algaidas) generados por la intersección del nivel freático con la pendiente del terreno. Arriba se muestra el funcionamiento de ambos bajo condiciones naturales; abajo se muestra el funcionamiento modificado de aquellos humedales ubicados en sectores afectados por la explotación intensa del acuífero. Tomado de Manzano y Custodio (2005).

todio et al. (2008). El impacto de las extracciones sobre el funcionamiento hídrico de esos humedales ha sido modelado por Lozano (2004). En estos trabajos se pone de manifiesto como los bombeos para abastecer de agua a la urbanización de Matalascañas está afectando al hidropereodo de las formaciones palustres más cercanas a la costa y las ubicadas en las partes más altas de los mantos eólicos (Montes et al., 1998). De esta forma, algunas lagunas, como El Brezo, han dejado de tener una lámina de agua, incluso en periodos húmedos, y su cubeta ha sido invadida por matorral y pinos. Otras lagunas, como Charco del Toro y Zahillo, han prolongado su fase seca. La colonización de la cubeta por vegetación con diferente grado de hidrofilia, especialmente durante los periodos secos, se convierte muchas veces en un

proceso irreversible al incrementarse la evapotranspiración. Esto afecta al proceso de recuperación de los niveles freáticos en los periodos húmedos por acortamiento de la fase de inundación de estas lagunas temporales y por impedir que aparezca una lámina de agua que active sus comunidades acuáticas características. Así, la vegetación terrestre activa un proceso de retroalimentación negativa por el que se hace difícil la recuperación del hidropereodo natural de estas formaciones palustres.

También las lagunas del entorno de Mazagón-Parador de Turismo aparecen como afectadas por las extracciones en ese área. Han desaparecido como tales o se han convertido en lagunas de régimen pluvial (epigénicas). Algunos humedales incluso han desaparecido. Así, algunas lagunas han de-

jado de ser la manifestación en la superficie del terreno de las aguas freáticas locales y permanecen desconectadas del acuífero la mayor parte del tiempo. El caso más estudiado es el de las lagunas de El Brezo y Charco del Toro, en la Reserva Biológica, pero hay más, en especial en el sector oeste del manto eólico; 3) cambios en el balance de sales de algunos de estos humedales, los cuales han inducido a su vez un cambio en el papel de estas lagunas en lo que respecta a la composición química del agua del acuífero freático en su entorno. Es el caso de la laguna de Charco del Toro, y de otras dentro de la Reserva Biológica que parecen estar evolucionando en el mismo sentido. Al quedar desconectadas del nivel freático regional durante largas temporadas, la composición química de estas lagunas no obedece a la hidroquímica regional del acuífero, como sucedía en origen, sino que toman relevancia los procesos químicos locales que ocurren entre el agua de lluvia y

los sedimentos de laguna. El resultado es que en algunas de estas lagunas se generan sulfatos por oxidación de los sulfuros de los sedimentos, los que se encuentran en el agua subterránea del entorno (Lozano, 2004; Coletto, 2003; Manzano et al., 2007). Los análisis realizados en agua de las lagunas y en aguas freáticas tras las lluvias de otoño de los años 1999 y 2000 muestran el marcado cambio del carácter químico de las aguas, desde cloruradas sódicas a sulfatadas cálcicas tras las lluvias. No se ha estudiado las posibles consecuencias de estos cambios químicos sobre la composición y la estructura de las comunidades biológicas de los ecosistemas acuáticos afectados.

Las extracciones localizadas e intensas de agua subterránea para abastecimiento a poblaciones y urbanizaciones turísticas (Matalascañas, Mazagón), y en menor medida las destinadas a usos de conservación, como el mantenimiento de la laguna de El Acebuche, tienen también un efecto negativo sobre la profundidad del nivel freático y por tanto en el hidropereodo de las lagunas más occidentales del área peridunar (Lozano, 2004), lo que afecta a la composición, estructura y dinámica de la vegetación y otras comunidades biológicas. Un caso singular es la modificación del funcionamiento hídrico de las lagunas de El Acebuche, cuya hidrología es gestionada por el PND desde hace casi 20 años. No hay estudios de los efectos derivados de la modificación del nivel freático bajo las lagunas (han pasado de descargar a recargar al acuífero), ni de los cambios químicos del agua subterránea como consecuencia de que el agua que se bombea para mantenerlas procede de los niveles más profundos del acuífero, con

Pozo de extracción manual junto a la Casa de las Tres Rayas, al oeste de El Abalarío, que ahora está casi permanentemente seco por el descenso del nivel freático a causa de las extracciones de agua subterránea.
Foto: EC (1996).

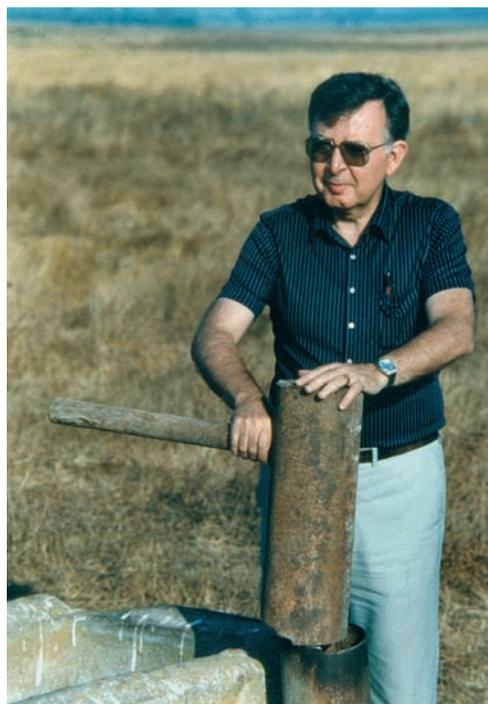


composición química algo distinta de la de los niveles más someros. El agua que se infiltra tiene mayor salinidad por evaporación.

No hay un seguimiento de la evolución de los cambios indicados en el territorio, y sólo existen recuerdos en la memoria de los lugareños de avanzada edad, con los grandes riesgos de exageraciones, inexactitudes y confusiones que ello conlleva. Faltan estudios detallados de las fotos aéreas desde 1956 y de las imágenes satelitales desde la década de 1980, aunque ya hay algunos trabajos significativos (Sousa y García–Murillo, 2003). En las imágenes satelitales es a veces difícil identificar manchas y lineaciones freatófiticas por su pequeña dimensión, si bien su importancia ecológica es notable por su gran número.

Hay situaciones claras de degradación, en especial en el entorno del ecotono norte, entre El Rocío y Villamanrique de la Condesa, en el que buena parte de los árboles de gran porte (alcornoques) han desaparecido o están muertos. La situación está menos clara en el ecotono de La Vera, donde además se produce la descarga de los drenajes de las áreas de riego entre La Rocina, El Alamillo y La Pequeña Holanda, con modificación del drenaje natural y de la escorrentía, aunque todo apunta a una disminución de las descargas por arroyos y caños, en especial en la parte más próxima a El Rocío. Los efectos se conocen mal y por eso se han considerado en el Programa Doñana 2005.

Los efectos comentados hacen referencia a la cantidad de agua y a su calidad natural. Los efectos de calidad inducidos por la actividad antrópica en la escorrentía superficial y en el medio subterráneo, principalmente debidos al uso de fertilizantes y plaguicidas en las zonas cultivadas, son aún pobremente conocidos. El funcionamiento

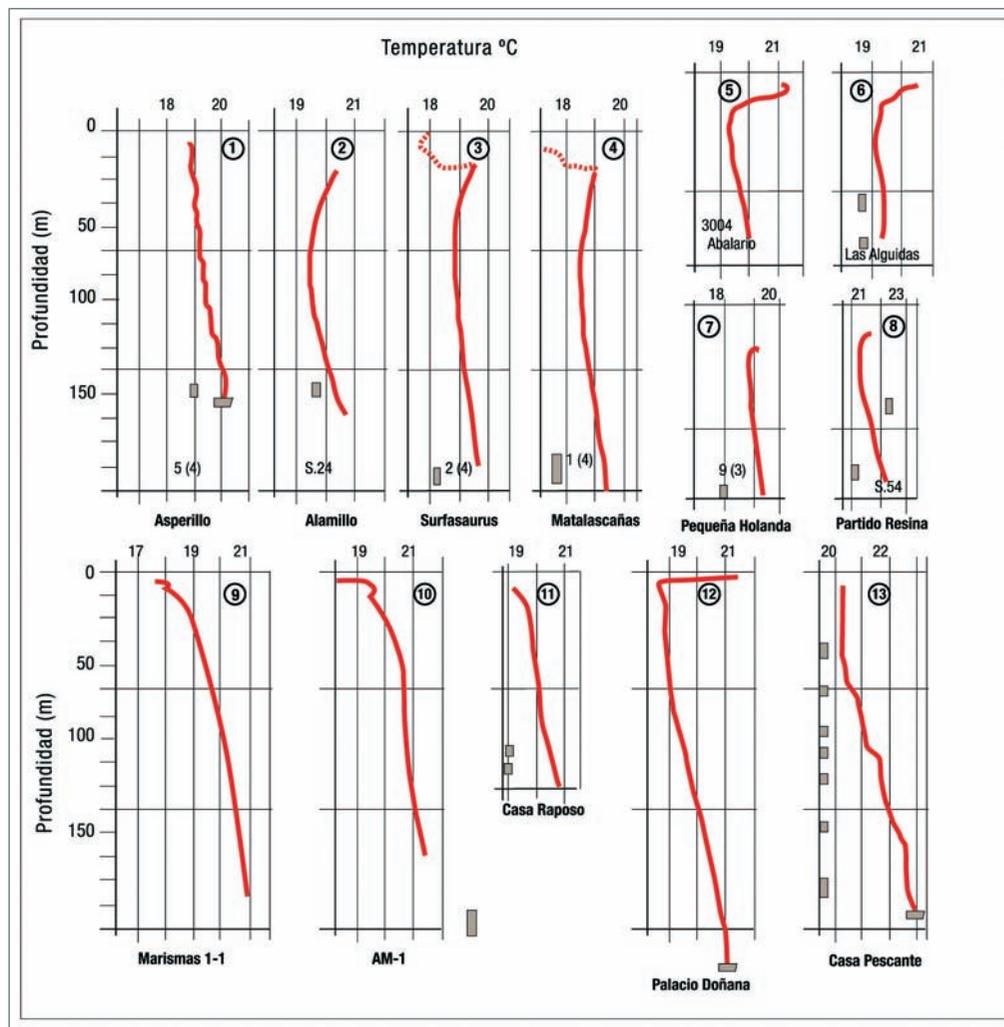


Antigua pozo surgente que alimentaba un abrevadero en el ecotono norte de la Marisma (área de la Pichiricha). Al ser afectado por el descenso de niveles piezométricos el tubo debió ser acortado para mantener la surgencia, y al cesar ésta el pozo y abrevadero fueron abandonados.

En el momento de hacer la foto (Septiembre 1992) el nivel del agua en el pozo estaba a 3 m bajo el terreno. Foto: EC.

del acuífero, sobre todo considerando la explotación preferente de acuíferos profundos, hace que los cambios químicos y los contaminantes tengan una importante componente de movimiento vertical desde la superficie hacia esos acuíferos profundos. Esto es coherente con lo comentado en el *Capítulo 8* sobre la extensión de la contaminación del acuífero por nitratos. Según los datos mostrados en la *Figura 8.6*, la velocidad de avance de las aguas con nitrato agrícola es de alrededor de 1 m/año bajo los mantos eólicos, lo que explica que en los sectores al norte de El Rocío el NO_3 haya ya llegado a la profundidad de las captaciones, mientras que al sur aún no lo ha hecho porque las rejillas de los pozos suelen estar por debajo de los 45–50 m (Custodio, 1994). Eso se ha constatado en el emplazamiento con cuatro tubos de observación en la finca El Tejar, un poco al sur de La Ro-

Figura 9.3. Perfiles de temperatura a lo largo de un conjunto de sondeos profundos en el Área de Doñana (tomado de Custodio et al., 1996). Registros realizados en 1994. Las variaciones estacionales de temperatura penetran alrededor de 20 m.

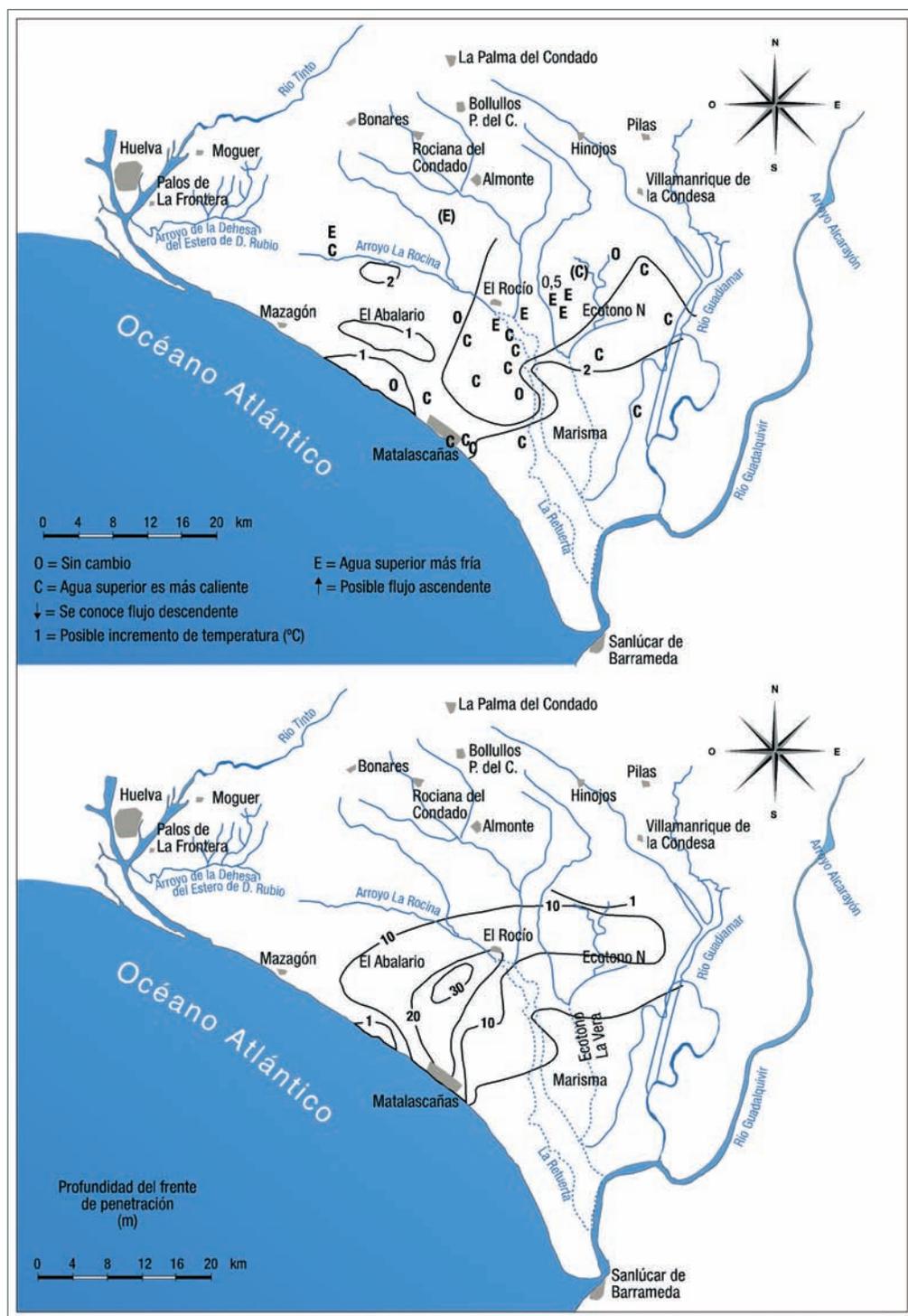


cina, en varias campañas de muestreo, pero no ha habido un seguimiento regular. El desplazamiento vertical viene marcado por el aumento de salinidad y de nitratos.

Así, la contaminación por NO_3 afecta al suelo y a la parte más somera del acuífero en las zonas agrícolas. La descarga de aguas freáticas a la superficie del terreno y a los flujos hídricos superficiales que se generan en las zonas agrícolas están directamente vinculados con los ecosiste-

mas acuáticos de esas zonas. La influencia de las aguas contaminadas con nitrato sobre estos ecosistemas empieza a ser detectable en estudios sobre la desaparición de anfibios (Marco, 2002).

Hay poca información en el Área de Doñana en cuanto al transporte del fósforo y de los productos fitosanitarios, así como de otros componentes que pueden afectar la integridad ecológica de los lugares afectados, y en cuanto a la extensión de la afección.



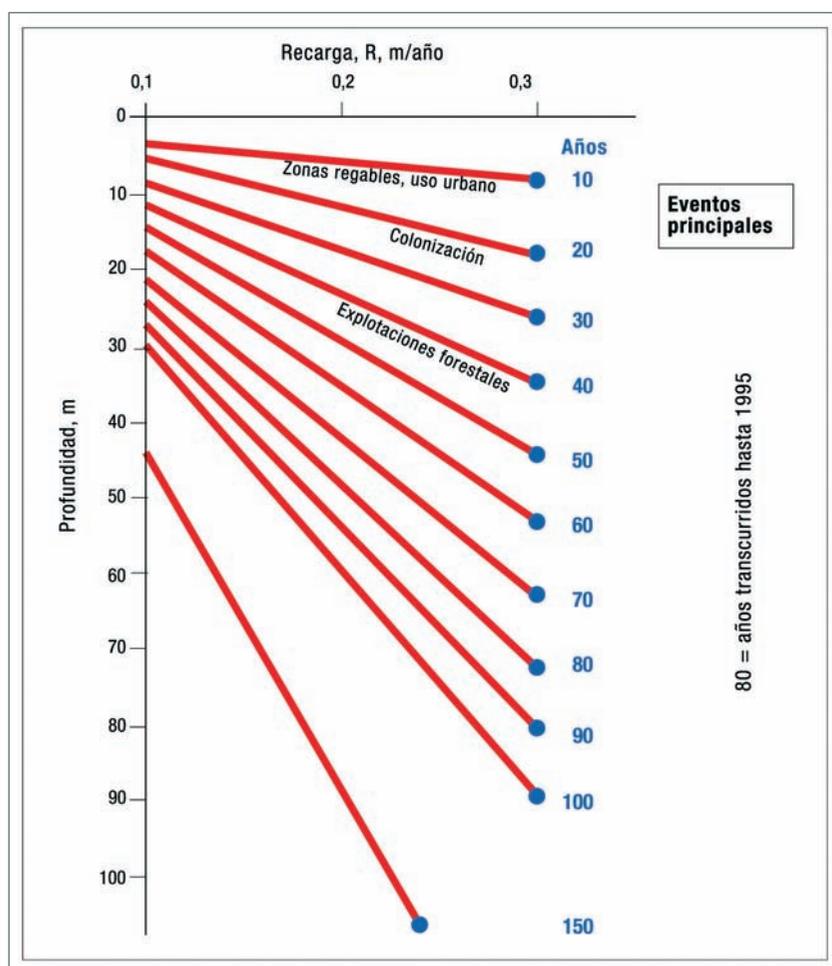


Figura 9.5. Penetración de la perturbación térmica en función de la recarga local. Los valores sobre las rectas son los años transcurridos desde que se produjo la perturbación, tomando como origen el año 1995. Las indicaciones hacen referencia a los distintos eventos singulares. Tomado de Custodio et al. (1996).

Con carácter de efecto menor, pero de interés científico y aplicado, se están produciendo cambios en la temperatura del terreno que podrían inducir cambios en los ecosistemas acuáticos dependientes de las aguas subterráneas someras. En un sistema acuífero ideal la temperatura del agua subterránea debería crecer en profundidad del orden de $3^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, algo menos allí donde haya un enfriamiento por recarga intensa por lluvia. A grandes rasgos esto es lo que sucede en Doñana tras el estudio de los registros térmicos a lo largo de

la columna de agua contenida en los sondeos profundos de la red piezométrica. Se observan algunas anomalías que corresponden a un cierto incremento de temperatura en la parte superior del terreno, y que parecen corresponder al efecto de cambio de uso del territorio desde bosque/matorral natural a cultivos y urbanizaciones, con penetraciones de la modificación que se corresponden con los tiempos en que esos cambios se produjeron. El hecho de que no afecten a todo el territorio y la magnitud del cambio (del orden de 1°C) parece indicar que no se deben a cambio climático global, sino a una causa que se superpone al mismo, como es la indicada (Custodio, 1999; Custodio et al., 1996).

En la Figura 9.3 se muestran los perfiles térmicos realizados en 1994 en un conjunto de sondeos largos distribuidos por el Área de Doñana. En la Figura 9.4 se indica el carácter del cambio observado y la profundidad de penetración de la perturbación. En la Figura 9.5 se muestra la profundidad de penetración de la perturbación en función de la tasa de recarga local y de los años transcurridos desde que se produjeron los cambios.

Aunque se desconoce el efecto de los distintos cambios aquí comentados sobre los ecosistemas, cabe prever modificaciones relevantes. En este sentido, la construcción incontrolada de pozos (que es especialmente relevante en la cabecera del arroyo de La Rocina) extenderá la perturbación de la distribución térmica natural a un gran volumen de terreno, buena parte de cuya superficie está protegida por su valor ecológico. Se estima que hay unas 2000 ha de monte público ocupadas por agricultores, de las cuales más de 100 ha están en espacios protegidos y otros algo de más 100 ha están sobre cauces.

Capítulo X

Vista aérea, de sur a norte, de El Acebuche, con el Centro de Recepción (derecha) y las oficinas y dependencias del Espacio Natural Doñana (centro).

En primer término el bosque de pinar poco desarrollado y al fondo la zona regable del Sector II del PTAAM. Las áreas más claras son de reciente transformación agrícola (últimos 4-5 años), para lo cual se ha allanado el terreno y se han colmatado con arena las lagunas que allí existían, las cuales se ven con agua en la foto por corresponder ésta a un año húmedo.

Foto: CMA. JA.

Gestión de las aguas en el Área de Doñana

Conceptos generales

Gestionar es llevar a cabo un conjunto de actividades conducentes a un fin, aplicando un conjunto de reglas. Es la aplicación del conocimiento para lograr resultados prácticos acordes con unos principios reguladores, en general dentro de una planificación.

La doble función del agua como base de muchos procesos biogeofísicos esenciales y como recurso para satisfacer las necesidades humanas supone una competencia y también una complementariedad. Es a éste último aspecto al que hay que converger para buscar la sustentabilidad. La gestión del agua consiste en establecer límites y pautas de comportamiento de acuerdo con principios físicos, químicos y biológicos, según los condicionantes económicos, sociales y políticos, en un marco con visión a largo plazo, adaptable progresivamente. Esto supone superar los plazos

más cortos de la política común, aunque con el acuerdo de las fuerzas políticas y sociales.

La gestión hídrica es un complejo conjunto de actuaciones multidisciplinares, en las que las Ciencias son sólo una parte, y donde la Sociología y la Economía juegan un papel importante. En un área con grandes valores naturales, como es el Área de Doñana, la conservación y protección de la Naturaleza son objetivos muy importantes, pero el sujeto final es el propio ser humano como receptor y fin del flujo de los servicios que generan sus ecosistemas.

La gestión hídrica se fundamenta en un conjunto de normas de muy variada naturaleza, bien sea implícitas en el comportamiento de una cierta comunidad humana, bien sea expresadas como leyes, reglamentos y guías. Todos ellos están o deberían estar encuadrados en un con-

junto más amplio de gestión territorial y de atención a la sociedad. Por ello se debería llevar a cabo por instituciones especializadas, pero con amplia visión y con el apoyo de la sociedad civil. Se requiere capacidad científica, técnica, legal y económica suficiente, con el adecuado soporte político y con la efectiva y eficaz participación de los usuarios del agua, en su sentido más amplio. La gestión hídrica es parte de una gestión de mayor alcance, en la que la incorporación de los aspectos ecológicos es esencial.

Se entiende por usuario del agua (como equivalente al término anglosajón stakeholder) a cualquier persona o grupo social que deba tener voz en temas de agua, no sólo por ser titular de derechos reconocidos expresamente en la legislación y en los registros públicos, sino por estar afectado de alguna manera o defender intereses lícitos e identificables relacionados con el agua, entre los que están los que hacen referencia a la Naturaleza. Es un concepto general de ámbito social. Sin embargo, la Ley de Aguas sólo reconoce la condición de usuario al que tiene un derecho privativo.

En la práctica común, y debido a la complejidad de la sociedad y de la Administración, así como a la frecuente escasez de medios humanos, económicos y de conocimiento, la gestión del agua se suele realizar de forma imperfecta y por órganos o instituciones insuficientes o con visión sesgada. Por estas razones, con cierta frecuencia se pueden tomar decisiones o llevar a cabo actuaciones inapropiadas y que afectan desproporcionadamente a los intereses en juego y a los propios interesados. También es algo inherente a la condición humana y a la incertidumbre asociada a los procesos hidrológicos –y



en general a cualquier proceso natural— ya que el conocimiento y los datos disponibles son siempre incompletos. Esto no debe impedir actuar, pero sí conocer que se producen desviaciones que hay que corregir, y que una más amplia visión multidisciplinar y la participación activa de los interesados reducen la tasa de errores, aunque se actúe despacio y en un contexto que requiere una notable dosis de capacidad de

Zacallón (excavación en un área de nivel freático somero) para dar acceso al agua al ganado en épocas secas. Está junto a la laguna del Cruce. Este acceso puede ser causa de contaminación local del agua, en especial si esas excavaciones acaban siendo un lugar de depósito de residuos. Foto: EC.

manejo, discusión y consulta. De otro modo se puede caer fácilmente en olvidos, equivocaciones y sesgos.

En el Área de Doñana hasta muy recientemente han sido numerosas las instituciones que de un modo u otro han intervenido en la gestión del agua, lo cual en sí no es malo y puede incluso ser beneficioso, pero en cualquier caso conviene que exista una institución que realice la coordinación, no necesariamente con poder ejecutivo directo, pero sí con notable poder moral y eficacia, respetada por todos, quizás sólo a nivel de Consejo, como ya se indicaba en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992). Aunque durante más de una década después del citado Dictamen los cambios producidos han sido mínimos, desde el año 2007 se vienen produciendo notables novedades, apareciendo nuevas instituciones y organismos, así como renovaciones en otros, con una gran dinámica en los tiempos más recientes. En cualquier caso, cabe destacar que los habitantes de Doñana y las instituciones involucradas consideran, en general, que el agua es el factor local más importante a tener en cuenta.

Como ya se dice en otros lugares de este libro, la gestión hídrica supone apoyarse en una red de observación suficiente, bien operada y mantenida, y en una elaboración de datos que los haga utilizables para la toma de decisiones (*ver Capítulo 5*). Esto implica disponer de recursos humanos y económicos suficientes. El coste de dicha gestión se podría valorar groseramente y deseablemente entre el 10 y el 20% del beneficio bruto que se deriva del valor total del agua.

Un importante punto de arranque:
el Dictamen de la Comisión Internacional de
Expertos de Doñana

En 1991 la Junta de Andalucía, ante la conjunción de presiones humanas de ocupación, desarrollo y conservación de Doñana, decidió abordar el tema mediante un Dictamen realizado por personas independientes. Este fue el origen del Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992), que recogió datos hasta el año 1991. Se trata de un notable documento que apunta objetivos de gestión, y por eso se resume aquí lo más destacado.

Bajo el punto de vista hidrológico dicho Dictamen apuntaba las deficiencias en la red foronómica y de observación de las aguas superficiales en la marisma, argumentando que la situación era mejor para las aguas subterráneas, aún no siendo satisfactoria. Se mencionaban los numerosos trabajos de modelación de esas aguas subterráneas realizados hasta entonces, que no obstante estaban apoyados en bases documentales pobres o poco referenciadas. Se comentaba la dificultad de obtener cifras de la recarga al acuífero con precisión razonable y acotando la incertidumbre. Se indicaba que la gestión del agua es una tarea que exige considerar el sistema hídrico conjuntamente con los valores ecológicos, y ello bajo un grado inevitable de incertidumbre y asumiendo que se producen notables variaciones anuales respecto a los valores medios.

Ante la incertidumbre de los datos disponibles en el momento del Dictamen –que posteriormente ha ido disminuyendo con el tiempo– se optó por aportar un balance hídrico horquillado (con valores máximos y mínimos), que

mostraba que ya existía una reducción importante de las descargas de agua, las cuales quedaban reducidas a una cantidad entre la mitad y la cuarta parte, o incluso menos, que el valor natural. Quedaban fuertemente afectadas las áreas del ecotono norte y la franja próxima al río Tinto, bastante afectadas La Rocina y el ecotono oeste (La Vera) y en menor proporción la descarga al mar, y todo ello para unas extracciones totales de agua subterránea en el año 1991 evaluadas entre 62 y 73 hm³. Estas cifras de la horquilla podrían tener un error importante, quizás hasta más del 20 % a un lado y otro del valor dado, lo que explica que otros trabajos diesen cifras diferentes, las cuales eran igualmente creíbles.

También en el Dictamen se llamaba la atención sobre la gran escasez de datos de calidad de las aguas, en especial de las superficiales, y sobre el problema real que supone el gran incremento de nitratos en el acuífero en las áreas de Moguer y al norte de El Rocío.

Las recomendaciones que hacían referencia al agua incluían la necesidad de disponer de una muy detallada topografía del vaso de la marisma, la reducción o supresión de los bombeos de agua subterránea para el riego del arroz en el área de Los Hatos–Guadamar, el control adecuado de la calidad del agua superficial y del agua subterránea con vistas a los problemas ecológicos que se puedan derivar, y la urgencia de un saneamiento de los vertidos poblacionales y agroindustriales del área.

Se recomendaba reubicar y reducir los bombeos de agua subterránea, dejándolos por debajo de 10 hm³/a en el Sector regable II (El Rocío) y a 2 km de distancia de La Rocina y del ecotono de La Vera, de 8 hm³/a en el Sector regable I (Vi-



llamanrique de la Condesa y Encauzamiento del Guadamar) y de 12 hm³/a en el Sector regable III (Villamanrique de la Condesa), suprimiendo el cultivo de arroz regado con agua subterránea. Se consideraba aceptable la extracción de hasta 8 hm³/a para abastecimiento (sin incluir en ello las poblaciones al este del río Guadalquivir), y de 2 hm³/a para mantenimiento artificial del encharcamiento de lucios y formaciones palustres con interés ecológico.

Se consideraba urgente e importante clarificar la titularidad y legalidad de los pozos y extracciones y establecer medios de medición, recomendando evitar ajardinamientos con alta demanda de agua, salvo que se pudieran llevar a cabo con agua usada tratada, si ello no creaba un problema añadido de calidad. En Matalascañas, Magazón y los campings el agua residual suficientemente tratada podría tener un uso en humedales. También se hacía mención de la necesidad de reducir el empleo de fertilizantes y otros productos agroquímicos.

Bombeo en un sondeo de la orilla S de La Rocina con bomba portátil conectada a la batería del coche y medición simultánea de parámetros hidroquímicos para comprobar la renovación del agua de la entubación antes de proceder a tomar una muestra para análisis químico. Foto: MM (2007).

El Dictamen no se oponía a la traída de aguas al Área de Doñana desde el exterior, concretamente al área de Moguer, para abastecimiento y riego, y al área del entorno de Almonte para abastecimiento, pero el agua usada generada debería ser llevada fuera de la zona y en todo caso tener una depuración suficiente.

Se apuntaba también que era preciso ordenar y dirimir los derechos legales referentes a los regadíos de arroz con agua superficial, aunque esto afecta menos a la hidrología del Área de Doñana y se refiere principalmente a la ordenación de los caudales circulantes por el río Guadalquivir.

En el Dictamen se ponía énfasis en la conveniencia de la gestión unificada del agua en el Área de Doñana, la cual se podría realizar a través de un Consejo de Gestión del Agua, asistido por un Consejo Científico del Agua y con encomiendas de los organismos que tienen la responsabilidad legal.

Aspectos de la gestión de las aguas superficiales fluyentes a Doñana

La cantidad y calidad de las aguas fluyentes a la marisma han sido objetivo de preocupación desde el que se iniciaron los esfuerzos de protección (CHGQ, 1993) y han dado origen a diferentes actuaciones de gestión, en general para evitar el acceso de aguas de mala calidad a la marisma, lo que además es un beneficio de la potencial recarga a los acuíferos allí donde ésta se puede producir.

Históricamente el río Guadiamar, el principal aporte de agua a la marisma en el pasado, ha tenido un agua de pobre calidad debido a la ac-

tividad minera en su cuenca y a la ocupación humana (principalmente para actividad agrícola) de su valle. Esta situación ha cambiado notablemente en los últimos años. El accidente minero de Aznalcóllar en 1998 y la creación del Corredor Verde del Guadiamar han supuesto el cese de los vertidos directos de aguas con elevados contenidos de metales, la práctica desaparición de la actividad agrícola sobre las terrazas más bajas del río Guadiamar y de las extracciones locales de agua subterránea para regadío, aunque eso no supone la desaparición de la agricultura y del regadío en el valle, ni de las consiguientes escorrentías superficiales y subterráneas con nutrientes y otros agroquímicos desde terrazas más altas. En el área de Aznalcóllar los restos de la balsa de lodos mineros y su entorno y las escombreras, son todavía una cierta fuente de contaminación persistente, que se ha reducido mucho, pero que no es posible eliminarla del todo. También se debe prevenir la incorporación de contaminantes asociados a metales pesados desde nuevas nuevas explotaciones mineras. Por otro lado, la depuración de aguas residuales urbanas en la cuenca del Guadiamar no alcanza al total de los efluentes. Algunos núcleos urbanos y, sobre todo, varias urbanizaciones no conectadas a la red de saneamiento general, vierten sus aguas negras a afluentes del Guadiamar. También algunas empresas agroalimentarias (mayoritariamente las dedicadas al procesado de aceitunas) vierten sus efluentes sin depurar a afluentes del Guadiamar, aunque de hecho están obligadas a realizar depuración in situ o a enviarlos a plantas depuradoras.

En las otras cuencas vertientes al Área de Doñana existen vertidos de población y de su in-

dustría agroalimentaria, en proceso de ser tratados y depurados, pero aún a nivel insuficiente, más las descargas de los campos de arroz del tramo bajo del valle del Guadalquivir. Este es un aspecto que aparece reiteradamente en los medios de comunicación y en las reivindicaciones de las asociaciones ecologistas. Eso hace que el agua entrante en la marisma tenga cierta carga orgánica y mineral, una parte de la cual se acumula en los sedimentos, otra parte se bioacumula y otra es transportada hacia el estuario a través del tramo más bajo del río Guadalquivir.

El Proyecto de Restauración Hídrica Doñana 2005 (Proyecto Doñana 2005) surgió en mayo de 1998 como actuación del Ministerio de Medio Ambiente, tras el accidente minero de Aznalcóllar. Abarca los diversos cauces afluentes a la marisma y parte de la propia marisma, y es complementario al Proyecto Corredor Verde del Guadiamar de 1998, de la Junta de Andalucía, para la regeneración de la zona afectada por el vertido de Aznalcóllar y la consecución de la calidad exigible a las aguas del río Guadiamar. Se trata de una de las grandes oportunidades para intentar restaurar ecológicamente el área de Doñana y sus humedales en un contexto respetuoso con la Naturaleza y acorde con el alto valor del territorio. Aunque está orientado principalmente a obras, incluye una serie de actuaciones de estudio e investigación.

Entre los objetivos prioritarios del Proyecto de Restauración Hídrica Doñana 2005 (Bayán, 2005b) se considera el restablecimiento, en la medida de lo posible, de las condiciones hidrológicas naturales de la marisma de Doñana y la resolución de algunos problemas concretos relacionados con la calidad, la cantidad y la erosión

en las cuencas vertientes a la marisma (del Partido, La Cañada Mayor, parte baja del río Guadiamar, los Sotos). Ello supone incrementar notablemente la conectividad hidráulica de la marisma con su entorno. Por este motivo se acrecienta la importancia que tiene la correcta gestión de la cantidad y, en especial, de la calidad del agua en las cuencas vertientes a la marisma, que incluye territorios que están más allá de lo que se considera Área de Doñana, como se expone en el *Capítulo 2*.

Para la gestión hace falta un cuidadoso control de las diferentes actuaciones realizadas en el pasado, las cuales condicionan fuertemente la dinámica fluvial (en el caso de actuaciones sobre ríos y arroyos, como es el caso de las realizadas en los ríos Agrío y Guadiamar y arroyo del Partido) y la cantidad y calidad de las aportaciones de agua, así como considerar en detalle las presiones antrópicas a que están actualmente sometidas prácticamente todas las cuencas. Cabe destacar las cuencas de La Rocina y del Partido, cuyas aportaciones constituyen actualmente la mayor fuente de agua superficial para la marisma (como se expone en el *Capítulo 7*). En el caso de La Rocina la cantidad está afectada por los bombeos de aguas subterráneas en su cabecera, en parte ilegales. La calidad del agua de ambos arroyos está afectada por la actividad agrícola y, en el caso del Partido, también por los vertidos de aguas urbanas sin depurar.

En cuanto a la cuenca del río Guadiamar, además de los ya mencionados problemas persistentes de calidad vinculados a la actividad humana es necesario tener en cuenta el abandono y clausura de las actividades mineras. Se ha realizado una importante restauración ambiental

cuya eficacia debe ser controlada para, en caso necesario, introducir nuevas medidas o actuaciones complementarias. Además hay que observar el posible lixiviado de metales pesados desde el área de Aznalcóllar.

Aspectos de la gestión de las aguas superficiales de la marisma y de los complejos palustres de los mantos eólicos —

Actualmente el llenado de la marisma se realiza principalmente con aportes de escorrentía de los arroyos tributarios, ya que el río Guadalquivir está desviado hacia el Guadalquivir por Entremuros y el Brazo de la Torre. El propio río Guadalquivir está aún separado de la marisma por la Montaña del Río. En el año 2006 el Comité Científico del proyecto Doñana 2005 alcanzó un consenso para eliminar la Montaña del Río, pero la actuación aún no se ha realizado. Otra de las actuaciones del mismo proyecto tiene por objetivo recuperar la funcionalidad fluviomareal del Brazo de la Torre. Por último, otra actuación tiene por objetivo recuperar la entrada de agua del río Guadamar a la marisma a través del Caño Travieso desde la Vuelta de la Arena (Entremuros). Hasta donde se sabe, ninguna de estas actuaciones ha concluido aún, aunque están iniciadas.

La razón por la que el río Guadamar se desvió y canalizó entre dos muros de arcilla es la pobre calidad de sus aguas por ocupación humana de su valle y por los vertidos de aguas con contaminantes metálicos del área minera de Aznalcóllar. Aunque como se ha visto en el apartado anterior esta situación ha cambiado

notablemente en los últimos años, los problemas de calidad del agua persisten, especialmente relacionados con la carga de materia orgánica, nutrientes agrícolas y elevado pH (basicidad). En conjunto parece prudente procurar una mejora adicional de la calidad del agua del río Guadamar antes de introducirla en la marisma.

En cuanto los complejos palustres de los mantos eólicos, que se sepa hasta la actualidad no se ha realizado ninguna actuación de gestión del agua, más allá del uso de agua subterránea para mantener inundadas las lagunas de El Acebuche durante los últimos años. Los trabajos de modelación realizados (*ver Capítulos 7 y 8*) muestran que la suma de bombeos para regadío, abastecimiento urbano y usos medioambientales han tenido un impacto claro en la disminución de descargas de agua subterránea a ciertas lagunas y en la modificación del hidroperiodo de muchas más. Algunos estudios hidroquímicos e isotópicos indican la aparición de cambios en las tasas de ocurrencia de los procesos hidrogeoquímicos entre el agua intersticial y los sedimentos del fondo de lagunas que han quedado descolgadas del nivel freático regional. Ya hay evidencias de cambios en la composición química del agua del entorno de esas lagunas, y sin duda tendrá consecuencias en los procesos biofísicos, pero se desconocen.

Como se indica en otros capítulos (*4, 7 y 8*), para la gestión de las zonas húmedas sería bueno contar con una red de observación de aguas superficiales y subterráneas específica del tipo de la realizada en el marco de algunos proyectos de investigación en las lagunas peridunares (Dulce, Santa Olalla y otras) o en la zona de los Sotos. Dado el elevado número de lagunas y pequeños

arroyos existentes, una buena solución sería seleccionar algunos de ellos que sean representativos y diseñar una red de observación lo más completa posible en los mismos. Las observaciones y resultados se podrían extrapolar a los del mismo tipo hidrológico de los controlados, los que serían objeto de una vigilancia más ligera y distanciada en el tiempo.

Aspectos de la gestión de las aguas subterráneas

Toda el agua utilizada en el Área de Doñana es actualmente de origen subterráneo, excepto en las áreas de arrozales próximos al río Guadalquivir, donde se utiliza agua superficial tomada del río. En las áreas próximas al Guadalquivir las aguas subterráneas son salinas o no existe acuífero explotable.

El principal problema de gestión cuantitativa de las aguas subterráneas es el de la competencia entre las necesidades de agua de los cultivos de regadío y la conservación de los humedales que dependen de esas aguas subterráneas. La demanda hídrica poblacional es de un orden de magnitud inferior. En el área de Doñana se partió de un supuesto inicial que es erróneo respecto a los actuales conceptos conservacionistas, aunque era consistente con el paradigma de aquel momento: la FAO y el Gobierno Español (esencialmente el IGME y el IRYDA) estuvieron de acuerdo en que la extracción intensiva de agua subterránea para regar era viable ya que el descenso freático producido desecaría las áreas de evapotranspiración natural—entonces consideradas inútiles—, quedando en un recurso hídrico disponible permanente. Eso es lo que efectivamente ha sucedido, aunque con



matices debido a que en algunas áreas los recursos asignados no eran sustentables y no se llegaron a explotar o su explotación ha cesado o ha disminuido significativamente. Esto ya había sido previsto en uno de los informes de FAO (1969b). Otra hipótesis errónea era el supuesto aislamiento de las capas someras del acuífero respecto a las profundas, lo cual se ha visto que no es cierto cuando se ha podido disponer de puntos de observación adecuadamente construidos e incorporar estas mediciones a modelos de simulación del flujo de agua subterránea (*ver Capítulos 4 y 7*). En los *Capítulos 8 y 9* se analizan los resultados de la explotación agrícola. La eliminación de buena parte de los eucaliptales ha supuesto disminuir la evapotranspiración del acuífero, con lo que ha aumentado la recarga. Podría argumentarse que ese aumento podría compensar las extracciones de agua subterránea para regadío en cabecera de La Rocina, pero ello supone sacrificar o reducir la recuperación hídrica de esa área y del propio arroyo de La Rocina.

Sondeos piezométricos en el área de La Canariega–Recepción de La Rocina. El que está en primer término tiene un drenaje lateral para cuando los niveles resultan surgentes. Foto: EC.

El progresivo mayor conocimiento científico y el cambio de apreciación social que se ha ido produciendo con el tiempo ha llevado a otorgar un valor elevado al flujo de servicios para la sociedad que se deriva del medio ambiente de Doñana, propiciando así su mantenimiento, conservación y restauración. Esto supone una notable modificación de la óptica, así como la reconsideración de la planificación y de los derechos de agua, reales o virtuales, de los colonos agrícolas establecidos y de la población en general.

Consideraciones sobre las redes de observación de interés para la gestión hídrica

Las redes permanentes de observación ecológica e hídrica tienen como objetivo de gestión conocer la evolución de los niveles y superficie de agua en los cuerpos (masas) de agua superficiales, la relación entre el nivel de agua en el acuífero y las formaciones palustres, el efecto de los cambios climáticos naturales o influenciados, el efecto del manejo del terreno en la cuenca superficial vertiente al humedal (cambios en el aporte hídrico, cambios de uso del territorio que supongan aportes de sustancias no deseadas por vía atmosférica o por flujos hídricos superficiales o subterráneos, cambios en la cobertura vegetal...), el efecto de cambios de manejo del acuífero (cambios temporales y/o espaciales en el patrón de extracciones, incremento de la recarga neta por riego con recursos externos a Doñana, cambios de composición química del agua de recarga...), el cálculo de balances de agua y de sales y nutrientes en los humedales, así como observar de forma temprana cambios en dicho balance que apunten hacia un deterioro de la integridad de los hume-

dales. Todo esto se comenta con detalle en el *Capítulo 4*, donde se describe la situación actual de las redes de observación, sus capacidades y carencias.

Sólo cabe considerar aquí una situación común a Doñana y a otras zonas de elevado interés ecológico, donde aún es necesario acumular información experimental para obtener modelos conceptuales robustos del funcionamiento del medio hídrico. Se trata de las crecientes dificultades de acceso a las áreas protegidas para efectuar mediciones y muestreos, bajo la excusa de disminuir la presión antrópica en esas zonas. Esto es en sí es razonable como principio general, pero debe ponderarse con la necesidad y beneficios de mantener e incrementar el conocimiento en algo tan importante y sensible como es el agua, y en particular el agua subterránea. La situación actual notablemente restrictiva está llevando a serias discontinuidades en las series observacionales y a la merma de interés por parte de los profesionales e investigadores. Posiblemente sea una muestra de que aún no se ha encontrado un compromiso óptimo entre la no perturbación de las áreas protegidas con excesivas penetraciones humanas y la necesidad de obtener información estadísticamente representativa acerca de procesos variables espacial y temporalmente.

La gestión hídrica en la Ley de Aguas _____

Según la Ley de Aguas, la responsabilidad legal última de gestión corresponde a los Organismos de Cuenca, sean éstos Estatales o Autonómicos. Para ello han de estar dotados de personal experto suficiente y de instrumentos económicos y legales para actuar. En el pasado, ni los objetivos ni los

medios han estado suficientemente definidos, ni tampoco posiblemente ha existido una clara voluntad de resolución, ni se han dotado los medios humanos y económicos necesarios. Con el tiempo algunas situaciones derivadas se han ido consolidando, con lo que los cambios y correcciones son cada vez más difíciles, tienen mayor coste y ocurren en un contexto no de buenos y malos sino de intereses que llegan a ser razonables en sí, pero contrapuestos ante un recurso limitado y con interferencias. Por ello se debe evolucionar hacia un consenso social y ecológico que busque la complementariedad en vez del enfrentamiento.

Las disposiciones transitorias de Ley de Aguas de 1985 añadieron dificultades importantes al tratamiento legal práctico y por lo tanto a la gestión (Molinero et al., 2009; Sahuquillo et al., 2009). En la realidad han producido un cuadro de complicado tratamiento que a veces no deja más vía que la difícil expropiación de un derecho cuya existencia legal es por lo menos dudosa. De ahí que a veces parezca que se está ante un callejón sin salida, con estériles enfrentamientos entre Administración y administrados. Esto dificulta converger hacia acuerdos en asuntos que en el fondo son de interés común a las partes y esenciales para la sociedad y para el medio ambiente. En todos estos asuntos la mayoría de los usuarios del agua se han posicionado tradicionalmente en el lado contrario a la Administración del agua. Esto es un punto de partida muy negativo ya que para llegar a soluciones satisfactorias para todos se requiere confianza mutua, colaboración y responsabilidad ante lo que es un bien común y un importante flujo de servicios.

Actualmente está en marcha el desarrollo de las disposiciones de la DMA, del año 2000,

transpuestas a la Ley de Aguas española, y recogidos en el Texto Refundido de la Ley de Aguas de 2005.

Las circunstancias que acompañaron a la promulgación de la Ley de Aguas de 1985 incluyeron disposiciones transitorias a largo plazo cuyo resultado ha sido que parte de las aguas subterráneas estén en el dominio privado, aunque teóricamente sujetas a regulación. La praxis ha mostrado que ese artilugio legal no ha sido afortunado para la gestión de las aguas y ha complicado enormemente la ya de por sí difícil carga administrativa de las Autoridades de Aguas, sean éstas estatales o autonómicas. Salvando situaciones particulares y los a veces notables y loables esfuerzos de personas concretas, estas Autoridades de Aguas no han estado preparadas y dotadas humana y económicamente para asumir los nuevos retos, y en ocasiones tampoco han tenido la voluntad de llegar al fondo de los problemas. El Área de Doñana ha sufrido fuertemente esta situación en el pasado, aunque afortunadamente está empezando a cambiar institucionalmente.

En el momento de la redacción final de este libro hay novedades que pueden ser causa de cambios importantes, aún por desarrollar. Tales son la publicación en BOJA (Boletín Oficial de la Junta de Andalucía) de 21-04-09 del Anteproyecto de Ley de Aguas de la Comunidad Autónoma de Andalucía, que está en fase de alegaciones públicas, y el Acuerdo Andaluz por el Agua, publicado por la Junta de Andalucía el 03-02-09. Por otro lado, la deseable y posiblemente necesaria modificación de la Ley de Aguas para incorporar adecuadamente y coherentemente los nuevos paradigmas, que llegó a plasmarse en un borrador en 2007, no ha cristalizado aún en un nuevo texto legal. Está

en proceso de trámite una Ley de Aguas para Andalucía, que incorpora elementos novedosos, en la que se potencia el carácter público de todas las aguas y la intervención administrativa.

La Directiva Marco del Agua _____

La promulgación de la Directiva Marco del Agua (DMA) en el año 2000 (2000/60CE; DMA, 2000) marca notablemente la orientación y actuaciones en política del agua en la Unión Europea en cuanto al medio ambiente. Se trata de establecer un marco para la protección de las aguas que prevenga todo deterioro ambiental adicional y mejore su estado químico actual. Se fijan objetivos tendentes a la restauración del buen estado natural de los cuerpos (masas) del agua con la necesidad de frenar el progresivo deterioro y actuaciones para invertir las tendencias. La aplicación a cada territorio en las circunstancias peculiares que puedan presentarse es responsabilidad de los gobiernos de los estados miembros, y por lo tanto de los gobiernos regionales y autoridades locales, cuando así esté regulado, en aplicación del principio de subsidiaridad.

Es importante resaltar la introducción de nuevas designaciones y conceptos, como la de Demarcación Hidrográfica para el conjunto de un territorio gestionado hídricamente por un organismo, que en esencia coincide con la de Confederación Hidrográfica aplicada en España, o la de Agencia del Agua. Además, la aplicación de la gestión no se hace sobre ríos, acuíferos, lagos, etc., sino sobre masas de agua (traducción impropia del término anglosajón *water body*, que se representaría mejor lingüísticamente y conceptualmente por la de cuerpo de agua).

Estos cuerpos (masas) de agua han sido ya definidos oficialmente. En cuanto a las aguas subterráneas, un cuerpo de agua puede reunir varios acuíferos o un acuífero puede comprender más de un cuerpo de agua. No es una definición hidrológica–hidrogeológica, sino que tiene fines administrativos. Por lo tanto, en este libro se ha mantenido la designación de acuífero. La DMA exige que en el año 2015 las diferentes masas de agua subterránea estén en buenas condiciones cuantitativas y cualitativas, o que si no fuese posible, se realicen los estudios de detalle y previsiones que permitan solicitar un aplazamiento para 2021 ó 2027. A finales de 2009 se ha de decidir como se posicionan las diferentes masas de agua al respecto. En el *Cuadro 10.1* se explican algunos de los aspectos a considerar.

En muchas cuestiones la DMA introduce actuaciones en el campo de las aguas subterráneas que son novedosos bajo el punto de vista administrativo–legal, y que dependen de conceptos aún no bien clarificados, aunque se desarrollan en la Directiva del Agua Subterránea (Directiva para la Protección de las Aguas Subterráneas, 2006/118/EC, DAS, 2006), que ha sido promulgada para cubrir aspectos no suficientemente definidos en la DMA y que establece estrategias para prevenir, controlar y corregir la contaminación del agua subterránea. Para su cumplimiento es necesario conocer la situación de la cantidad y, sobre todo, de la calidad de las aguas subterráneas, el origen de las mismas y su posible modificación por procesos de contaminación, entre otras cosas, además del impacto en los diferentes tipos de ecosistemas acuáticos dependientes de aguas subterráneas.

Cuadro 10. 1

Aspectos mínimos a considerar en la gestión de las aguas subterráneas en el Área de Doñana, según la DMA

- Calidad de las aguas subterráneas: identificación y clasificación de fuentes de contaminación; identificación de los procesos contaminantes y del grado de afección al acuífero; identificación de los procesos hidroquímicos que puedan ser atenuantes naturales de la contaminación.
- Cantidad de las aguas subterráneas: conocimiento preciso de las extracciones por bombeo mediante sistemas de información que permitan el uso de esta información en los modelos numéricos de apoyo a la gestión del acuífero; cuantificación de las descargas por evapotranspiración; disponibilidad de un modelo de flujo bien calibrado que se utilice por los gestores del agua.
- Calidad de las aguas superficiales: identificación y clasificación de fuentes de contaminación y del papel de la relación acuífero–red hídrica superficial en la modificación de la calidad del agua superficial; instalación e instrumentación de una red completa y operativa de control de la contaminación de los cauces fluviales, especialmente de aquellos que introducen agua en la marisma.
- Cantidad de las aguas superficiales: estudio del valor de la relación lluvia/escorrentía y su zonificación; estudio de la relación aguas subterráneas–aguas superficiales y su zonificación; instrumentación de una red de medición de todas las descargas significativas de agua a la marisma, incluyendo los arroyos y caños de La Vera, cuyo papel ecológico es de extraordinaria relevancia.

Para conocer si la calidad de un cuerpo de agua subterránea está afectada por contaminación es imprescindible conocer previamente los valores característicos de la composición química natural de ese agua –fondo natural– y los procesos físicos y químicos que la originan. El fondo natural de la calidad de un agua subterránea se puede definir como aquellas condiciones físico–químicas propias de la misma que se derivan de procesos puramente naturales (*ver Capítulo 7*). Así, cualquier posible impacto sobre la calidad del agua se evalúa por comparación con ese fondo natural. El fondo natural es variable espacialmente, aún dentro de un

mismo cuerpo de agua, como sucede en el Área de Doñana (Manzano et al., 2003).

La DMA ha supuesto en Europa, y por supuesto también en España, y también en el caso concreto de Doñana, un formidable paso adelante, aún en sus inicios pero con alcance importante, aunque no sin dificultades de aplicación en la práctica, debido a las particulares características hidrológicas de España en relación a otros países europeos (Sahuquillo et al., 2009). Ha creado en los organismos gestores del agua una preocupación por las tareas a realizar que supera notablemente lo conseguido con anteriores disposiciones.

En el caso de Doñana está empujando actuaciones largo tiempo diferidas. Tal es la conveniencia de la supresión del cultivo del arroz con aguas subterráneas en la zona de los Hatos (Sector III del PTAAM) del Área de Doñana para mejorar el balance hídrico del sistema acuífero.

Condicionantes administrativos de la gestión hídrica _____

En el preámbulo del Decreto 735/1971 de 3 de Abril, en el que se recogían normas de carácter técnico y administrativo en cuanto a la explotación de las aguas subterráneas en determinadas áreas de Andalucía, se indicaba la necesidad de medidas para el desarrollo del área de Almonte–Marismas mediante la captación de aguas subterráneas, tras su declaración de interés nacional. Al tratarse de un área de explotación controlada, se establecía que la ejecución de nuevos pozos y el incremento de las extracciones existentes requerían autorización administrativa condicionada al cumplimiento de ciertos requisitos. La declaración de interés nacional antes aludida se materializó en el Decreto 1194/1971 de 6 de Mayo, con aprobación posterior del Plan General de Transformación (Decretos 1194/1971 de 6 de Mayo, 2148/1972 de 8 de julio y 2244/1974 de 20 de julio) y del saneamiento de las áreas de marisma que no eran objeto de transformación en regadío.

Paralelamente se creó el Parque Nacional de Doñana (Decreto 2412/1969 de 16 de Octubre, modificado por el 2101/1971 de 9 de Noviembre) y se promulgó la Ley 91/1978, de 28 de Noviembre, del Parque Nacional de Doñana, que

incluía además dos preparques y tres zonas de protección. En el Artículo 1.2 de dicha Ley se menciona la protección de las aguas, que se extiende a las aguas subterráneas.

Una vez que se pusieron de manifiesto las interferencias hídricas entre el desarrollo del Plan de regadío Almonte–Marismas con el Parque Nacional, se elaboraron disposiciones que han ido limitando las superficies a ocupar (Real Decreto 357/1984 de 8 de Febrero).

También en paralelo se autorizaron las instalaciones turísticas de Matalascañas y se inició el desarrollo de Mazagón. Otros intentos posteriores de urbanizaciones costeras no obtuvieron las correspondientes autorizaciones para su desarrollo.

La Ley 29/1985, de 2 de Agosto, de Aguas, declaró que todas las aguas, superficiales y subterráneas, eran del dominio público. En lo que se refiere al Área de Doñana la gestión quedaba atribuida a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, salvo una pequeña parte del área occidental que correspondía a las competencias de la Confederación Hidrográfica del Guadiana. Esa atribución legal se ejercía por encima de las competencias en materia de gestión de recursos de agua, saneamiento, abastecimiento u otros que pudieran tener la Junta de Andalucía o los municipios, aunque sin esconder las complejidades asociadas. Desde entonces las condiciones administrativas han cambiado, pues a partir de 2006 se ha transferido la gestión de las cuencas que vierten al Golfo de Cádiz y están enteramente dentro de Andalucía, incluyendo los ríos Tinto y Odiel, a la Agencia Andaluza del Agua (AAA) de la Junta de Andalucía, creada en 2005. Por otro lado, buena parte de las competencias

de la CHGQ en el ámbito de Doñana se han traspasado a la AAA.

Los derechos de aguas en el Área de Doñana son complejos pues parten de una declaración de interés público y se regulan en una Ley de Aguas con situaciones opcionales. Por una parte, la Administración con competencia en materia de agricultura, acogiéndose a lo previsto en las Disposiciones Transitorias de la Ley de Aguas, ha instado el reconocimiento de parte de los derechos de los que es titular a través de dicha vía. Por otra parte, se han constituido comunidades de regantes en algunos subsectores en la Zona Regable para el tratamiento de las aguas como públicas, pero no todos ellos disponen del necesario reconocimiento previo del derecho de aprovechamiento de las aguas, mientras que otros regantes no efectuaron acción alguna. De aquí se deriva una causística que complica en gran manera el tratamiento legal y que ha hecho lenta e insegura la actuación de las Autoridades del Agua. El principal problema actual es la ordenación de los derechos legales y como combatir las extracciones ilegales.

Necesidades de gestión de las aguas subterráneas y del agua en general en Doñana

Uno de los puntos más difíciles de resolver, aunque se trabaja en ello, es la eliminación del riego con agua subterránea de los arrozales del área de Los Hatos, ya que se trata de un fuerte consumo de agua concentrado territorialmente en una zona de descarga natural del acuífero, el ecotono norte. Una alternativa, entre las varias propuestas, es substituir este agua por agua del

embalse del río Agrio. La viabilidad hidráulica del transporte por el propio río Guadamar parece razonable, pero existe un problema de calidad del agua fluvial en el lugar de toma y a lo largo de la cuenca ya que el cauce va incorporando los excedentes de riego de los terrenos elevados laterales vertientes al mismo. Otro problema son los excedentes de agua y drenajes de los arrozales, cuyo vertido interior a Doñana es problemático por la calidad, y en todo caso debería devolverse al Guadamar cuando éste no esté en disposición de verter en la marisma. Ante los varios probables problemas de cantidad, calidad, cambio del régimen hídrico y efectos ecológicos a resolver, unos más previsibles que otros, lo más adecuado sería evaluar también otras opciones alternativas. En cualquier caso, sea cual sea la opción adoptada, se requiere un análisis detallado de las consecuencias a medio y largo plazo.

Las extracciones de agua subterránea en la cabecera de La Rocina para el riego, principalmente de fresas, suponen una merma de caudales a la misma ya que en buena parte se trasvasan fuera de su cuenca. Su substitución por caudales de agua procedentes del sistema del Chanza–Piedras–embalse de Andévalo, Huelva, ya en marcha, es una mejora a la situación, siempre y cuando los excedentes de agua producidos, tanto superficiales como subterráneos, se mantengan dentro de los arroyos tributarios del río Tinto. Se trata de un volumen de 5 hm³/a, con un horizonte de 10 hm³/a.

El abastecimiento o complemento del abastecimiento urbano de Almonte–Rociana y otras poblaciones del área con agua importada del embalse del Corumbel, en la cuenca del Tinto, no



Registro geofísico con georadar en Los Sotos (año 2007) para conocer la geometría de las capas de arcilla vinculadas al comportamiento de los arroyos y lagunas de la zona.

Los radargramas (gráficas de registro) se interpretan con apoyo de la información litológica real obtenida en sondeos como el de la esquina superior izquierda. La campaña fue realizada por un equipo de la Universidad Juan Carlos I (Madrid) y el equipo de la UPCT Foto: MM.

parece suponer una afección importante siempre y cuando se limite a agua para población y los afluentes que se viertan dentro del Área de Doñana estén suficientemente tratados y depurados. Esta solución no es estrictamente necesaria, pero puede ayudar a la mejora de la calidad de abastecimiento al substituir aguas subterráneas con riesgo de contaminación de nitratos de origen agrícola. Sin embargo, la escasez de caudales estivales trasvasables hace que las aguas subterráneas locales sean por lo menos un apoyo que es necesario mantener, además de los problemas de calidad del agua importada.

Se ha hablado de la posibilidad de desalinizar agua marina en la costa para abastecer Matalascañas, pero esa solución no parece prácticamente y económicamente viable ya que la población a servir es muy variable estacional e incluso semanalmente. Una explotación económicamente aceptable requeriría un gran volumen regulador asociado, multiestacional, con un notable coste,

y cuya ubicación puede ser problemática desde el punto de vista físico y ecológico.

Las actuaciones públicas en Doñana que hacen referencia al agua se suelen orientar a reducir la presión sobre los recursos naturales, los ecosistemas y la biodiversidad, dando prioridad a los criterios de conservación y a la mejora del modelo de desarrollo que se ha venido realizando en el marco del Plan de Desarrollo Sostenible Doñana. Eso supone resolver los problemas de gestión de los recursos hídricos y su consideración integral en las zonas de alto valor ecológico, además de organizar canales de participación pública e introducir objetivos económicos y sociales a medio y largo plazo, en vez de las acciones infraestructurales puntuales y ocasionales que han sido frecuentes en el pasado. Muchas de estas actuaciones son sectoriales y aún les falta el contexto territorial y social general, así como una mayor dimensión ecológica y ecosistémica. El desarrollo sustentable incluye como parte esencial los recursos hídricos y su integración ambiental. En el mismo juegan un papel importante la actividad agraria (horticultura, fruticultura y cultivo del arroz) y la turística (FD21, 2002; WWF, 2001b).

Se dispone de un Plan especial de ordenación de los usos del agua en el entorno de Doñana que hace referencia a las zonas freseras. Los productos de fresones están en buena parte coordinados por Interfresa, la Asociación de Agricultores Puerta Doñana (municipio de Almonte), que reúne a unos 2000 agricultores y 1000 ha de regadío, y la Comunidad de Regantes de El Fresno. Como actuación singular están las obras de Impulso del Fresno para importar 5 hm³ de agua de la cuenca del Guadiana al sector occidental del



Área de Doñana. Entre otras actuaciones propuestas están las de crear corredores ecológicos y las de reubicar zonas de riego, lo que afecta a 6600 ha de Almonte, Bonares, Lucena del Campo, Moguer y Rociana, en las que en total hay unas 5000 ha de regadío de fresa, de las cuales 3200 ha se consideran administrativamente irregulares. Persiste el problema de 2000 ha de monte público ocupado para cultivo de la fresa.

Conclusiones

La gestión de los recursos de aguas, y en particular de las aguas subterráneas, es un aspecto clave para compaginar el buen servicio a las necesidades humanas, en cantidad y calidad, y en el lugar y momento apropiados, al tiempo que se mantienen —en su caso se restauran— las funcionalidades ecológicas y los servicios a la población

Lagunas del Huerto y Las Pajas, en el área de El Acebuche, que en época seca se mantienen con aporte de agua subterránea extraída de los pozos que existen entre el Centro de Recepción y la carretera a Matalascañas. Foto: CMA. JA.

que se derivan de las mismas. Esto es aplicable en especial al Área de Doñana.

Esta gestión hídrica es en buena parte el resultado de actuaciones técnicas, basadas en principios científicos y en un buen conocimiento de los sistemas hídricos y sus implicaciones ecológicas –en concreto de los sistemas acuíferos–. Esto requiere el apoyo de redes de observación espaciales –sin olvidar la dimensión vertical– y con adecuada frecuencia temporal. Además hay que tener en cuenta la componente económica, con amplia visión, y que considere no sólo los beneficios y costes directos sino también los indirectos y sopeses los intangibles. Y de forma muy importante afectan los condicionantes y objetivos sociales, así como su evolución a lo largo del tiempo.

Por todo ello la gestión de los recursos de agua –y de agua subterránea– en el Área de Doñana es

un complejo entrelazado de componentes muy diversos –multidisciplinares– a llevar a cabo por un equipo coordinado y no por un individuo o un grupo de la misma formación, con participación tanto de las Autoridades del Agua, como de los usuarios –en sentido amplio–, como de las fuerzas de la sociedad civil y de la política. Se trata de conjugar muy diversos intereses, entre los que los de la Naturaleza tienen un notable peso, a veces contrapuestos o en competencia, tratando de encontrar soluciones complementarias en que todos consigan beneficios y compartan los costes.

No se debe actuar bajo conceptos simplistas y sectoriales –aunque pueden ser útiles para una primera aproximación– ya que hay numerosas interrelaciones en el espacio y en el tiempo, y muchos resultados son a largo plazo, en especial en lo que se refiere a las aguas subterráneas.

Capítulo XI



Vista aérea hacia el este del área de Los Sotos y las diversas lagunas que se forman allí en pequeñas depresiones en el manto eólico en su estado actual, después de erradicar el bosque artificial de eucaliptus. Se aprecian las vías de circulación y al fondo La Vera e inicio de la marisma (en estado seco).

Foto: CMA. JA.

Instituciones, participación y corresponsabilidad para la gestión del agua en el Área de Doñana

Conceptos básicos para un cambio de paradigma, con aplicación a la gestión del agua en Doñana

Como se expone en el *Capítulo 10*, la gestión del agua es una parte de la gestión del patrimonio natural, cuyo fin debe ser satisfacer las necesidades humanas actuales y hacer posible atender a las futuras, conservando los sistemas naturales y restaurándolos en lo que sea necesario. Se trata, por tanto, de un complejo entrelazado de conocimientos, actuaciones, restricciones y orientaciones, que se basan en conceptos físicos, químicos, biológicos, hidrológicos, económicos, sociales y políticos que son difíciles de aunar, compaginar y manejar, pero que se debe abordar con los medios adecuados. Algunos de ellos están aún poco experimentados, tales como la participación efectiva de los usuarios o el valor del agua en la Naturaleza como punto de partida de valoraciones económicas. En ello juega un papel importante la ética y los fundamentos morales, para orientar

el comportamiento entre humanos y la naturaleza, y con consideración del carácter trascendente del hombre (Custodio, 2009b; Llamas et al., 2009). Se trata de algo en lo que aún hay poca experiencia y que admite múltiples enfoques y vías de solución. No hay un resultado único, lo que requiere definir objetivos consensuados que en general suelen evolucionar a lo largo del tiempo.

Tradicionalmente la gestión se había tratado sectorialmente, dejando de lado los otros ámbitos de lo que es un sistema interrelacionado. Tal ha sido el caso del agua. A esta sectorialidad ha contribuido mucho la definida especialización de los ejecutores y administradores –muchas veces forzada por el marco administrativo y sin intención personal–, con frecuente exclusión de otros profesionales y expertos. El carácter global

de la actividad humana hace que los comportamientos guiados por un enfoque sectorial hayan conducido a situaciones insostenibles y a competencias absurdas entre grupos profesionales que poco tienen que ver con la debida gestión.

Existen dos errores fundamentales relacionados con la mayoría de las políticas de gestión de los sistemas naturales. El primer error está relacionado con la presunción de que las respuestas de los ecosistemas al uso humano son lineales, predecibles y controlables. El segundo está relacionado con el supuesto de que los humanos y la naturaleza son entidades diferentes que pueden ser conceptuadas y gestionadas independientemente. Sin embargo, las evidencias acumuladas en diversas regiones del planeta sugieren, por un lado, que los comportamientos de las relaciones naturaleza-sociedad pueden distar mucho de ser lineales, con cambios a veces rápidos. Por otro lado, la naturaleza y la sociedad hay que conceptuarlas como un sistema socioecológico, dado que la sociedad humana es parte de la biosfera y sus actividades están ensambladas en el sistema ecológico.

Desde las políticas de gestión más tradicionales se supone una respuesta gradual, suave y predecible respecto a los cambios impuestos, y que la naturaleza está o tiende a un estado de equilibrio o cuasiequilibrio. Así, el modelo de gestión denominado “dominio y control” se relaciona con actividades que se supone que conducen al sistema natural hacia un estado de equilibrio que hay que mantener. Se buscan situaciones de mínima complejidad e incertidumbre en un contexto cambiante y eso lleva a que todo cambio se considere una degradación, por lo que se argumenta que es necesario controlar las perturbaciones naturales o sus efectos.



En oposición al modelo de “dominio y control” se encuentra el modelo de la “gestión de la resiliencia”, que acepta el cambio como algo inherente a cualquier sistema natural o humano. De una forma simple la resiliencia se relaciona con la capacidad de un sistema, ya sea ecológico o social, de adaptarse al cambio y tolerar las perturbaciones sin colapsar a un estado no deseado. Desde esta perspectiva, los cambios lineales y suaves pueden ser interrumpidos de forma repentina y drástica por perturbaciones naturales que no se pueden predecir ya que responden a un comportamiento caótico o con retroalimentaciones mal

Uno de los pocos pozos agrícolas del Plan de Transformación Agraria Almonte-Marismas que sigue funcionando muy cerca del arroyo de La Rocina, junto a la carretera que va al Palacio del Acebrón. Foto: MM.

conocidas o insospechadas, o que responden a sistemas “flip–flop”, o sea con dos estados metaestables que perduran mientras las excitaciones no sobrepasen un cierto umbral, pero que cambian rápidamente cuando el umbral se rebasa.

Los ecosistemas funcionales, y en especial la biodiversidad que albergan, constituyen un capital natural que es necesario conservar, al menos en unos niveles mínimos aceptables, ya que generan toda una serie de servicios a la sociedad tales como regulación hídrica y de la composición química, alimentos, madera, agua, secuestro de carbono, regulación hidrológica, depuración del agua, polinización, control de enfermedades, etc., además de los valores estéticos, recreacionales o espirituales. Todos estos servicios de los ecosistemas son esenciales para el bienestar humano en términos de su salud, economía, relaciones sociales, libertades y seguridad.

Por tanto, la forma más práctica y efectiva de enfrentarse al desafío del cambio y sus componentes es construir resiliencia en los estados deseados de los ecosistemas, es decir, en aquellos cuadros ecológicos que tienen mayor valor social en términos de la calidad del flujo de servicios de los ecosistemas, o sea, aprender y adaptarse al cambio. Eso implica una visión global, abandonando las concepciones de ausencia de límites del pasado, así como las de carácter sectorial.

Este es el cambio de paradigma hacia el que hay que moverse, y eso supone modificar tradiciones seculares y supuestos derechos consolidados. Esto requiere capacidades humanas que hay que crear –más que en individuos, en equipos– y su plasmación después en acciones concretas. Esto se refiere a instituciones públicas, organizaciones de usuarios y responsables de la salud del Planeta.

La realidad actual es muy distinta y se requiere un progreso que conviene que sea rápido, dentro de la inercia de los grandes sistemas (Custodio, 2009b). Éste es el gran reto de la gestión del agua en Doñana, y en concreto de las aguas subterráneas, en el que las instituciones tienen un papel central.

Instituciones con competencia o interés en el agua en el Área de Doñana _____

En la gestión del agua en Doñana, y en concreto de las aguas subterráneas, tradicionalmente ha intervenido un amplio conjunto de instituciones, con mayor o menor influencia y responsabilidad, y en ocasiones poco coordinadas, cuando no contrapuestas. Estas instituciones están en rápida evolución, de modo que es difícil situar el contexto de un determinado momento, y más aún hacer prospectivas. La competencia máxima en la gestión de aguas en la Administración General del Estado ha correspondido al Ministerio de Medio Ambiente (o el que asuma esas competencias con la designación oficial del momento, que actualmente es el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino), a través de las Confederaciones Hidrográficas del Guadalquivir y del Guadiana, en sus respectivos territorios, aunque la mayor parte del Área de Doñana está encuadrada en la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Recientemente la situación institucional y administrativa ha cambiado pues la gestión de la parte de la Confederación Hidrográfica del Guadiana ha pasado, entre 2005 y 2006, a la Agencia Andaluza del Agua (AAA) de la Junta de Andalucía, en lo que ahora es el Distrito Hidrográfico

Tinto–Odiel–Piedras de la Cuenca Atlántica Andaluza. Por otro lado, buena parte de las competencias de la CHGQ en el Área de Doñana han pasado en 2008 a la AAA. Esta simplificación administrativa es un paso adelante para resolver los conflictos institucionales antes aludidos.

Por otro lado, los municipios tienen competencias en su territorio en cuanto a obras propias, abastecimiento y saneamiento, siempre y cuando estas actuaciones no estén acordadas e incluidas en Planes de Actuaciones de Interés General o Regional del Estado o de la Región.

En 2004 se amplió el Parque Nacional de Doñana en la resolución de 6 de Febrero y en 2005 una sentencia del Tribunal Constitucional declaró que el Parque Nacional de Doñana ha de tener una gestión única y atribuible a la Junta de Andalucía, con lo que se modificaron las competencias que tenía el entonces Ministerio de Medio Ambiente.

Las actuaciones en el ámbito del Parque Nacional de Doñana y las que le puedan afectar requieren informe del Consejo de Participación del Espacio Natural Doñana (que ha substituido al Patronato del Parque Nacional de Doñana en 2007), en el que están representadas diversas instituciones de la administración local, autonómica y estatal, además de organizaciones y agentes sociales y económicos, y de la comunidad científica. El antiguo Patronato no parecía ser el órgano adecuado para la armonización de intereses y la adecuada gestión, ni por su ámbito territorial, ni por su composición, ni por su fundamento legal, ni por su especialización. El nuevo Consejo, con representantes de las tres provincias por las que se extiende el Espacio de Doñana, tiene un grupo de trabajo de aguas. El



número de intereses a coordinar es elevado y los actores que intervienen tienen intereses que pueden ser contrapuestos, como son los de desarrollo turístico, desarrollo agrícola, mejoras urbanas, vertebración viaria del territorio y conservación y protección del medio natural y de los ecosistemas.

Teniendo en cuenta la situación que existía en la década de 1990, la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (*ver Capítulo 10*) aconsejó la creación de una institución específica para la gestión del agua en todo el territorio –el Consejo de Gestión del Agua, apoyado en un Consejo Científico–, con competencias encomendadas, ámbito de actuación amplio y dotada suficientemente en cuanto a órganos técnicos y a órganos administrativo–legales, con soporte científico, medios de financiación, independencia de los avatares políticos y representación suficiente y eficaz de los usuarios y ciudadanos. A falta de argumentos en contra o a favor de otra alternativa, sigue apreciándose como una buena

Fondo de la laguna del Caño del Loro en época seca.
Foto: EC.

Laguna de Charco del Toro, próxima a Matalascañas, drenada por las extracciones próximas de agua subterránea. La foto muestra la ejecución de un sondeo piezométrico y para reconocer el terreno. Foto: EC.



solución, que se debería explorar y, en su caso, llevar adelante, con el contenido, estructura y estatutos que sean más adecuados, salvo que se instrumenten otras vías más adecuadas.

Es difícil llevar a cabo una buena gestión institucional sin contar con los sujetos de esa gestión, que son los ciudadanos, y en particular los usuarios del agua, incluyendo entre ellos de forma destacada a la Naturaleza. A todos ellos se les denomina aquí usuarios del agua, aunque no lo sean

directamente; basta con que les afecte de alguna manera. Se trata de participar y corresponsabilizarse realmente en la gestión. No es tarea sencilla ni bien experimentada, ya que con frecuencia esos usuarios no son conscientes de su papel e intereses. También las instituciones oficiales ven con recelo la intervención de los usuarios para no perder poder y exclusividad. La vía de Comunidad de Usuarios de Agua, es potencialmente eficaz si no se crea para enfrentarse a los poderes públicos en vez de colaborar y asumir sus propias responsabilidades (Custodio et al., 2009).

En el caso de las aguas subterráneas, los usuarios, que son muy numerosos y variados, no pueden estar representados individualmente, y lo han de hacer mediante representantes a partir de asociaciones adecuadas. Salvo para casos de grandes obras, en que la asociación o comunidad haya sido constituida –a veces más por interés recaudatorio que de gestión–, hay poca experiencia aún en su constitución, a nivel mundial, y es un proceso lento, quizás generacional. Pero es necesario y requiere un esfuerzo colectivo de educación, información y organización, y el apoyo decidido de las propias instituciones públicas (López–Gunn, 2007; López–Gunn y Martínez–Cortina, 2006). Es importante lograr una visión integral de los aspectos a abordar y no caer en localismos (ámbitos municipales, gremios, poderes tradicionales). Estas Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas (CUAS) –a las que actualmente (2009) se les ha pasado a denominar por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Medio Ambiente Comunidades de Usuarios de Masas de Aguas Subterráneas (CUMAS)– o con cualquier otra denominación, son entidades de derecho público, y deben

incluir un órgano técnico y tener presupuesto de actuación (Codina, 2004). No se trata sólo de reunir a detentadores de derechos reales de agua, sino a todos los usuarios *sensu lato*, lo que incluye a la propia Naturaleza y a la sociedad civil en general y local. Este es un paso por dar y que requiere una nueva mentalidad –cambio de paradigma–. En la actual Ley de Aguas el concepto de usuario se restringe al de quien tiene un interés objetivable. No sucede así en legislaciones de otros países y la visión más amplia antes expuesta es la que subyace a la DMA europea.

La participación de los usuarios de agua afectados por las actuaciones en el Área de Doñana ha sido hasta ahora muy reducida y se limita a la escasa e insuficiente representación en los órganos de gobierno de las Confederaciones Hidrográficas, que es un ámbito más general y no específico del Área de Doñana, y a través de comunidades de regantes y municipios. Las asociaciones existentes son para fines agrícolas y no parecen el marco adecuado. Esta situación puede estar cambiando con las muy recientes modificaciones administrativas (*ver Capítulo 10* y lo dicho anteriormente).

Los usuarios de agua del Área de Doñana están muy poco organizados fuera de la representación que ostentan los propios municipios. A pesar de que el reconocimiento de derechos de extracción de agua para riego pueda encauzarse a través de la formación de comunidades de regantes, esta vía ha sido poco fructífera, bien sea por problemas de constitución, bien sea por carencia de título de propiedad legal de las captaciones. Las Autoridades del Agua encuentran así grandes dificultades para la tramitación de expe-

dientes de concesiones, y esos usuarios no tienen más voz que la que les puedan dar los tribunales ordinarios en base a los derechos que se les pueda reconocer, los cuales no siempre están claros y, en general, se reconocen con gran retraso.

En el Área de Doñana no ha habido intentos serios de crear Comunidades de Usuarios de Aguas Subterráneas dada la general desunión y falta de relación entre los usuarios, además de los problemas legales que tienen buena parte de las explotaciones. Al no existir CUAS esta posible vía de representación no ha sido establecida. En la vecina área del Aljarafe, que es el límite noreste de la Comarca de Doñana, se constituyó provisionalmente una CUAS, suma de comunidades a nivel municipal, a instancias de la CHGQ, a raíz de la declaración provisional de zona sobreexplotada. Pero su funcionamiento real ha sido más bien pobre y no ha continuado. Podría explicarse por haberse creado de arriba abajo, pero sin una demanda de base y apoyo social claro, además de las estériles rivalidades entre municipios.

Conclusiones _____

Las instituciones son el substrato básico necesario a una buena gestión de los recursos de agua, y esto es especialmente válido en el Área de Doñana, por los numerosos intereses en juego. Los aspectos institucionales son complejos, dependen mucho de circunstancias locales y pueden evolucionar rápidamente con el tiempo. Tal es el caso del Área de Doñana.

Las instituciones de la Administración pública, con el apoyo de leyes y normas, además de

conocimiento, suficiente observación y orientaciones éticas, son básicas y necesarias. No tienen por qué responder a un modelo determinado, pero deben cumplir con los principios de subsidiariedad, participación, solidaridad, representatividad, precaución y eficacia, además de disponer de un Consejo Rector adecuado a cada caso, como sería el Área de Doñana, con autoridad moral reconocida, aunque no necesariamente con poder ejecutivo.

Pero también existen las instituciones de la sociedad civil y de los usuarios del agua, que han de tener el adecuado peso y representatividad, y

que son fundamentales para mantener objetivos a medio y largo plazo. Esto es uno de los aspectos más novedosos y dificultosos, en especial en el caso de las aguas subterráneas del Área de Doñana. En este campo se requieren progresos urgentes y bien asentados, que si bien pueden ser iniciados por las instituciones de la Administración, crecen más sólidas y están mejor fundamentadas cuando su origen procede de la base. Las Comunidades de Aguas Subterráneas deberían jugar un papel importante en el Área de Doñana, como ya lo empiezan a jugar en otras áreas de España.

Capítulo XII



Vista aérea hacia el sur de la Aldea de El Rocío. A medio término la marisma de El Rocío a continuación del tramo final del arroyo de La Rocina (lado derecho) y su ensanchamiento final (La Boca), con el puente de la carretera de El Rocío a Matalascañas. Foto: CMA. JA.

Visión prospectiva del ciclo hídrico y de las aguas subterráneas en Doñana

Consideraciones generales

Con la prospectiva se trata de deducir los rasgos generales de una situación futura a partir de las tasas evolutivas actuales, en un contexto coherente en el conjunto, para formar uno o varios escenarios posibles, definidos por la probabilidad de que puedan llegar a realizarse.

La aplicación a Doñana tiene dificultades por ser un lugar de evolución rápida a la escala del siglo, abocada a una transformación continuada, natural y antrópica, tendente a la colmatación de sedimentos y climáticamente muy sensible. La presión humana, si bien ha sido pequeña en el pasado, en el presente es grande por la proximidad a la gran aglomeración urbana de Sevilla, la actividad del polígono industrial de Huelva y la demanda de lugares de playa y esparcimiento. Por otro lado, Doñana aísla el área de Cádiz-Jerez de la de Huelva, a modo de cuña,

y por eso hay una fuerte presión para cruzarla mediante vías rápidas de comunicación, que son en buena manera incompatibles con la existencia de una reserva natural. El hecho de que no haya habido penetraciones serias hasta el presente se debe a lo amplio del territorio y la magnitud de las dificultades de obra civil a resolver, pero las técnicas modernas hacen que actualmente el paso a través de un ancho estuario y de una amplia zona inundable pueda ser técnicamente abordable. Determinados sectores sociales promueven esas penetraciones buscando un progreso regional, corto de vista, que deja de lado o subvalora los esenciales valores naturales y su flujo de servicios a la sociedad. Además de estos cambios y presiones, están los que se producen en la Administración Pública del Agua y en la legislación, ya que en poco más de una década ha

cambiado totalmente el panorama, dejando muy inciertos los posibles escenarios futuros.

Por todas estas razones la prospectiva de Doñana es difícil, al ser lugar de encuentro de intereses diversos e importantes. Si en un momento determinado resulta que los intereses se orientan de una determinada forma, pueden dejar resultados e intervenciones que son poco o nada reversibles cuando el equilibrio entre los intereses se oriente de otra manera a causa de las cambiantes prioridades sociales. En el fondo, la problemática actual agricultura/turismo versus conservación no es más que el desplazamiento en un sentido en un cierto momento, para después reorientarse en otro al cambiar –evolucionar– los criterios sociales y ambientales, en un marco político también cambiante.



Consideraciones sobre el efecto del cambio global y climático pasado y futuro en la hidrología de Doñana _____

En el Área de Doñana se han producido cambios climáticos importantes a lo largo del tiempo, de los que queda constancia en los sedimentos, los restos vegetales que contienen y las variaciones isotópicas de algunos componentes. El cambio reciente más notable es el relacionado con lo que en Europa Central fue el paso del último periodo glacial al clima actual, lo que sucedió en el entorno de hace 11.000 años. No está tan definido como en otras áreas cuánto cambió la temperatura media. Parece que fue poco en relación con los 5 a 6 °C del norte de la Península Ibérica (Manzano et al., 2001; Vaikmae et al., 2001; Edmunds et al., 2001; Zazo et al., 2008).

Tampoco está definido cómo ha variado la precipitación, que en el clima de Doñana tiene más influencia en los recursos hídricos que la temperatura. Parece que ha disminuido la intensidad de las sequías estacionales, aunque no está claro cuánto ha cambiado la pluviometría media anual, en un posible contexto de mayor irregularidad. Estos cambios llevan consigo una evolución de la vegetación, del paisaje y del relieve, que es más lenta que el cambio climático y que afecta también a los balances hídricos. Todo ello es pobremente conocido.

Con posterioridad a la última época glacial se han tenido épocas más cálidas (lo fueron la Romana y el final de Medievo) y épocas más frías (inicio del Medievo, entorno del periodo entre los siglos XV–XVIII), en las que unas agrupacio-

Extracción del gas disuelto en el agua subterránea de un pozo en El Raposo (1997) para cuantificar el tiempo de tránsito del agua entre el acuífero aluvial del río Guadiamar y las gravas del acuífero Almonte–Marismas en esa zona, mediante el isótopo natural gaseoso ³⁹Ar. El agua extraída con una bomba se somete a vacío para separar los gases disueltos, los cuales se colectan en recipientes herméticos que se envían al laboratorio para medir las concentraciones de las especies a estudiar. Foto: MM.

nes vegetales desplazaron a otras, además de colonizar las áreas que progresivamente se han ido continentalizando. Esto ha sucedido con una cada vez mayor intervención humana, forzando la eliminación preferente de ciertas especies vegetales (por ejemplo las maderables) con respecto a otras. Hoy se está en una época más bien cálida. Sin embargo esos periodos ni han sido ni son épocas estables sino que presentan fluctuaciones térmicas y pluviométricas. Un periodo cálido puede incluir subperiodos muy fríos y un periodo húmedo puede incluir subperiodos muy secos, y viceversa.

Al cambio climático hay que superponer las modificaciones de uso del territorio –parte del cambio global–, en especial de la masa forestal (tala, repoblación, carboneo y recolección, modificación de aterrazamiento, etc.), cuyo efecto puede superar al climático, con efectos futuros difíciles de predecir y que podrían predominar.

Todo ello tiene una repercusión en la recarga a los acuíferos y en la humedad del suelo. Así, se puede facilitar la fijación de arena eólica o bien su movilización, afectando a la distribución de la vegetación (monte blanco frente a monte negro), de una forma aún pobremente conocida.

A largo plazo, los términos del balance hídrico y las relaciones entre los cuerpos de agua en Doñana serán probablemente sensibles al cambio climático futuro, al igual que lo han sido en el pasado, incluso en un pasado no lejano (Custodio et al., 2007). Esta información previa de lo que ha sucedido es sólo moderadamente conocida y está insuficientemente estudiada. Además de la componente natural existe una componente antrópica ya que el área ha sufrido cambios territoriales significativos desde antiguo, y en especial en los últimos 50 años. Ha habido periodos con im-

portantes efectos sobre la vegetación arbórea, a causa del cultivo intermitente, al pastoreo, la construcción de barcos y el fuego controlado (Stevenson y Harrison, 1992). Los cambios recientes incluyen la modificación de las comunidades vegetales por pinar y eucaliptal, y luego la eliminación parcial del eucaliptal en los últimos tres lustros, la creación de grandes superficies de regadío e incluso un posible efecto –aún poco conocido regionalmente– de contaminación atmosférica industrial procedente del área de Huelva. Para interpretar los cambios se dispone de series cortas de datos instrumentales. Como mucho, estos datos se remontan a principios del siglo XIX, y la mayoría son ya de bien entrado el siglo XX. Para fechas anteriores hay que recurrir a la escasa cartografía existente de la zona, a descripciones de visitantes y a escritos relativos a la caza. Al estar el área casi despoblada no existen datos eclesiásticos, que normalmente serían una notable y confiable fuente de información.

Los cambios esperables en cuanto al impacto hídrico pueden ser similares a los que prevé el informe de 2007 del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007). Según esos estudios, entre 1860 y la actualidad la temperatura media mundial se ha incrementado en 0,6 °C. A lo largo del siglo XXI cabe esperar un calentamiento que podría variar entre 1,4 a 5,8 °C. Sin embargo, los resultados varían mucho según el tipo de escenario y la posible evolución de la temperatura de fondo, que es desconocida. En cualquier caso, la incertidumbre no permite hacer afirmaciones seguras, tanto menos cuanto más lejano es el horizonte, y todo ello dentro de una notable variabilidad anual e interanual.

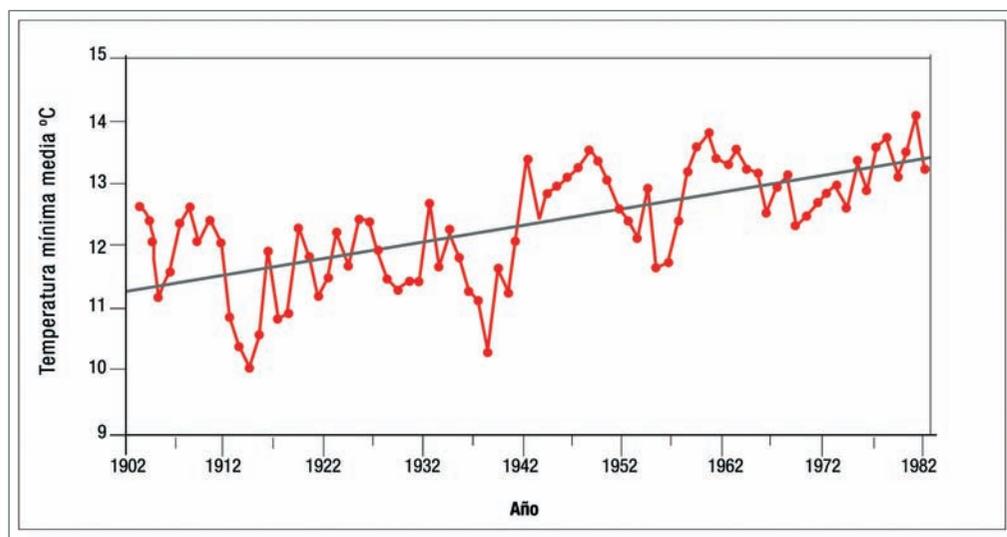


Figura 12.1. Evolución de las temperaturas mínimas mensuales en el sudoeste español durante el siglo XX. (Modificado de Sousa et al., 2006).

Según Sousa et al. (2006), desde principios del siglo XX en el Área de Doñana se tiene una tendencia sostenida al calentamiento, marcado por la media de las temperaturas mínimas mensuales, de alrededor de $0,027\text{ }^{\circ}\text{C/año}$, que es pequeña (casi nula) en la primera mitad del siglo y aumenta ($0,06\text{ }^{\circ}\text{C/año}$) en la segunda mitad (ver Figura 12.1). Ésta está en consonancia con la mayor actividad humana mundial, y parece acelerarse aún más en los últimos años. No obstante, estas deducciones hay que tomarlas con las debidas precauciones, dada la complejidad asociada y los muchos factores que influyen, parte de ellos de origen antrópico.

Según los mismos autores, el posible impacto del cambio climático futuro sobre la precipitación atmosférica es muy incierto y modifica incluso su signo según los escenarios que se consideren. Se indica que podría haber sucedido un descenso de la precipitación en Doñana en el último medio siglo de hasta el 10%, pero es algo a confirmar ya que los grandes ciclos globales, como los asociados

al fenómeno El Niño–La Niña, que en el Área de Doñana están ligados a la Oscilación Noratlántica, tienen un gran papel en la secuencia pluviométrica. Por eso en el *Capítulo 5* no se hace mención de este hecho, pero se muestra la gran variabilidad histórica y el hecho de que periodos cortos de observación puedan llevar a evaluaciones desviadas respecto al comportamiento general.

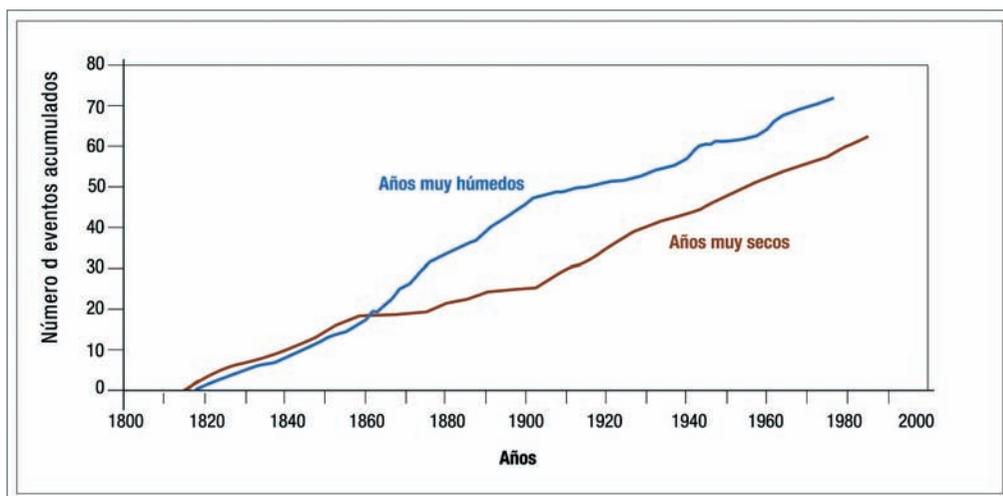
En la hipótesis de un descenso pluviométrico, que irá probablemente acompañado de un aumento de la evapotranspiración debido al incremento de temperatura, y quizás de la escorrentía superficial de tormenta, no sólo el ciclo de llenado–vaciado de la marisma puede quedar afectado sino también la recarga a los acuíferos. Como consecuencia, la prudencia y precaución aconsejan tratar de disminuir el estrés hídrico actual para dejar mayor margen de maniobra en la conservación del medio natural, evitando alcanzar grados de compromiso que puedan obligar a duras y difíciles acciones correctoras futuras, o a pérdidas ecológicas importantes.

Como se indica en el *Capítulo 5*, la evolución de la pluviometría dispone de un registro más largo que la temperatura si se toman las estaciones de San Fernando (Cádiz) y Sevilla–Tablada (completada). En el periodo 1882–2000 la primera de ellas tiene una precipitación media de 505,6 mm/año y la segunda de 574,4 mm/año, con los respectivos valores medios de los coeficientes de variación anuales de 0,28 y 0,32 (García Barrón et al., 2004).

No se ve una tendencia de evolución claramente manifiesta, pero se identifica un periodo húmedo entre 1860 y 1900, y otro entre 1960 y 1972 (Sousa et al., 2004). Un tratamiento más detallado realizado por esos autores para identificar la secuencia de años muy secos y años muy húmedos muestra, mediante acumulación del número de años muy secos y muy húmedos (*Figura 12.2*), que en el periodo 1860–1990 se produce un aumento de años muy húmedos y que desde 1910 la frecuencia de años muy secos es mayor.

Sousa et al. (2006) interpretan que esto tiene un impacto sobre las lagunas de El Abalario, con una progresiva aridificación desde 1900 y reducción de la superficie y cambio en la vegetación, de la que solo quedarían restos de la que se adaptó al clima más húmedo precedente, y ello antes de que se hubiera producido los efectos antrópicos de las últimas décadas. Todo esto hay que tomarlo con precaución, ya que la Pequeña Edad del Hielo (periodo frío que afectó al Hemisferio Norte del planeta entre finales del siglo XIV y mediados del siglo XIX) habría producido una anomalía por exceso hídrico en el conjunto lagunar respecto a épocas anteriores, de las que apenas hay datos. Así, el retroceso lagunar que se observa en la actualidad en el entorno de El Abalario podría estar causado por una fluctuación de largo periodo. De todos modos, es difícil tomar postura por cuanto la evolución lagunar no sólo es climática sino de removilización de arenas, que unas veces colmatan depresiones, otras aumentan el relieve y otras

Figura 12.2. Representación de la frecuencia acumulada del número de años muy húmedos y de años muy secos, para la estación pluviométrica de San Fernando, Cádiz. (Modificado de Sousa et al., 2006).



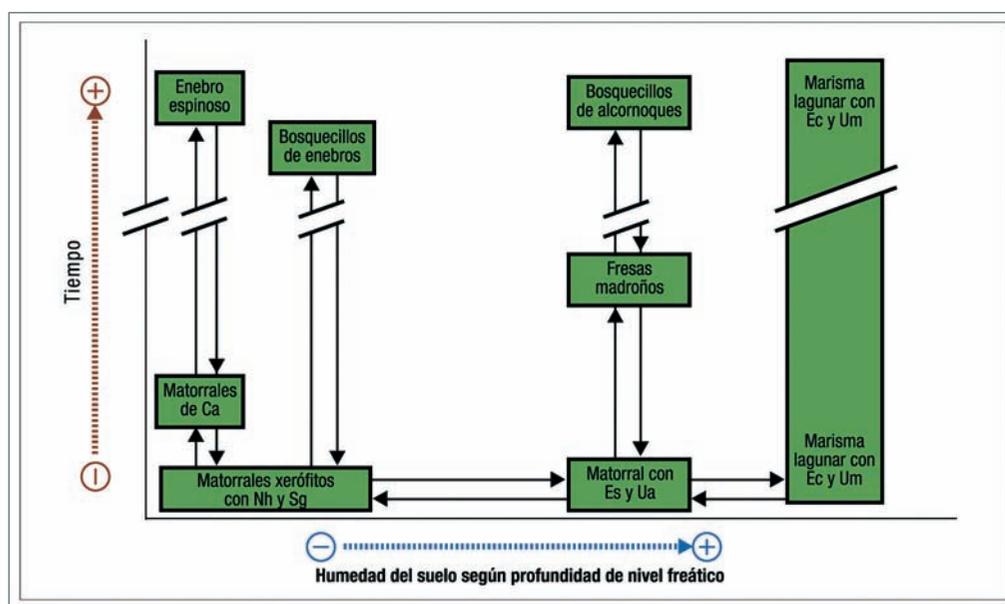


Figura 12.3. Factores que gobiernan las relaciones entre las diferentes unidades de vegetación en el Área de El Abalarío (modificado de Sousa y García-Murillo, 2003). Ca=Corema album; Hh=Halimiuo halimifolium; Sg=Stauraconthus genistoides; Es=Erica scoparia; Ua=Ulex australis; EC=Erica siliaris; Um=Ulex minor.

obstruyen rasgos de drenaje, de una forma compleja, con escaso pero no nulo efecto antrópico.

Partiendo de un Medioevo con periodos muy secos, se vuelven a encontrar varios periodos notablemente secos a mediados de siglos XVI y a mediados del siglo XVIII, más otro entre 1639 y 1659. Hay secuencias de periodos húmedos a finales del siglo XVI e inicios del XVII (1590–1630), a finales del siglo XVIII (1780–1800) y luego entre 1830 y 1870 (Sousa y García-Murillo, 2003 y 2005). Según estos autores, algunas de las consecuencias documentables desde finales del siglo XIX sería la total desaparición en 1956 de la laguna estacional que ellos mencionan con la designación de Invierno (aproximadamente por donde hoy están las Lagunas de Moguer) y de la laguna pantanosa de La Mediana, con una pequeña reducción de la longitud de cursos fluviales. Indican que entre 1956 y 1987 las lagunas de marisma se reducen

(cifras redondeadas) de 1500 a 180 ha, mientras las lagunas estacionales crecen de 575 a 625 ha y la superficie de monte negro (*Erica scoparia* y *Ulex australis*) crece de 155 a 910 ha por colonización de superficie de lagunas preexistentes. También indican que en ese periodo la longitud de ríos decrece. En ese periodo las lagunas turbosas de Ribatehilos se reducen en número de 180 a 30 (Sousa et al., 2006). Sin embargo, hay que considerar que los efectos antrópicos por extracciones intensivas de agua subterránea y por alteración territorial son ya posiblemente apreciables desde 1950, y en especial desde 1975.

En la Figura 12.3 se esquematizan las relaciones entre humedad del suelo y tiempo.

Cabe aquí considerar que el relieve de Doñana en el área de las arenas está muy bien acoplado con la profundidad del nivel freático, y que éste es muy sensible a la recarga. Poco se sabe cómo ha jugado esta relación en el pasado y qué papel tiene en

cuanto a la extensión de los mantos eólicos, pero es probable que haya una buena ligazón. De hecho, los cambios artificiales recientes en la cobertura vegetal han tenido un impacto considerable y complejo, poco estudiado y mal conocido. La reforestación de ciertas áreas puede desecar otras, lo que facilitaría la movilización de arena en unos lugares y su retención en otro lugar, en especial si hay un sotobosque suficiente. La deforestación facilita una mayor recarga y por lo tanto un ascenso de los niveles freáticos, con reactivación de la red de drenaje local y atrapamiento de arena y sedimento. Es difícil prever la evolución futura ya que depende de las intensidades de cambio y la tasa de modificación, de cómo se adapte la vegetación y de la cantidad de arena disponible para ser transportada.

Un impacto de magnitud importante es el que corresponde al progresivo incremento del nivel del mar, que en el mar Cantábrico y parte del litoral Atlántico parece estar entre 10 y 15 mm/a y alrededor de 7 mm/a para el Mediterráneo. Estas tasas pueden cambiar bruscamente y acelerarse si en un momento determinado se afectase la circulación oceánica general, y en especial el circuito transportador de calor del Océano Atlántico. Las previsiones del IPCC de incremento del nivel del mar entre 0,5 y 0,7 m hacia 2050 parecen razonables, a pesar de ser inciertas. La consecuencia sería que la frecuencia de inundación y la distribución de la salinidad en la marisma de Doñana podrían alterarse sensiblemente. Aquí tiene un efecto importante la tasa de colmatación y la influencia de obras de ingeniería para facilitar o dificultar el intercambio marisma–estuario. No parece haber estudios prospectivos al respecto. También se aceleraría la tasa de erosión litoral entre Matalascañas y Mazagón, pero no se sabe la cantidad de

arena que movilizará la deriva litoral y cuánta estaría disponible para transporte eólico, ni como evolucionarían y como se reforzarían naturalmente las barras litorales, y la propia Montaña del Río, si ésta no es eliminada.

Las evoluciones observadas deben interpretarse según la “memoria” hidráulica del acuífero. Como se comenta en el *Capítulo 8*, los modelos matemáticos de régimen transitorio indican que el periodo para que desaparezcan los efectos de una perturbación en los niveles y caudales de descarga es del orden 30 a 50 años (Lozano, 2004), o sea de una a dos generaciones humanas. Así pues, el acuífero, en sus diversas partes, no guarda memoria del efecto hidráulico de acontecimientos climáticos de periodo largo pero sí de los recientes. Por otro lado, el tiempo medio de renovación del agua en el manto eólico se estima en unos 75 años. Así, la memoria a los cambios químicos e isotópicos ambientales es similar o sólo algo mayor que la hidráulica, y únicamente se conserva recuerdo de los acontecimientos relativamente recientes, salvo en las partes más profundas y alejadas del sistema acuífero.

Esos acontecimientos relativamente recientes son la introducción de las ya mencionadas extensas plantaciones arbóreas de pinos y eucaliptus hace entre 50 y 60 años, la ocupación territorial agrícola y humana hace entre 30 y 40 años y la supresión de parte de las superficies de eucaliptus durante los últimos tres lustros. Por esto, tanto los niveles piezométricos (residualmente) como las características químicas e isotópicas de las aguas subterráneas están en régimen no estacionario, evolucionando en respuesta a la perturbación que supusieron esos cambios en la relación recarga/descarga.

Probablemente los cambios territoriales continuarán y por lo tanto se seguirán produciendo cambios en la recarga y descarga de los acuíferos, los cuales afectarán a las aguas subterráneas y, a su través, a las salidas naturales y lagunas, con largas evoluciones transitorias. Así esos cambios se suman a la variabilidad climática. Para poder cuantificar los tiempos característicos es necesaria la modelación matemática.

Las predicciones de cambio climático futuro en un plazo de 50 años parecen apuntar a que se producirá un aumento significativo de temperatura, pero sin que quede claro cómo evolucionará la precipitación ni su régimen, aunque posiblemente dicho régimen se hará más irregular. Muchos escenarios posibles llevan a un descenso de la precipitación anual, lo que junto a la mayor temperatura y mayor irregularidad, y con la vegetación actual (antes de que evolucione), parece apuntar a una menor recarga. Este es un aspecto susceptible de modelación una vez definidos los escenarios previsibles, cosa que aún no se ha llevado a cabo para Doñana con el nivel de detalle necesario.

Consideraciones sobre la sustentabilidad de la conservación y del desarrollo social en Doñana en relación con los recursos hídricos subterráneos

A finales de la década de 1960 se tomaron decisiones de gestión territorial que pudieron parecer razonables en el contexto desarrollista de aquellos años, pero que fueron desafortunadas en el contexto actual de valoración de los ecosistemas de Doñana y de la demanda social a nivel local, nacional e internacional de conservación.

Esto se refiere fundamentalmente a la ocupación arrocera de la marisma, al plan de regadío Almonte–Marismas, a la permisividad de extracciones agrícolas del área de Moguer, a la promoción turística de la costa (principalmente Matalascañas y en cierto modo Mazagón) y a la falta de normativa eficaz sobre el grado de crecimiento urbano. A esto se unen actuaciones en la marisma que se pueden calificar de duras, que han modificado de forma importante al régimen hídrico y la distribución de salinidad y composición química, y que en parte se han intentado corregir dentro del Proyecto Doñana 2005.

En estas condiciones es normal encontrar continuos conflictos entre la presión social de desarrollo y la necesidad de conservar y restaurar, en un contexto en el que con frecuencia se ven más las contraposiciones que los intereses comunes. Así, se ha llegado al punto de haber tildado al Parque Nacional de Doñana y sus áreas asociadas de enemigo social, y de enfocar la protección como una enmienda a la Naturaleza y una acción contra los habitantes locales, acercando el Parque Nacional hacia lo que sería un gran zoológico. Afortunadamente, el paso del tiempo ha permitido centrar ideas, buscar acuerdos y sinergias y actuar más prudentemente, aunque aún queda un buen trecho por recorrer en lo que se marcaba como ideal en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992)

El agua sigue siendo un actor principal en el conjunto, ya que está en la esencia de los valores ecológicos del lugar y es la base del desarrollo humano existente. Así pues, hay una competencia por un recurso que, sin ser aún escaso, si se dedica a una actividad, a medio y largo plazo no



Perforación a rotación por circulación directa de un sondeo de reconocimiento y piezométrico en Matalascañas (Surfasaurus-Depuradora) en 1991 por un equipo del SGOP. Foto: EC.

está disponible para otra actividad, aunque a corto plazo no se aprecie afección por consumirse reservas. Además, ello puede comportar cambios notables en la calidad química, también de gran importancia, a lo que en general se le ha prestado menor atención y es poco conocido, como suele suceder en territorios de clima semiárido. Esto es principalmente válido para el agua subterránea, que es el principal recurso hídrico local.

En la realidad se ha asistido a una notable merma de caudales de La Rocina, y con ello de su contribución permanente a la marisma. Se ha desecado buena parte del ecotono norte, donde ha ido desapareciendo vegetación, y ha cambiado el régimen (hidroperiodo) y el modo en que numerosas formaciones palustres reciben el agua, tal como se expone en el *Capítulo 9*.

La restauración supone restituir el agua a sus descargas naturales mediante la progresiva reducción de las extracciones en las áreas próximas a

las zonas de mayor interés. Esto incluye la cuenca del arroyo de La Rocina y el contorno de la marisma, y hace referencia principalmente a la agricultura de regadío con agua subterránea, en especial a la más consumidora de agua –la del arroz– en cuanto a cantidad, que es el aspecto mejor analizado hasta ahora. Pero no debe olvidarse el aspecto cualitativo, de efectos notablemente diferidos, al que se ha dedicado mucha menos atención. Eso apunta en la dirección de lograr una agricultura menos extensiva, menos agresiva y con menor aplicación de productos agroquímicos, lo que posiblemente choque con el suelo pobre que ofrecen las arenas en numerosas áreas. Sin embargo, una buena tecnificación de riego, como la que se está instalando, con consideración de sus impactos, puede aliviar en el futuro muchos aspectos negativos.

Los recursos hídricos locales son lo suficientemente importantes como para poder atender sin gran conflicto a las necesidades poblacionales, con tal de que la distribución sea menos concentrada y que las aguas usadas que se produzcan no supongan un riesgo a la calidad de los otros recursos, sino un potencial nuevo recurso utilizable en áreas verdes, tras el adecuado tratamiento.

La restauración también supone que las aguas residuales de cualquier origen que se encuentren en el área de Doñana, y en especial las que afectan a la marisma y ecotonos, estén suficientemente depuradas y con garantía, y en lo posible devueltas al acuífero. En esta línea el progreso ha sido lento y aún no hay líneas prospectivas claras.

Existen planes para solucionar parte de los problemas de demanda de agua para riego y poblacional mediante la importación de agua de



Carretera de Mazagón a Bodegones, rota en el cruce con uno de los afluentes de la cabecera de La Rocina como consecuencia de las lluvias intensas de 1998. Foto: MM.

cuenas exteriores. Tal es la traída de aguas del pequeño embalse del Corumbel para abastecimiento de Rociana–Almonte, o la transferencia de agua desde el lado de Huelva (sistema del Chanza–Piedras) o quizás desde el embalse del río Agrio, en la cuenca alta del Guadiamar, para complementar y substituir aguas subterráneas utilizadas en regadío.

La importación de pequeñas cantidades de agua para solucionar problemas de abastecimiento urbano, cuando la solución local no es razonable ni segura, bien sea por caudales o por calidad, no es un problema importante si los vertidos que se derivan son depurados suficientemente y en lo posible salen del área. No obstante, éste no es el caso en Doñana, donde la calidad del agua subterránea local es suficiente para el

abastecimiento a la mayor parte de los núcleos urbanos, siempre que la cantidad se mantenga dentro de unos límites que eviten afecciones a la calidad, y que la ubicación e intensidad no dañe en exceso a los valores ecológicos. Es importante saber que hay áreas que ya tienen contenidos elevados de nitratos, entre ellas La Rocina y el entorno de los Sotos en La Vera, aunque el origen del nitrato en esta última zona aún no está claro según los estudios propios en marcha.

Otra cosa son los caudales mucho mayores para regadío, que pueden tener notables impactos, tales como el aumento de la escorrentía superficial (y de la movilización y reubicación de arenas) por los excedentes de riego, la elevación de niveles freáticos y los consiguientes cambios de calidad del agua superficial y subterránea que puedan com-

portar. No se trata de cerrar pozos aportando agua de otro lado. El problema debe analizarse en su conjunto y evaluar todas las repercusiones. El nuevo paradigma mundial sobre el funcionamiento del medio natural exige apartarse de actuaciones de simple cirugía hídrica, pues hoy se sabe que los problemas son complejos y profundos y que las repercusiones de una actuación parcial pueden suponer consecuencias no deseables a medio plazo sobre partes del sistema que inicialmente no estaban afectadas. De ahí la necesidad de una buena, flexible y progresivamente actualizable planificación prospectiva, consensuada por todos los estamentos afectados e interesados.

Por ejemplo, si no fuese posible restaurar al completo las descargas por los ecotonos y La Rocina, lo razonable sería establecer unos objetivos mínimos de descarga –y de la calidad de la misma– basados en un análisis por parte de expertos en ecología e hidrología, y tras una amplia discusión para buscar un consenso. En cualquier caso, éste y otros aspectos del ciclo hídrico en Doñana deberían ser objeto de una valoración prospectiva.

Conclusiones _____

El cambio es algo inherente al devenir de la Tierra y de la vida humana, que hay que aceptar, adaptarse al mismo y suavizar sus efectos, pero

que no se puede anular a menos de inmensos costes, que con frecuencia acaban por no resolver lo que se quiere corregir y que puede llevar a degradaciones o callejones sin salida.

Así, Doñana es un paradigma de cambio en tiempo geológico, en tiempo histórico y en tiempo humano, y se van a seguir produciendo cambios. Esos cambios –además de los relacionados con los grandes procesos geológicos– son en parte de origen climático y en parte de origen antrópico, es decir debidos a la acción del hombre, los cuales con frecuencia pueden ser dominantes, y posiblemente seguirán siéndolo. Y esto se refiere no sólo al medio físico, hídrico y biótico, sino también a los aspectos económicos y sociales.

Por ello la conservación de la Naturaleza y de los recursos no ha de buscar objetivos inmovilistas, sino dinámicos, suavizando las transiciones y reduciendo los impactos antrópicos. También la restauración no ha de ser volver al pasado, sino coevolucionar ordenadamente, y por supuesto no es reducir unas actividades para mantener o incrementar otras.

Cómo actuar y avanzar es el entrelazado entre la voluntad social a largo plazo –y la política a corto plazo–, el buen conocimiento del medio, la ética social y ambiental, y el poder público ejercido correctamente como servicio y no como objetivo. Doñana puede ser y debería ser un ejemplo paradigmático.

Referencias



Vista aérea del tramo final del río Guadalquivir con la vegetación de pinos en el Malandar, el extremo final de la fecha arenosa de Doñana.

Foto: JHG.

- Alcalá, F.J. (2006). Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico. Tesis Doctoral. Dpto. de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña. 719 pp (2 vols: memoria y anexos).
- Alcalá, F.J. y Custodio, E. (2005). Use of the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in some coastal aquifers of Spain. En: *Groundwater and Saline Intrusion*, 18 SWIM. Cartagena. IGME. 481–497.
- Allan, J.A. (1993). Fortunately there are substitutes for water, otherwise our hydro-political futures would be imposible. *Priorities for Water Resources Allocation and Management*. London, United Kingdom: ODA: 13–26.
- Álvarez, S. (2002). Descomposición de material orgánica en lagunas someras del Manto Eólico Litoral de Doñana. Tesis doctoral. Fac. Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid: 1–518.
- Arenas, J.M., Montes, C. y Borja (2003). The Guadimar green corridor: from an ecological disaster to a newly designated natural protected areas. *Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía*.
- Baonza, E., Plata, A. y Silgado, A. (1984). Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Madrid, Cuadernos de Investigación C7: 1–139.
- Berkes, F. y Folke, C. (eds) (1998). *Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience*. Cambridge, Unic. Press, UK.
- Berkes, F., Holding, J. y Folke C. (eds) (2003). *Navigating social-ecological systems: Building resilience for complexity and change*. Cambridge, Unic. Press, UK.
- Bernués, M. (1990). Limnología de los sistemas acuáticos del Parque Nacional de Doñana. Tesis doctoral. Fac. Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid: 1–242 + Ap.
- BGM (2001). Las aguas y los suelos tras el accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, Vol. Especial. Madrid: 1–294.
- Borja, F., Díaz del Olmo, F. (1992). Sector oriental del acantilado de El Asperillo (litoral de Huelva, SO de España): formaciones y cronologías. *Mediterranean and Black sea shorelines*. INQUA Newsletter, 14: 87–93.
- Borja, F. y Díaz del Olmo, F. (1994). Geomorfología del manto eólico litoral de El Abalarío (Huelva). *Geomorfología en España*. (eds. Arnéz, J.; García Ruíz, J.M. y Gómez Villar, A.). Sociedad Española de Geomorfología, Logroño. 327–338.
- Castro, A. (1999). Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte-Marismas y su entorno. Tesis de Máster en Hidrología Subterránea. UPC-FCIH. 1–134 + anejos.
- CHGQ (1993). La gestión hidráulica del Parque Nacional de Doñana. Secretaría de Estado para las Políticas de Agua y Medio Ambiente. Dirección General de Obras Hidráulicas. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. 1–69.
- CHGQ (2004). Análisis de las Extracciones de agua subterránea en la cabecera de la cuenca del arroyo de La Rocina. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, informe interno.
- CHGQ (2005). Informe resumen de los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua. Informe preparado por Tecnomia para la CHGQ y para el Ministerio de Medio Ambiente. 99 pp + planos.
- CIED (1992). Dictamen sobre estrategias para el desarrollo socioeconómico sostenible del entorno de Doñana. Comisión Internacional de Expertos sobre el Desarrollo del Entorno de Doñana. Junta de Andalucía. Sevilla: 1–123.
- Clemente, L., García, L., Siljestrom, P. (1998). Los suelos del Parque Nacional de Doñana. Ministerio de Medio Ambiente, Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Colección Técnica: 1–205.
- Clemente, L., Ventura, L., Espinar, J.L., Cara, J.S. y Moreno, A. (2004). Las marismas del Parque Nacional de Doñana. *Investigación y Ciencia*, Mayo: 72–83.
- CMA (2008). La Restauración ecológica del río Guadimar y el proyecto del Corredor Verde: La historia de un paisaje emergente. *Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía*. Sevilla, 2008.
- Codina, J. (2004). Las aguas subterráneas: una visión social: el caso de la Comunidad del Delta del Llobregat. *Rev. Real. Acad. Cien. Exac. Fis. Nat. (Esp.)*. Madrid, 98(2): 323–329.
- Coletto, M.C. (2003). Funciones hidrológicas y biogeoquímicas de las formaciones palustres hidrogénicas de los mantos eólicos de El Abalarío-Doñana (Huelva). Dep. Interuniversitario de Ecología. Universidad Autónoma de Madrid. Canto Blanco, Madrid. Tesis Doctoral.
- COPTA (2003). Plan de ordenación del territorio del ámbito de Doñana. *Consejería de Obras Públicas y Transporte. Junta de Andalucía*.
- Corominas, J. (1999). Experiencia sobre control de las extracciones para uso agrario en el acuífero Almonte-Marismas. *Medida y Evaluación de las Extracciones de Agua Subterránea*. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid: 55–68.
- Custodio, E., Llamas, M.R., Hernández-Mora, N., Martínez Cortina, L., Martínez-Santos, P. (2009). Issues related to intensive groundwater use. *Water Policy in Spain* (A. Garrido and M.R. Llamas, eds.). CRC Press, Taylor & Francis / Balkema. London: 143–162.
- Custodio, E., Manzano, M., Dolz, J. 2006.- Hidrología de la Comarca de Doñana. *Fundación Doñana 21*, Sevilla.
- Custodio, E. (1993). Preliminary outlook of saltwater intrusion conditions in the Doñana National Park (Southern Spain). En: *12 Saltwater Meeting Study and Modelling of Saltwater Intrusion into Aquifers*. CIHS, CIMNE-UPC, Barcelona. 295–315.
- Custodio, E. (1995). El papel de la hidrología en los programas de restauración de humedales en ambientes fluctuantes. En: *Bases Ecológicas para la Restauración de Humedales en la Cuenca Mediterránea*. *Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía*. Sevilla: 43–60.
- Custodio, E. (1999). Alteraciones en los registros térmicos por flujo vertical de agua a lo largo de perforaciones. *Bol. Geol. Min.* 110(4): 371–390.
- Custodio, E. (2000). Groundwater-dependent wetlands. *Acta Geologica Hungarica*, 43(2): 173–202.

- Custodio, E. y Llamas, M.R. Eds (1976; 1983). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 Vols., 1–2350.
- Custodio, E., Bruggeman, G.A. (1987). Groundwater problems in coastal areas. UNESCO. *Studies and Reports in Hydrology* nº 45. Paris: 1–576.
- Custodio, E. y Palancar, M. (1995). Las aguas subterráneas en Doñana. *Revista de Obras Públicas*. 142 (3340): 31–53.
- Custodio, E., Manzano, M., Iglesias, M. (1996). Análisis térmico preliminar de los acuíferos de Doñana. IV Simposio sobre el Agua en Andalucía (SIAGA-96). Almería. II: 57–87.
- Custodio, E., Manzano, M. (2007). Groundwater quality background levels. *Groundwater Science and Policy: An International Overview* (Ed. P. Quevauviller). The Royal Society of Chemistry, RSC Publ.: 193–216.
- Custodio, E., Manzano, M., Escaler, I. (2007). Recarga a los acuíferos y cambio global: aplicación a Doñana. *El Cambio Climático en Andalucía: Evolución y Consecuencias Medioambientales*. Consejería de Medio Ambiente (Junta de Andalucía), Sevilla: 106–124.
- Custodio, E., Manzano, M. y Montes, C. 2006.- Recursos de agua en la Comarca de Doñana. II Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana (Inf.01, Bases II PDSO). (Edición electrónica). Fundación Doñana 21. Sevilla.
- de Haro, J.M., Giráldez, J.V., Ordóñez, R., Custodio, E., Iglesias, M., Manzano, M. y López, J.J. (2000). Variación temporal de la recarga al acuífero freático del Parque Natural de Doñana, Huelva. *Boletín Geológico y Minero*. Vol. 111–1: 77–88.
- DAS (2006). Directiva del Agua Subterránea, Directiva 2006/118/EC sobre protección del agua subterránea contra la contaminación y el deterioro. Comisión Europea. Bruselas.
- DEHMA (2001). Estudio hidrológico-hidráulico de la cuenca del Guadalquivir. Departamento de Ingeniería Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- DMA (2000). Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas [Diario Oficial L 327 de 22.12.2000].
- Duarte, C., Alonso, S., Benito, G., Dacha, J., Montes, C., Pardo, M., Ríos, A., Simo, R. y Valladares, F. (2007). Cambio global: impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Edmunds, W.M., Hinsby, K., Marlin, C., Melo, T., Manzano, T., Vaikmae, R. y Travi, Y. (2001). Evolution of groundwater systems at the European coastline. En: *Palaeowaters in Europe: evolution of groundwater since the Pleistocene*. Eds. W.M. Edmunds y C. Milne, Geological Society Special Publication nº 189: 289–311.
- Emberger, L. Gaussen, H., Kass, M., Phillippe, A. (1976). Carte bioclimatique de la zone méditerranéenne. UNESCO–FAO. Paris.
- Falkenmark, M., Rockström, J. (2006). The new blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management. *J. Water Resour. Planning and Management*, 132(3): 129–132.
- FAO (1969a). Project SPA 9: étude hydrogéologique du Bassin du Guadalquivir. Informe interno. 148 pp.
- FAO (1969b). Project SPA 9: informe sobre posibles interferencias de la delimitación del Parque Nacional de Doñana en los estudios de aguas subterráneas comprendidas en el Plan Guadalquivir (2ª fase). Informe interno.
- FAO (1969c). Project SPA 9: volume technique hydrogéologique: el manto acuífero de Almonte: fiche technique zone d'Almonte: los mantos acuíferos de las Marismas: fiche technique Marismas. Informes internos.
- FAO 1972. Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalquivir. Informe Técnico nº 1, AGL: SF/SPA 9. Roma.
- FD21 (2002). Gestión Integral en la Comarca de Doñana: Residuos y Depuradoras de Agua. Serie Monográficos Sostenibles. Fundación Doñana 21 (Eds) nº 2. 90 pp.
- FD21 (2003). Bases estratégicas para una agricultura sostenible en Doñana. Fundación Doñana 21. Sevilla: 1–44.
- Flores, E. (1994). Tectónica reciente en el margen ibérico suroccidental. Tesis doctoral, Universidad de Huelva, 1–458 + mapas.
- García-Barrón, L., González-Pérez, M., García Murillo, P., Sousa, A. (2004). Evolución pluviométrica en el suroeste peninsular: variabilidad y disparidad. En: *El Clima entre el Mar y la Montaña* (Eds. García Codón et al.). Asoc. Esp. Climatología/Universidad de Cantabria. Santander. A(4): 283–290.
- García Novo, F. y Marín, C. (eds) (2005). Doñana. Agua y vida. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Giansante, C. (2003). Farming and water use in Doñana. *Word Wild Fund/Adena*. Madrid/Hinojos. 102 pp.
- Giráldez, J.V., Roldán, J. y López Rodríguez, J.J. (1991). Informe de las extracciones de agua para uso agrícola Almonte–Marismas. Dep. de Agronomía, Universidad de Córdoba.
- González-Sánchez, M.D. (1999). Ecología del banco de semillas de hidrofitas de la marisma del Parque Nacional de Doñana. Tesis doctoral. Fac. Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid.
- Ibáñez, E. (2008). Validación de modelos digitales del terreno de precisión a partir de datos láser escáner aerotransportado: aplicación a la Marisma del Parque Nacional de Doñana. Tesis Doctoral, Dept. Ingeniería del Terreno, Univ. Politècnica de Catalunya, Barcelona: 1–187 + anejos.
- Iglesias, M. (1999). Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalario, Doñana, Huelva. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Iglesias, M., Custodio, E., Giráldez, J.V., Manzano, M. y Ordóñez, R. (1996). Caracterización química de la lluvia y estimación de la recarga en el área de El Abalario, Doñana, Huelva. IV Simposio sobre El Agua en Andalucía. Almería. II: 99–121.
- Iglesias, M., Lambán, J., Cardoso, G. y Custodio, E. (1997). El balance de cloruros como indicador de la recarga: ejemplos recientes. *La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. AIH–ITGE. 357–366.

- Iglesias, M., Trick, T., Custodio, E., Manzano, M. y Giráldez, J.V. (1998). Estado actual de conocimiento de la recarga en el acuífero de Doñana. I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almería. IGME (1983). Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno. Instituto Geológico y Minero de España. Colección Informe, Madrid.
- IGME (1974–1980). Mapa geológico de España 1:50.000, 2ª serie. Hojas nº 982 (La Palma del Condado), 983 (Sanlúcar la Mayor), 984 (Sevilla), 1000 (Moguer), 1001 (Almonte), 1002 (Dos Hermanas), 1017 (El Abalarío), 1018 (El Rocío), 1019 (Los Palacios y Villafranca), 1033 (Palacio de Doñana) y 1034 (Lebrija). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- IGME (1992). Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno. Colección Informes Aguas Subterráneas y Geotecnia. Instituto Geológico y Minero de España. 64 pp + 2 mapas.
- IGME (1998). Atlas Hidrogeológico de Andalucía. Instituto Geológico y Minero de España–Junta de Andalucía. Madrid.
- IGME–FAO (1970). Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalquivir. Informes técnicos nº 1 y 2. FAO, Roma.
- IGME–FAO (1973). Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir. FAO, Roma.
- IPCC (2007). International fourth assessment report. Intergovernmental Panel on Climate Change WMO–UNEP. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm> (and wg2).
- Konikow, L.F. y Rodriguez, J. (1993). Advection and diffusion in a variable salinity confining layer. *Water Resources Research*. 29(8): 2747–2761.
- Lario, J. (1996). Último y presente interglacial en el área de conexión atlántico–mediterráneo (Sur de España). Variaciones del nivel del mar, paleoclima y paleoambientes. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 1–269.
- Llamas, M.R. (1990). La importancia de Doñana. *Cauce 2000*, Rev. Col. Ing. Caminos. Madrid. 43 pp.
- Llamas, M.R. (2005). Los colores del agua, el agua virtual y los conflictos hídricos. *Rev. Real Acad. Cien. Exactas, Físicas y Naturales*. Madrid. 99(2): 369–389.
- López, J. y Giráldez, J.V. (1995). Análisis de la recarga y descarga del suelo desnudo en una zona arenosa: el Parque del Entorno de Doñana. XIII Jornadas Técnicas sobre Riego.
- López–Gunn, E. (2007). Groundwater management in Spain: self–regulation as an alternative for the future?. *The Global Importance of Groundwater in the 21st century* (eds. Ragone, S., de la Hera, A., Hernández–Mora, N., Bergkamp, G., McKay, J.). The National Groundwater Association Press, Westerville, OH: 351–357.
- López–Gunn, E., Martínez–Cortina, L. (2006). Is self–regulation a myth?: case study of Spanish groundwater user associations and the role of higher–level authorities. *Hydrogeology Journal*, 14(3): 361–375.
- Lozano, E. (2004). Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas. Tesis Doctoral. Dpto. de Ingeniería del Terreno y Cartografía. Universidad Politécnica de Cataluña.
- 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 (Doñana 2005). Huelva. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Manzano, M. (2001a). Clasificación de los humedales de Doñana atendiendo a su funcionamiento hidrológico. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XXIV: 57–75.
- Manzano, M. (2001b). Aguas subterráneas y humedales. El caso de Doñana. 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Manzano, M., Custodio, E., Loosli, H., Cabrera, M.C., Riera, X. y Custodio, J. (2001). Palaeowater in coastal aquifers of Spain. *Palaeowaters in Coastal Europe: Evolution of Groundwater since the Late Pleistocene* (Eds. W.M. Edmunds y C.J. Milne). Geological Society of London, Special Publication 189: 107–138.
- Manzano, M.; Borja, F. y Montes, C. (2002). Metodología de tipificación hidrológica 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.
- Manzano, M., Custodio, E. y Nieto, P. (2003). El fondo natural de la calidad del agua subterránea: implicaciones para la aplicación de la Directiva Marco del Agua en Europa. *Tecnología del Agua*. 241: 38–47.
- Manzano, M. y Custodio, E. (2004). Groundwater baseline chemistry in the Doñana aquifer (SW Spain) and geochemical controls. IV Asamblea Luso–Espanhola de Geodesia e Geofísica. Figueira de Foz. S13.7: 729–730.
- Manzano, M y Custodio, E. (2005). El acuífero de Doñana y su relación con el medio natural. Doñana. Agua y Biosfera. (eds. F. García–Novo y C. Marín (eds.)). UNESCO, Ministerio de Medio Ambiente–Junta de Andalucía.
- Manzano, M.; Custodio, E.; Mediavilla, C. y Montes, C. (2002a). Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands / SW Spain). *Groundwater Intensive Use*. (Eds. A. Sahuquillo, J. Capilla, L. Martínez–Cortina y X. Sánchez–Vila). International Association of Hydrogeologists, Selected Papers on Hydrogeology, 7. Balkema, NL.
- Manzano, M., Custodio, E., Colomines, M. Ardila, M.C. (2005b). El fondo hidroquímico natural del acuífero de Doñana. V Congreso Ibérico de Geoquímica/IX Congreso de Geoquímica de España. Biblioteca Electrónica de la Exma. Diputación Provincial de Soria. DVD nº 6: 13 pp.
- Manzano, M., Custodio, E., Lozano, E., Higuera, H. (2007a). Relationships between wetlands and the Doñana coastal aquifer (SW Spain). In *Groundwater and Ecosystems*. 35th Congress. Intern. Assoc. Hydrogeologists (Lisbon). CD printing.
- Marco, A. (2002). Contaminación global por nitrógeno y declive de anfibios. *Rev. Esp. Heri.*: 97–109.
- MIMAM (1999). Regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana. Documento Marco para el desarrollo de las actuaciones del Proyecto “Doñana 2005”. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 2 Vols.

- MIMAM (2001). Proyecto Doñana 2005. Actuaciones nº 5: Recuperación de la funcionalidad del caño del Guadiamar. N° 6: Restauración del Caño Travieso y N° 7: Recuperación del caño de la Torre. Estudio de acondicionamiento de la montaña del río. Proyecto Doñana 2005. (CD).
- Montes, C., Amat, J.A. y Ramírez-Díaz, L. (1982). Distribución temporal de las características físico-químicas y biológicas de las aguas de algunos ecosistemas acuáticos del Bajo Guadalquivir (SW España) a lo largo de un ciclo anual. *Anales de la Universidad de Murcia, Fac. Ciencias, Universidad de Murcia*, XXXVIII (1-4): 210-304.
- Montes, C., Borja, F., Bravo, M.A., Moreira, J.M. (1988). Reconocimiento biofísico de espacios naturales protegidos: Doñana. *Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla*: 1-331.
- Montes, C.; Borja, F., Manzano, M. y otros (2008). Inventario y tipificación de los humedales del Manto Eólico Litoral de Doñana. *Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía*.
- Moral, F.J., Giráldez, J.V., Laguna, A. (1996). Aplicación de la onda cinemática a la infiltración y drenaje en un suelo arenoso repelente al agua. IV Simposio Agua en Andalucía (SIAGA). Almería. *Instituto Geológico y Minero de España, Madrid*, III: 69-77.
- Muñoz Reinoso, J.C. (2001). Vegetation changes and groundwater abstraction in SW Doñana, Spain. *Journal of Hydrology*, 242(2001): 197-209.
- PAH (2002). Plan Andaluz de Humedales. *Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía, Sevilla*.
- Ojeda Rivera, J. F. (1987). Organización del territorio Doñana y su entorno próximo (Almonte). Siglos XVIII-XX. Madrid, Ministerio de Agricultura. ICONA, Monografías, 49.
- Palancar, M., Mantecón, R. y Monge, G. (1996). Análisis sobre las características de equipos de medición en continuo de niveles piezométricos. Instrumentación de una red en el Parque Nacional de Doñana y su entorno (Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas). IV Simposio Agua en Andalucía (SIAGA). Almería. *Instituto Geológico y Minero de España, Madrid*, III: 79-85.
- Palancar, M., Cantos, R. (1996). Resultados de la reinterpretación de ensayos de bombeo en sondeos situados en la Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas (05.51). IV Simposio Agua en Andalucía (SIAGA). Almería. *Instituto Geológico y Minero de España, Madrid*, III: 97-114.
- Poncela, R. (1993). Análisis del funcionamiento hidrogeológico del Parque Nacional de Doñana en el entorno del Arroyo de La Rocina. *Dep. Ing. del Terreno y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona*. Tesis de Maestría.
- Querol, A., Alastuey, T., Moreno, M.M., Viana, S., Castillo, J., Pey, S., Rodríguez, A., Cristóbal, S., Jiménez, M., Pallarés, J., de la Rosa, B., Artífano, P., Salvador, M., Sánchez, S., García Dos Santos, M.D., Herce Garraleta, R., Fernández-Patier, S., Moreno-Grau, L., Negral, M.C., Minguillón, E., Monfort, M.J., Sanz, R., Palomo-Marín, E., Pinilla-Gil, E., Cuevas. 2006. Material particulado en España: niveles, composición y contribución de fuentes. Consejo Superior de Investigaciones Científicas y Ministerio de Medio Ambiente. N.I.P.O.: 310-06-107-8.
- Rodó, X., Comín, F. (2001). Fluctuaciones del clima mediterráneo: conexiones globales y consecuencias regionales. *Ecosistemas Mediterráneos, Análisis Funcional* (eds. Zamora, R., Pugnaine, F.I.). *Colec. Textos Universitarios*, 32, CSIC, Madrid: 1-480 (Cap 1).
- Rodríguez Arévalo, F.J. (1984). Estudio hidrogeológico de la zona de contacto entre los depósitos eólicos y de marisma en el área de Doñana (La Vera-La Retuerta). Tesis de Licenciatura. Universidad Complutense de Madrid: 1-177.
- Rodríguez Arévalo, F.J. (1998). Origen y movimiento del agua intersticial en el acuitado arcilloso de las marismas del Guadalquivir. Tesis Doctoral. Facultad Ciencias Geológicas. Universidad Complutense de Madrid: 1-316 + anejos.
- Rodríguez Ramírez, A. (1993). Análisis regional del relieve en el sector interfluvial de los ríos Tinto y Guadalquivir (Golfo de Cádiz). Tesis de Licenciatura. Universidad de Sevilla.
- Rodríguez Ramírez, A. (1998). Geomorfología del Parque Nacional de Doñana y su entorno. Publicaciones del Organismo Autónomo Parques Nacionales. Colección Técnica, Madrid: 1-146.
- Rodríguez Ramírez, A., Rodríguez Vidal, J., Cáceres, L., Clemente, L., Belluomini, G., Manfra, L., Improta, S., de Andrés, J.R. (1996). Recent coastal evolution on the Doñana National Park (SW Spain). *Quaternary Science Review*, 15: 803-809.
- Rodríguez Ramírez, A., Rodríguez Vidal, J., Cáceres, L., Clemente, L., Cantano, M., Belluomini, G., Improta, S., de Andrés, J.R. (1997). Evolución de la costa atlántica onubense (SO España) desde el máximo frandriense a la actualidad. *Boletín Geológico y Minero*. 108(4): 465-475.
- Rodríguez Vidal, J., Mayoral, E., Pendón, J.G. (1985). Aportaciones paleoambientales al tránsito Plio-Pleistoceno en el litoral de Huelva. *Actas de la 1ª Reunión del Cuaternario Ibérico, Lisboa (I)*: 447-459.
- Rodríguez Vidal, J., Cáceres, L., Rodríguez Ramírez, A., Clemente, L. (1993). Coastal dunes and postflandrian shoreline changes. Gula of Cadiz (SW Spain). *Mediterranean and Black sea Shorelines. INQUA Newsletter*, 15: 12-15.
- Sacks, L.A., Herman, H.S., Konikow, L.F., Vela, A. (1992). Seasonal dynamics of groundwater-lake interactions at Doñana National Park, Spain. *Journal of Hydrology*, 136: 123-154.
- Salvany, J.M y Custodio. E. (1995). Características sedimentológicas de los depósitos pliocuaternarios del Bajo Guadalquivir en el área de Doñana. *Rev. Soc. Geol. España*. 8(1-2): 21-31.
- Salvany, J.M., Mediavilla, C., Mantecón, R., Manzano, M. (2001). Geología del valle del Guadiamar y áreas colindantes. Las Aguas y los Suelos tras el Accidente de Aznalcóllar. *Boletín Geológico y Minero*, nº especial, Abril de 2001, 1-294.
- Samper, J., Huguet, Ll., Arés, J. y García, M.A. (1999). Manual del usuario del Programa Visual BALAN V.10. ENRESA, Publ. Tec. 05/99. Madrid: 1-132.
- Serrano, L., Serrano, L. (1996). Influence of groundwater exploitation for urban water supply on temporary ponds from Doñana National parks (SW Spain). *Journal of Environmental Management*, 46: 229-238.

- Serrano, L., Reina, M., Martín, G., Reyes, I. Arechederra, A., Leon, D. & Toja, J. (2006). The aquatic systems of Doñana (SW Spain) watersheds and frontiers. *Limnetica*, 25(1–2): 11–32.
- Sierro, F.J. (1985). The replacement of the Globorotalia menardii group by Messinian boundary in the Mediterranean and adjacent Atlantic. *Marine Micropaleontology*, 9: 525–535.
- Somoza, L., Hernández Molina, F.J., De Andrés, J.R., Rey, J. (1996). Continental shelf architecture and sea level cycles: Late Quaternary high resolution stratigraphy of the Gula of Cadiz, Spain. *Geo-Marine Letters*, 17(2): 133–139.
- Sousa, A. (2004). Evolución de la vegetación hidrofítica y de los humedales continentales asociados en el litoral onubense oriental. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla. (2 Vols.).
- Sousa, A., García Murillo, P. (2003). Changes in the wetlands of Andalusia (Doñana Natural Park, SW Spain) at the end of the little ice age. *Climatic Change*, 58: 193–217.
- Sousa Martín, A., García Murillo, P., González Pérez, M., García Barrón, L. (2004). La desaparición de las lagunas del Entorno de Doñana (Huelva, España) y su relación con cambios climáticos recientes. En: *El Clima entre el Mar y la Montaña* (Eds. García Codrón et al.). Asoc. Esp. Climatología/Universidad de Cantabria Santander. A(4): 716–724.
- Sousa, A. y García Murillo, P. (2005). Historia ecológica y evolución de las lagunas peridunales del Parque Nacional de Doñana. Ministerio de Medio Ambiente. Serie Técnica. 1–169.
- Sousa, A., García-Barrón, L., Morales, J., García Murillo, P. (2006). Post-little Ice Age warming and desiccation of the continental wetlands of the aeolian sheet in the Huelva region (SW Spain). *Limnetica* 25(1–2): 57–70.
- Stevenson, A.C., Harrison, R.J. (1992). Ancient forest in Spain: A model for landuse and dry forest management in south-west Spain from 4000 BC to 1900 AD. *Proceedings of the Prehistoric Society*, 58: 227–247.
- Suso, J.M. y Llamas, R. (1990). El impacto de la extracción de aguas subterráneas en el Parque Nacional de Doñana. *Estudios Geológicos*. 46: 317–345.
- Suso, J. y Llamas, M.R. (1993). Influence of groundwater development of the Doñana National Park ecosystems (Spain). *Journal of Hydrology*. 141(1–4): 239–270.
- Tenajas, J. (1984). Contribución a la hidrogeología e hidrogeoquímica de las marismas del Parque Nacional de Doñana con aplicación del análisis de imágenes Landsat. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 1–238.
- 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. ETSECCPB, Universitat Politècnica de Catalunya. 1: 277 + anejos.
- Trick, T. y Custodio, E. (2004). Hydrodynamic characteristics of the western Doñana Region (area of El Abalarío), Huelva, Spain. *Hydrogeology Journal*, 12: 321–335.
- UPC (1999). Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte–Marismas y su entorno. Grupo de Hidrología Subterránea (UPC, Barcelona). Realizado para el Instituto Tecnológico Geomínero de España, Madrid: 114 + anexos. Informe inédito.
- Urdiales C. (1999). El sistema de la Montaña del Río en la Marisma del Parque Nacional de Doñana: función, estado y propuestas de actuación. Parque Nacional de Doñana.
- Vaikmae, R., Edmunds, W.M. y Manzano, M. (2001). Weichselian palaeoclimate and palaeoenvironment in Europe: background for palaeogroundwater formation. En: *Palaeowaters in Europe: evolution of groundwater since the Pleistocene*. Eds. W.M. Edmunds y C. Milne, Geological Society Special Publication N° 189: 163–191.
- Vanney, J.R. (1970). L'hydrologie du Bas Guadalquivir. Tesis doctoral. Dpto. Física Aplicada. CSIC. Madrid: 1–176.
- Vela, A. (1989). Estudio preliminar de la hidrogeología e hidrogeoquímica del sistema de dunas móviles y flecha litoral del Parque nacional de Doñana. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid: 1–221.
- Velasco, E., Sánchez-Juny, M. y Dolz, J. (1991). Análisis de la hidrología superficial de las cuencas vertientes a la marisma del coto de Doñana. III Simposio sobre el Agua en Andalucía (SIAGA). Córdoba. I: 243–256.
- WWF (2001). Ríos y riberas en torno a Doñana. Word Wild Fund./Adena. Madrid/Hinojos: 1–20.
- WWF (2001). Depuración de aguas en la comarca de Doñana. Análisis y propuestas de actuación de WWF–Adena: 1–16.
- WWF/ADENA (2004). El cultivo del fresón en el ámbito de Doñana. Disponible en: <http://www.wwf.es>
- WWF/ADENA (2007). Fresa y naturaleza en Doñana: corredores ecológicos. Disponible en: <http://www.wwf.es>
- Zazo, C., Dabrio, J.C., Goy, J.L., Menanteau, L. (1981). Torre del Oro. Guía de excursiones: Litoral de Huelva. Actas V Reunión G.E.T.C. Sevilla, 354–356.
- Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, J.C., Civis, J. y Baena, J. (1985). Paleografía de la desembocadura del Guadalquivir al comienzo del Cuaternario (Provincia de Cádiz, España). I Reunión del Cuaternario Ibérico. Lisboa. I: 461–472.
- Zazo, C., Lario, J., Goy, J.L., Bardají, T., Dabrio, C.J., Silva, P.G. y Borja, F. (1996). Short periods of relative high sea level since 6,500 14C yr BP in the Atlantic–Mediterranean region (Iberia). IGCP Project 367: Late Quaternary Coastal Records of Rapid Change. International Geological Correlation. Programme.
- Zazo, C., Dabrio, C.J., González, A., Sierro, F., Yll, E.I., 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, S.W. Spain). *Geocaceta*. 26, 119–122.

Glosario



Vista aérea del litoral de la flecha de Doñana en marea baja, con la formación arenosa en parte móvil y en parte estabilizada por vegetación.

Foto: HG/CSIC.

a

Acuífero. Formación geológica con sus poros y fisuras saturadas de agua, la cual tiene capacidad de moverse, aunque lentamente, cuando está sometida a un gradiente hidráulico.

Acuífero cautivo. Sinónimo de acuífero confinado.

Acuífero confinado. Aquel acuífero limitado por encima y por debajo por formaciones impermeables.

Acuífero freático. Aquel acuífero cuya parte superior está a la presión atmosférica, y por donde puede recibir recarga desde la superficie a través del medio no saturado. Por encima del nivel freático se sitúa la franja capilar.

Acuífero libre. Sinónimo de acuífero freático.

Acuífero semiconfinado. Aquel acuífero limitado por encima, por debajo o por ambos lados por un acuitardo que permite intercambio vertical de agua.

Acuitardo. Formación geológica con sus poros y fisuras saturadas de agua, pero que sólo tiene capacidad de moverse muy lentamente.

Agua capilar. El agua retenida contra la gravedad dentro del medio no saturado, en especial la existente hasta cierta altura sobre el nivel freático y que asciende por efectos capilares.

Agua edáfica. El agua contenida de forma no saturada en el suelo superior, donde se desarrollan las raíces de las plantas.

Agua subterránea. El agua que está bajo la superficie del terreno, en especial la del medio saturado.

Agua superficial. El agua que se encuentra en la superficie del terreno, de forma libre, formando parte de ríos, lagos, lagunas, marismas, ...

Algaida. Pequeño curso fluvial o arroyo con vegetación abundante y bosque de ribera asociado. Es topónimo de origen árabe que significa selva o bosque.

Almacenamiento. Cantidad de agua contenida en un cuerpo de agua superficial o subterráneo.

Aluvial. Formación geológica, en general permeable, asociada al transporte y sedimentación de un río actual o pasado.

Arena. Formación geológica formada por granos —en general sueltos— de pequeño tamaño, entre 0,02 y 0,5 mm de diámetro.

Arena eólica. Formación geológica originada por la acumulación de arena transportada y depositada por el viento.

Arena fluvio marina. Formación geológica originada por la acumulación de arena transportada y depositada por el agua, en ambiente litoral, a causa de la acción de los ríos (fluvial) y del mar.

b

Balance hídrico. Expresión numérica de las entradas y salidas de agua de un cuerpo o sistema hídrico, que modo que su diferencia se iguala a la variación del almacenamiento de agua.

Balance hídrico en el suelo. Balance hídrico realizado entre la superficie del suelo y la profundidad radicular.

Bosque de ribera. Comunidad de vegetación arborescente asociada a un curso de agua y que se alimenta de la proximidad del nivel freático a la superficie del terreno o de frecuentes aportaciones de agua superficial.

C

Capacidad de campo. Cantidad máxima de agua que el suelo retiene contra la gravedad. Se puede dar como humedad (retención específica o capacidad de retención) o como el producto de este valor por la profundidad radicular.

Capacidad de retención. Ver capacidad de campo.

Ciclo hidrológico. El ciclo cerrado del agua en la Naturaleza, desde que ésta se evapora del mar o del continente y pasa a la atmósfera para ser transportada y depositada en forma líquida o sólida sobre el continente, hasta que vuelve al origen escurriendo por la superficie del terreno o circulando por los acuíferos.

Criptohumedal. Humedal cuyo nivel de agua no aflora en superficie, pero que contiene plantas que acceden al medio saturado por debajo de la superficie del terreno.

Cuerpo de agua. Concepto reciente introducido por la Directiva Marco del Agua Europea para designar un volumen de agua limitado y con características más o menos homogéneas en cuanto a existencia y calidad. Tiene un carácter administrativo-legal

d

Duna. Acumulación eólica de arena en lugares de viento persistente. Se encuentran en áreas costeras o desérticas.

e

Ecosistema. Unidad funcional del planeta de cualquier magnitud, incluida la totalidad del planeta (ecosfera), que se auto-organiza en el tiempo y que está estructurada por elementos no vivos y vivos, incluidos los seres humanos, ligados por una trama de relaciones biofísicas de interdependencia.

Ecotono. Franja de contacto entre ecosistemas bien diferenciados.

Endorreico. Se dice de una porción de terreno que escurre internamente, pero que no tiene salida superficial. El agua que recoge sólo puede escapar por evaporación, evapotranspiración o recarga a los acuíferos.

Estación de aforos. Dispositivo para medir el caudal circulante por un curso de agua superficial.

Evaporación. Paso del agua desde la superficie o desde el terreno hacia la atmósfera, en forma de vapor.

Evapotranspiración. Conjunto de la evaporación y la transpiración.

f

Formación palustre. Superficie del terreno encharcada, con una lámina de agua poco profunda que permanece el tiempo suficiente para que se desarrollen organismos estrictamente acuáticos.

Franja capilar. Zona estrecha sobre el nivel freático en la que el agua ha ascendido a través de los poros o grietas del terreno por la acción de las fuerzas capilares. Esta saturada de agua pero la presión del agua es menor que la atmosférica.

Freático. Hace referencia al agua subterránea de la parte superior del medio saturado.

Freatofita. Planta que es capaz de tomar del terreno agua de la zona saturada o de la franja capilar.

g

Gradiente hidráulico. Variación del nivel piezométrico o del potencial hidráulico por unidad de recorrido, en el sentido de la mayor pendiente. Puede ser natural o artificial.

h

Hidroperiodo. Secuencia anual –a veces interanual– de existencia de más o menos agua –o su ausencia– en un cuerpo de agua. Hace referencia a la duración, frecuencia y estacionalidad de la presencia de agua en un humedal.

Humedad. Contenido volumétrico de agua de un terreno (en fracción en volumen o en porcentaje). El valor máximo es la porosidad. La humedad máxima retenida contra el efecto de la gravedad es la capacidad de campo.

Humedad de retención. Ver capacidad de campo.

Humedal. Ecosistema o unidad funcional de carácter predominantemente acuático que no siendo un río, ni un lago ni el medio marino constituye en el espacio y en el tiempo un anomalía hídrica positiva respecto a un entorno más seco..

i

Infiltración. Proceso por el que el agua de lluvia o superficial penetra hacia abajo la superficie del terreno.

Isótopo ambiental. Isótopo natural o artificial, estable o radioactivo, que forma parte de la molécula del agua, de sus sustancias disueltas o de los gases del medio no saturado, y aportado de forma difusa por la atmósfera.

l

Laguna. Cuerpo de agua superficial estancando o con escaso flujo, permanente o temporal, de extensión desde pequeña a grande.

Lucio. Cuerpo de agua superficial estancado en pequeñas depresiones de terreno y con poca profundidad, generado por la deriva de un cauce fluvial sobre su llanura de inundación, que subsiste cuando se ha secado la llanura que lo enmarca. Es un término específico de la marisma de Doñana.

m

Manantial. Lugar puntual o más o menos extenso –con frecuencia lineal– por el que las aguas subterráneas salen a la superficie del terreno o a otros cuerpos de agua superficial.

Masa de agua. Sinónimo de cuerpo de agua.

Médano. Sinónimo de duna.

Medio no saturado. Porción del terreno por encima del nivel freático en la que los poros y fisuras están parcialmente llenos de agua, siendo el resto aire. Se originan esfuerzos capilares que hacen que la presión del agua respecto a la atmosférica sea negativa (succión). Ver saturación.

Medio saturado. Medio subterráneo en el que todos los poros y fisuras están llenos de agua. Ver saturación.

Monte blanco. Agrupación de espacios vegetales arenícolas que usan principalmente la humedad del suelo, sin afectar al nivel saturado. Es término propio de Doñana.

Monte negro. Agrupación de espacios vegetales arenícolas persistentes cuyas raíces tienen acceso a la franja capilar y al nivel freático. Es término propio de Doñana.

n

Nivel freático. Posición altitudinal que tiene la superficie del agua subterránea en un acuífero freático y que se define mediante perforaciones. En el nivel freático la presión del agua es la atmosférica.

Nivel piezométrico. Posición altitudinal que indica la presión del agua subterránea a una cierta profundidad y medida por una columna de agua dentro de una perforación.

p

Palustre. Ver formación palustre.

Permeabilidad. Medida de la mayor o menor facilidad que permite el terreno a la circulación del agua subterránea cuando a ésta se la somete a un gradiente hidráulico.

Piezómetro. Dispositivo para medir la presión del agua subterránea a una cierta profundidad. En general se trata de una perforación.

Pluviometría. Medida de la precipitación.

Pluviómetro. Dispositivo para medir la precipitación.

Potencial hidráulico. Energía por unidad de masa o volumen del agua situada a una cierta altura, sometida a una cierta presión y moviéndose a una cierta velocidad. En agua subterránea se mide por el nivel piezométrico, ya que la parte del potencial debido a la velocidad es un término en general mucho menor que los otros términos.

Porosidad. Volumen de huecos (con aire y/o con agua y/o con otro fluido) por unidad de volumen de terreno (en fracción o en porcentaje).

Porosidad drenable. Parte de la porosidad de un terreno saturado de agua que se puede drenar por efecto de la gravedad.

Porosidad eficaz. Con frecuencia se usa como equivalente a porosidad drenable.

Porosidad de retención. Ver capacidad de campo.

Pozo. Perforación en el terreno que penetra un acuífero y acondicionada para poder extraer agua.

Precipitación. Caída de agua atmosférica sobre el terreno, en forma de lluvia, nieve, granizo, rocío o cualquier otra forma.

Profundidad radicular (o radical). Profundidad media bajo al nivel del terreno a la que llegan las raíces activas de la vegetación local.

Punto de marchitez. Humedad del terreno a la que las plantas ya no pueden tomar el agua por ósmosis, y cesan sus funciones fisiológicas o mueren.

R

Recarga. Proceso y medida de la conversión del agua infiltrada desde la superficie del terreno en agua que se incorpora al agua subterránea.

Renovación. Proceso y medida del tiempo medio que un agua permanece en un sistema.

Retención específica. Ver capacidad de campo.

Retorno de riego. Parte del agua aportada como riego que no se evapora ni escurre en superficie, y que se infiltra en el terreno.

Resume. Pequeño manantial de caudal ínfimo.

Riego. Acción artificial por la que se aporta agua de forma extensiva a un terreno con el fin de incrementar la productividad vegetal. Equivale a un incremento de la precipitación.

S

Saturación (en agua). Fracción de la porosidad ocupada por el agua. El terreno está saturado cuando todos los poros y huecos están llenos de agua.

Sistema acuífero. Conjunto de acuíferos y acuíferos relacionados entre sí, tanto en sentido horizontal como vertical.

Sondeo. Perforación realizada en el terreno para reconocer su naturaleza, observar el agua subterránea, o poder tomar muestras de terreno o de agua. Suele estar equipado para su durabilidad y cumplimiento de sus objetivos.

Suelo edáfico. Parte superior del terreno en la que se desarrollan las raíces de las plantas.

T

Tasa. Velocidad a la que se realiza un cambio.

Tasa de recarga. Valor de la recarga por unidad de tiempo.

Tasa de renovación. Velocidad a la que se realiza una renovación. En general se refiere al agua en un acuífero.

Tiempo de renovación. Tiempo medio de permanencia del agua en un sistema.

Transmisividad. Valor numérico del producto de la permeabilidad de un acuífero por su espesor. Mide la capacidad de un acuífero para transmitir agua horizontalmente y define el caudal extraíble de un pozo para un cierto descenso del nivel piezométrico.

Transpiración. Paso del agua en el terreno, en especial el agua edáfica, a la atmósfera en forma de vapor, cuando se hace a través de la vegetación.

U

Unidad hidrogeológica. Conjunto de acuíferos, con sus límites y con características comunes que lo pueden identificar como tal unidad.

Z

Zona no saturada. Sinónimo de medio no saturado.

Zona saturada. Sinónimo de medio saturado.

