

Portada

Fund. Doñana 21

Recursos de agua de la Comarca de Doñana

Autores:

**Emilio Custodio, UPC
Josep Dolz, UPC
Marisol Manzano, UPCT**

Con la colaboración de:

Francisco J. Alcalá

Índice

- 0.– Presentación
- 00.– Preámbulo
- 000.– Relación de abreviaturas y siglas usadas con mayor frecuencia en el texto
- 1.– El agua en la Comarca de Doñana
 - 1.1.– Datos generales
 - 1.2.– Consideraciones generales
 - 1.3.– El Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos
 - 1.4.– Aspectos legales
 - 1.5.– Actividades hídricas en la Comarca de Doñana
 - 1.6.– Implantación de la Directiva Marco Europea del Agua
 - 1.7.– Publicaciones sobre el agua en la Comarca de Doñana
 - 1.8.– Referencias bibliográficas
- 2.– Redes hidrométricas en la Comarca de Doñana y áreas de influencia
 - 2.1.– Introducción
 - 2.2.– Redes hidrometeorológicas: cantidad y calidad
 - 2.3.– Red de foronómica: cantidad y calidad
 - 2.4.– Red de observación de aguas en marisma y lagunas: cantidad y calidad
 - 2.5.– Redes de observación de las aguas subterráneas: cantidad y calidad
 - 2.6.– Red de medida de la recarga: cantidad y calidad
 - 2.7.– Conclusiones
 - 2.8.– Referencias bibliográficas
- 3.– Conocimiento del funcionamiento hídrico en la Comarca de Doñana
 - 3.1.– Introducción
 - 3.2.– Aporte atmosférico de agua, sales y contaminantes
 - 3.3.– Funcionamiento de las aguas superficiales: cantidad y calidad
 - 3.4.– Funcionamiento hídrico de la marisma en cantidad y calidad; efecto de las intervenciones humanas
 - 3.5.– Funcionamiento hídrico de las lagunas y humedales; efectos antrópicos
 - 3.6.– Funcionamiento de las aguas subterráneas; efectos antrópicos
 - 3.7.– Evolución de la demanda hídrica poblacional y agrícola
 - 3.8.– Balance hídrico de las aguas subterráneas
 - 3.9.– Conclusiones
 - 3.10.– Referencias bibliográficas
- 4.– Gestión de las aguas en la Comarca de Doñana
 - 4.1.– Introducción y aspectos generales
 - 4.2.– Gestión de las aguas superficiales fluyentes
 - 4.3.– Gestión de las aguas superficiales de marisma y lagunares
 - 4.4.– Gestión de las aguas subterráneas
 - 4.5.– Participación de usuarios y ciudadanos en la gestión del agua
 - 4.6.– Evolución de los distintos usos del agua en la Comarca de Doñana
 - 4.7.– Conclusiones
 - 4.8.– Referencias bibliográficas
- 5.– Gestión de las aguas en la Comarca de Doñana
 - 5.1.– Introducción

- 5.2.– Evolución y cambio climático
 - 5.3.– Sustentabilidad de la conservación y del desarrollo social en relación con los recursos hídricos
 - 5.4.– Referencias bibliográficas
- Apéndice.– Relación de publicaciones y estudios referentes al agua en la Comarca de Doñana o en relación con la misma

Índice de figuras

- 1.1.– Mapa general de ubicación
- 1.2.– Mapa base de cuencas
- 1.3.– Mapa base de la Comarca de Doñana, con poblaciones y ocupación del territorio. a: delimitación de la marisma. b: delimitación de espacios protegidos. c: usos generales del suelo.
- 1.4.– Mapa de detalle de la toponimia usada
- 1.5.– Desviación acumulada de la pluviometría en la estación de Palacio de Doñana
- 1.6.– Desviación acumulada de la precipitación registrada en la estación de Sevilla–Iglesia de la Anunciación durante los periodos 1886–1930 y 1951–1966 y desviación acumulada de la precipitación registrada en la estación de Sevilla–Tablada durante el periodo 1922–1999
- 1.7.– Desviación acumulada de la precipitación registrada en la estación del Palacio de Doñana durante el periodo 1979–2005
- 1.8.– Desviación acumulada de la precipitación obtenida mediante combinación de la precipitación registrada en Sevilla–Tablada, Sevilla–Anunciación y Palacio de Doñana a partir de la corrección de los datos de Palacio de Doñana mediante el método de dobles masas para el periodo coincidente.
- 2.1.– Estaciones meteorológicas en activo del INM
- 2.2.– Estaciones meteorológicas de las redes RAIFS y RIAC de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía en la zona de interés para Doñana
- 2.3.– Localización de los puntos de las redes INFOCA y SIVA de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía en la zona de interés para Doñana, que disponen de estaciones meteorológicas
- 2.4.– Estaciones termoplumiométricas previstas para las redes SAIH de las cuencas del Guadiana y el Guadalquivir de interés para Doñana
- 2.5.– Ubicación de las estaciones automáticas de las redes PND y FLUMEN de medida del nivel de agua en la Marisma del Parque Nacional de Doñana
- 2.6.– Estación de aforos de La Rocina
- 2.7.– Situación de las estaciones foronómicas y de control de la calidad de las aguas superficiales
- 2.8.– Situación de las estaciones de control del agua en la Marisma. Mapa digitalizado de alturas (m) del suelo
- 2.9.– Estación automática PN12 ubicada en Cancela Millán
- 2.10.– Estación automática DO2 ubicada en el Lucio de los Ansares
- 2.11.– Ubicación de los puntos de la red de control freático del Parque Natural de Doñana en el área de El Abalarío. Datos facilitados por la CHGQ
- 2.12.– Redes piezométricas históricas del IARA y del IGME. Datos facilitados por la CHGQ

- 2.13.– Red piezométrica actual de la CHGQ. Datos facilitados por la CHGQ
- 3.1.– Comparación de niveles medidos y calculados en el Lucio del Rey, para el año hidrológico 1995–96
- 3.2.– Modelo digital del terreno de la Marisma y un perfil transversal de la misma
- 3.3.– Caracterización de los cauces mediante el análisis de pendientes en el modelo digital del terreno. Caño del Buen Tiro
- 3.4.– Relación entre volumen de agua almacenado, y superficie de agua, con la cota del agua en la Marisma de Doñana
- 3.5.– Modificaciones antrópicas al funcionamiento de la Marisma y correcciones a realizar
- 3.6.– Funcionamiento y clasificación hidrológico de algunos tipos de humedales existentes en el sector occidental del Manto Eólico Litoral
- 3.7.– Descensos freáticos y piezométricos acumulados en distintos lugares del acuífero en los primeros años tras el inicio de las extracciones intensivas de agua subterránea
- 3.8.– Piezometría representativa de la situación actual a escala regional y ubicación de los principales centros de bombeo
- 3.9.– Tipos de humedales dependientes del agua subterránea más frecuentes en Doñana
- 3.10.– Evolución de las descargas de agua subterránea entre 1970 y 1999 calculados mediante modelación numérica del flujo de agua subterránea
- 3.11.– Esbozo geológico de la Comarca de Doñana
- 3.12.– Secciones geológicas representativas del área de Doñana. Fuente IGME (1992)
- 3.13.– Secciones geológico–hidrogeológicas de El Abalario y de Los Cotos
- 3.14.– Cambios en la piezometría vertical
- 3.15.– Efecto de las extracciones sobre los humedales y descargas
- 3.16.– Efecto de las extracciones sobre el sistema lagunar
- 3.17.– Áreas hidrogeológicas en la Comarca de Doñana
- 5.1.– Cambio relativo de la recarga ($\Delta R/R$) para un cierto cambio de temperatura ($\Delta t, ^\circ\text{C}$) y de la precipitación relativa ($\Delta P/P$). Fórmula de Coutagne
- 5.2.– Cambio relativo de la recarga ($\Delta R/R$) para un cierto cambio de temperatura ($\Delta t, ^\circ\text{C}$) y de la precipitación relativa ($\Delta P/P$). Fórmula de Turc

Índice de tablas

- 1.1.– Superficies relevantes
- 1.2.– Fechas de eventos de interés hidrológico
- 2.1.– Estaciones meteorológicas automáticas del Instituto Nacional de Meteorología (INM) en la zona de interés para Doñana
- 2.2.– Estaciones termopluviométricas manuales del INM
- 2.3.– Estaciones de la red RIAC (agrometeorológicas) de la CAP–JA
- 2.4.– Estaciones de la red RAIFS (alerta e información fitosanitaria) de la CAP–JA
- 2.5.– Estaciones termopluviométricas de la red SAIH de la CHGQ
- 2.6.– Estaciones meteorológicas de la red SAIH de la CHGQ
- 2.7.– Datos meteorológicos históricos de las estaciones automáticas de la EBD

- 2.8.– Estaciones meteorológicas automáticas del PND
- 2.9.– Algunos resultados de la red de calidad de las aguas superficiales
- 2.10.– Características de la red de control del agua en la Marisma
- 3.1.– Principales tipos hidrológicos e hidroquímicos de humedales en Doñana en relación con su ubicación respecto a la red hídrica
- 3.2.– Situación de extracciones agrícolas en los sectores del Plan Almonte–Marismas según el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana. Datos de Giráldez et al., 1991 y IRYDA (1991)
- 3.3.– Evolución del Plan de Transformación Agraria Almonte–Marismas (PTAAM) y Comarca de Doñana
- 3.4.– Crecimiento del área regada del Sector III del PTAAM en 1996 según la foto aérea, y extracciones atribuidas (según Giasante, 2003). Cifras redondeadas
- 3.5.– Resumen de actividad agraria en la Comarca de Doñana en el año 2001. Datos extraídos de FD21 (1993) y Giasante (2003)
- 3.6.– Estimación de la demanda agrícola de agua subterránea para riego en 2001 según datos de la Tabla 3.5
- 3.7.– Estaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas (modificado de Giasante, 2003)
- 3.8.– Recarga media al acuífero por áreas, con indicación de la forma de descarga natural
- 3.9.– Balance medio estacionario del acuífero por áreas en la situación “natural”, es decir, sin extracciones significativas del agua subterránea ni la evaporación freática del bosque plantado
- 3.10.– Resultados del balance medio estacionario de los acuíferos de la Comarca de Doñana, en estado natural
- 3.11.– Asignación de las extracciones de regadío, abastecimiento y ecológicas, y de sus retornos al acuífero, según las distintas áreas
- 3.12.– Balance medio estacionario del acuífero por áreas en la situación actual (2005) de extracciones y recargas
- 3.13.– Resultados del balance medio estacionario de los acuíferos de la Comarca de Doñana en estado actual de bombeo y con eucaliptos erradicados

Presentación por Fundación Doñana 21

Preámbulo por los autores

Preámbulo por coordinación

Relación de abreviaturas y siglas usadas con mayor frecuencia en el texto

AAA	Acuífero Almonte–Marismas; Agencia Andaluza del Agua
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
CHGQ	Confederación Hidrográfica del Guadalquivir
CICYT	Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología
CIED	Comisión Internacional de Expertos de Doñana
CMA	Consejería de Medio Ambiente, JA
CSIC	Consejo Superior de Investigaciones Científicas
DAG	Directiva del Agua Subterránea
DMA	Directiva Marco del Agua
DITCG	Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartográfica y Geofísica, UPC
EBD	Estación Biológica de Doñana
FAO	Food and Agriculture Organization
FD21	Fundación Doñana 21
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
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
PAH	Plan Andaluz de Humedales
PAM	Plan Almonte–Marismas, PTAAM
PIAS	Plan de Investigación de Aguas Subterráneas
PNED	Parque Natural del Entorno de Doñana
PNatD	Parque Natural de Doñana, PNED
PND	Parque Nacional de Doñana
PTAAM	Plan de Transformación Agraria Almonte–Marismas, PAM
RBP	Reserva Biológica de Doñana, EBD
SGOP	Servicio Geológico de Obras Públicas
UAM	Universidad Autónoma de Madrid
UPC	Universidad Politécnica de Cataluña
UPCT	Universidad Politécnica de Cartagena
WWF	World Wild Fund

Capítulo 1

El agua en la Comarca de Doñana

- 1.1.– Datos generales**
- 1.2.– Consideraciones generales**
- 1.3.– El Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos**
- 1.4.– Aspectos legales**
- 1.5.– Actividades hídricas en la Comarca de Doñana**
- 1.6.– Implantación de la Directiva Marco Europea del Agua**
- 1.7.– Publicaciones sobre el agua en la Comarca de Doñana**
- 1.8.– Referencias bibliográficas**

Capítulo 1.– El agua en la Comarca de Doñana

1.1.– Datos generales

La designación de Doñana estuvo inicialmente limitada a las áreas de arenas que rodean por el Oeste y Noroeste a las Marismas del Guadalquivir. Siendo de difícil habitabilidad y escasa productividad agrícola y pecuaria, fueron utilizadas como áreas de caza de las familias nobles y para apacentar ganado. Con la creación de la Reserva Biológica de Doñana y del Parque Nacional de Doñana el nombre fue difundiéndose y haciéndose cada vez más un genérico del área que rodea 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 una Comarca Natural que se extiende a grandes trazos desde la parte baja del río Tinto al río Guadalquivir y desde la autovía Sevilla–Huelva al mar (Figura 1.1). Parte del territorio forma parte de la Comarca del Condado (de Niebla). Queda excluido el Aljarafe, al noreste. La designación de Comarca de Doñana toma más valor por la muy próxima integración de las áreas protegidas en un único organismo dependiente de la Junta de Andalucía (01–07–06). Las cuencas vertientes cubren un territorio más extenso (Figura 1.2).

Como poblaciones principales dentro del área de Doñana se encuentran Almonte y sus pedanías (Matalascañas y El Rocío), Villamanrique de la Condesa e Hinojos, y en sus contornos están Moguer (y Mazagón), Palos, Lucena, Rociana y Pilas, y hasta cierto punto Los Bollullos Par del Condado y Aznalcázar.

La actividad económica es principalmente agrícola, salvo la notable concentración turística estacional de Matalascañas y Mazagón y las actividades turístico–religiosas de El Rocío, con el Parque Nacional y el Parque Natural jugando cada vez un mayor papel en la generación de actividad económica local. En las Figuras 1.3(a, b y c) se indican los usos del territorio. En la Figura 1.4 se incorpora la toponimia general que se utiliza en este informe.

Algunos datos territoriales relevantes se dan en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1.– Datos territoriales sobre superficies.

Área	Superficie, km²	
Comarca Doñana (municipios)	2900	(19% en el PND)
Acuífero 27 (en Comarca Doñana)	2740	
Acuífero Almonte–Marismas (AAM)	2400	
Superficie permeable del AAM	1840	
Marisma	1500	
Parque Nacional	542	
Parque Natural	537	
Área cultivada	877	
Área boscosa	1210	
Laguna de Santa Olalla	0,48	

La población total ha ido creciendo paulatinamente, siendo de 122000 habitantes en 1970 y de 162000 habitantes en 1996. Del orden de 1/3 de los

mismos se dedica a la agricultura, pudiendo llegar a 1/2–2/3 en algunos municipios.

La Consejería de Medio Ambiente definió el ámbito llamado “Comarca de Doñana” como el integrado por los 14 municipios siguientes:

- Huelva: Almonte, Bonares, Bollulos Par del Condado, Hinojos, Lucena del Puerto, Moguer, Palos, Rociana del Condado.
- Sevilla: Aznalcázar, Puebla del Río, Pilas, Villamanrique de la Condesa y Villafranco del Río.
- Cádiz: Sanlúcar de Barrameda

UTM (km)

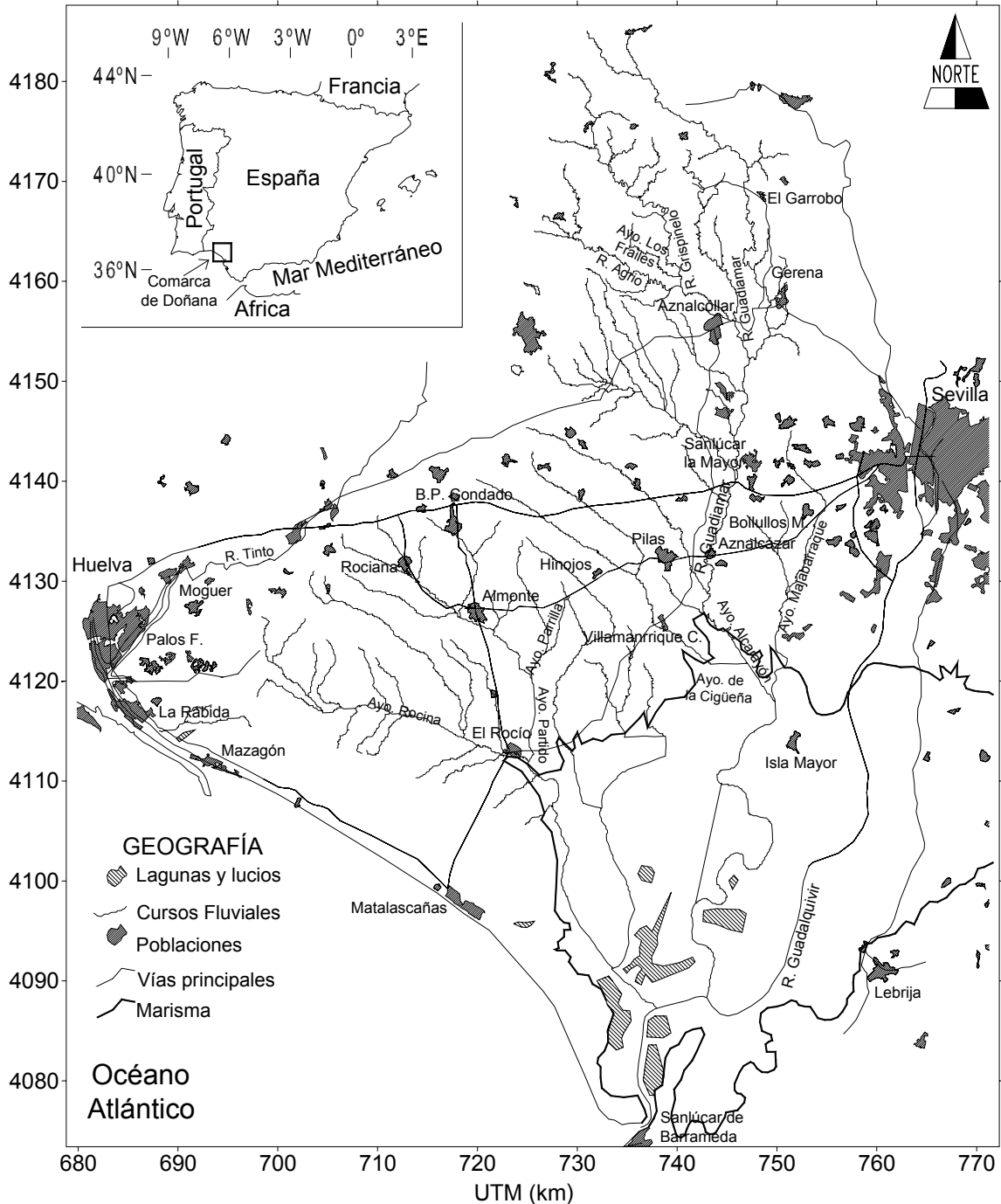


Figura 1.1.– Mapa general de ubicación de la Comarca de Doñana y sus alrededores.

UTM (km)

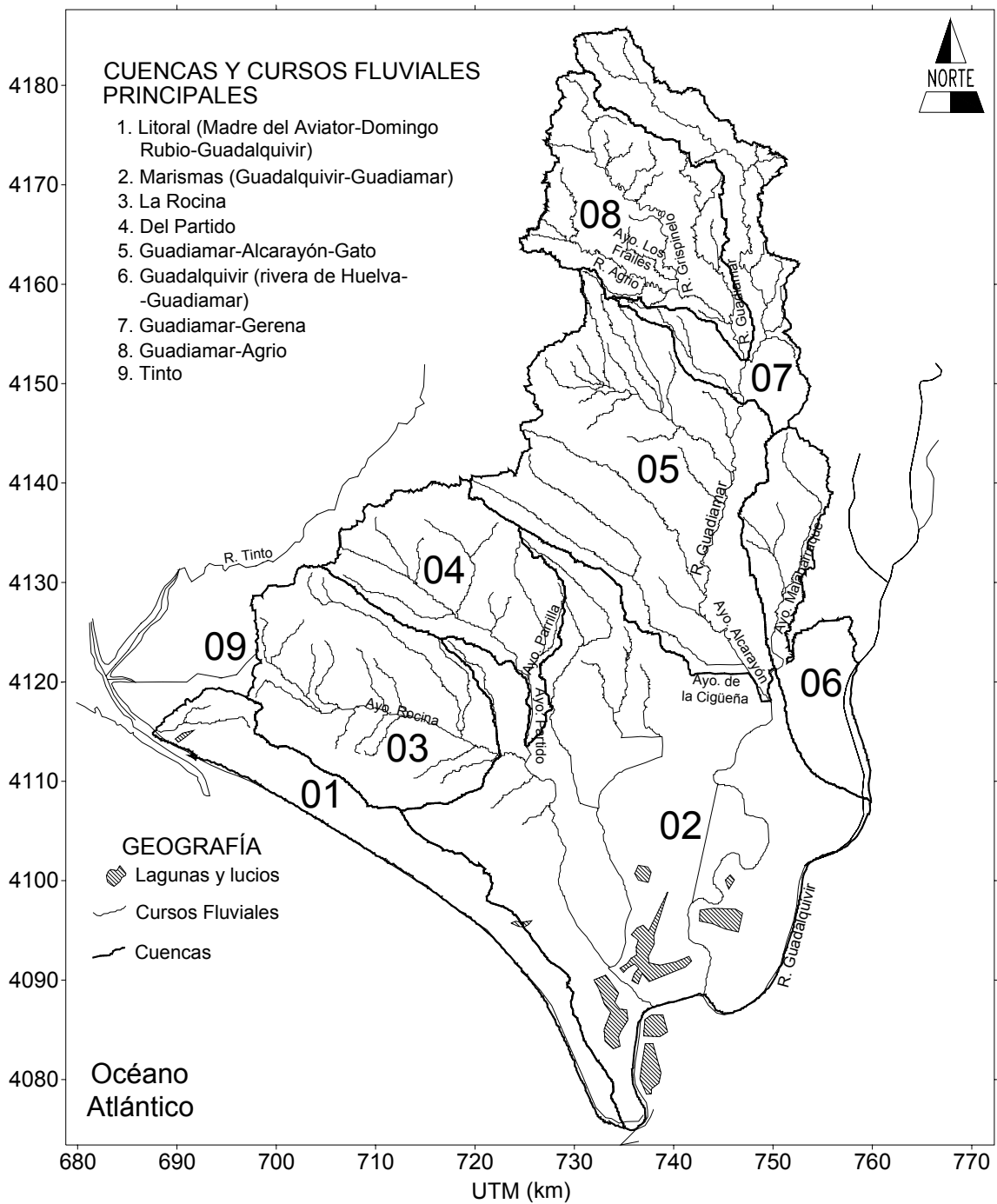


Figura 1.2.– Cursos fluviales y sus cuencas en la Comarca de Doñana. No incluye el contorno de las cuencas de los ríos Guadalquivir y Tinto. Fuente: FD21 (2002).

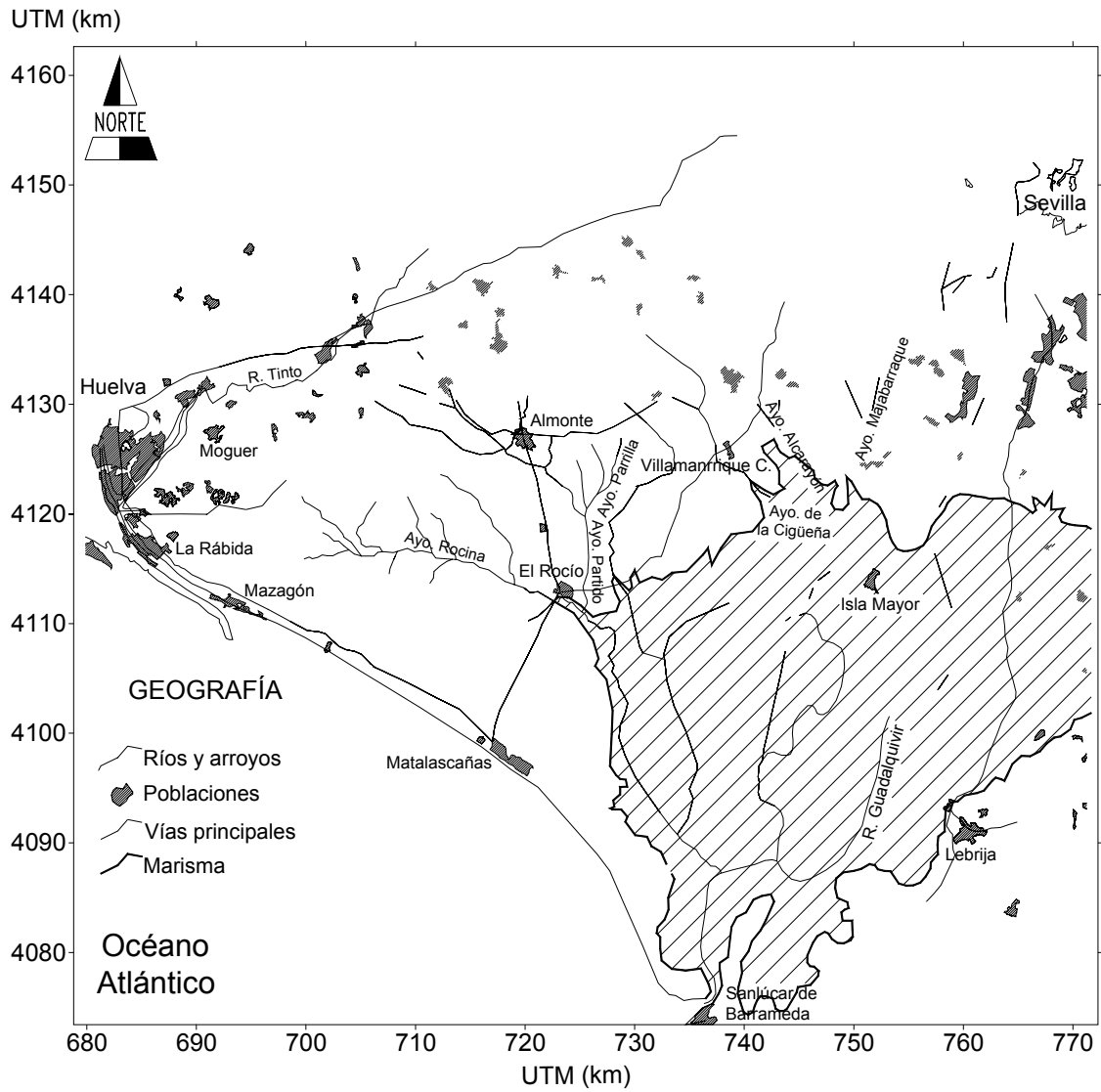


Figura 1.3.a.– Delimitación de la marisma, poblaciones y red fluvial en la Comarca de Doñana y su entorno cercano. Fuente: CMA–JA (2000).

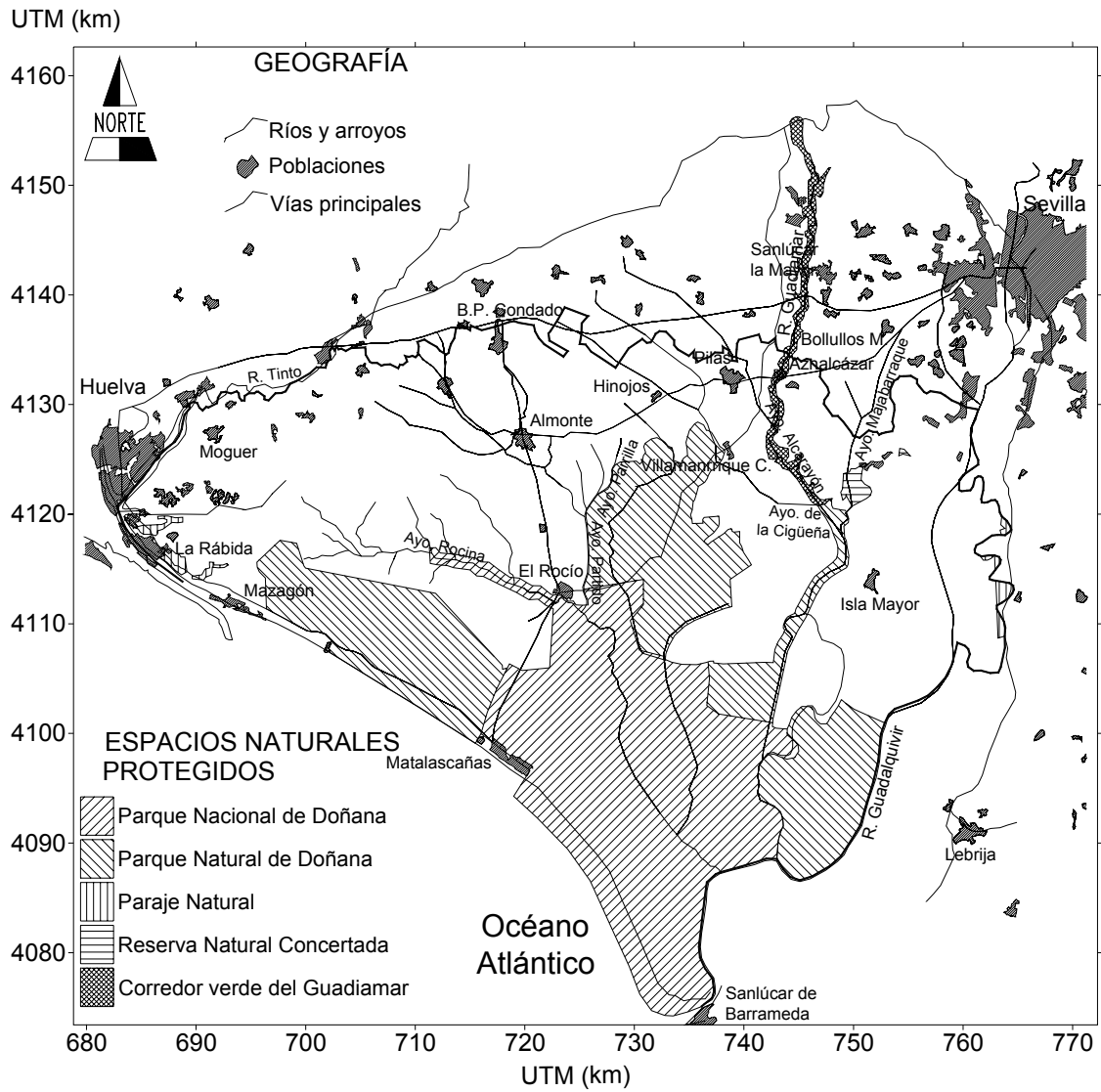


Figura 1.3.b.– Espacios naturales protegidos en la Comarca de Doñana y su calificación, poblaciones y red fluvial. Fuente: CMA–JA (2000). No se incluye la franja situada al Norte de Sanlúcar de Barrameda, “La Algaida”.

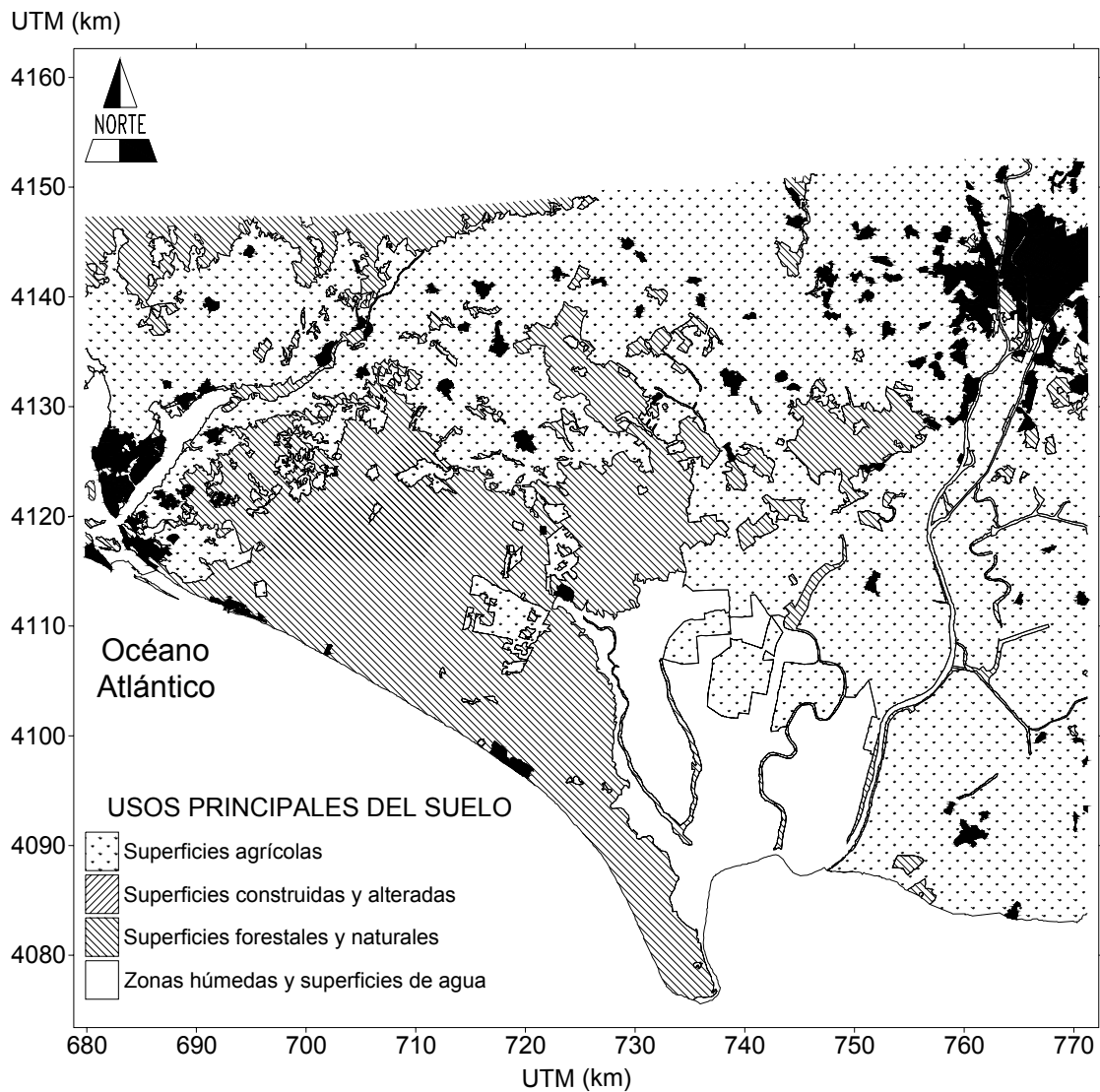


Figura 1.3.c.– Usos generales del suelo de la Comarca de Doñana y su entorno. Fuente: CMA–JA (2000).

UTM (km)

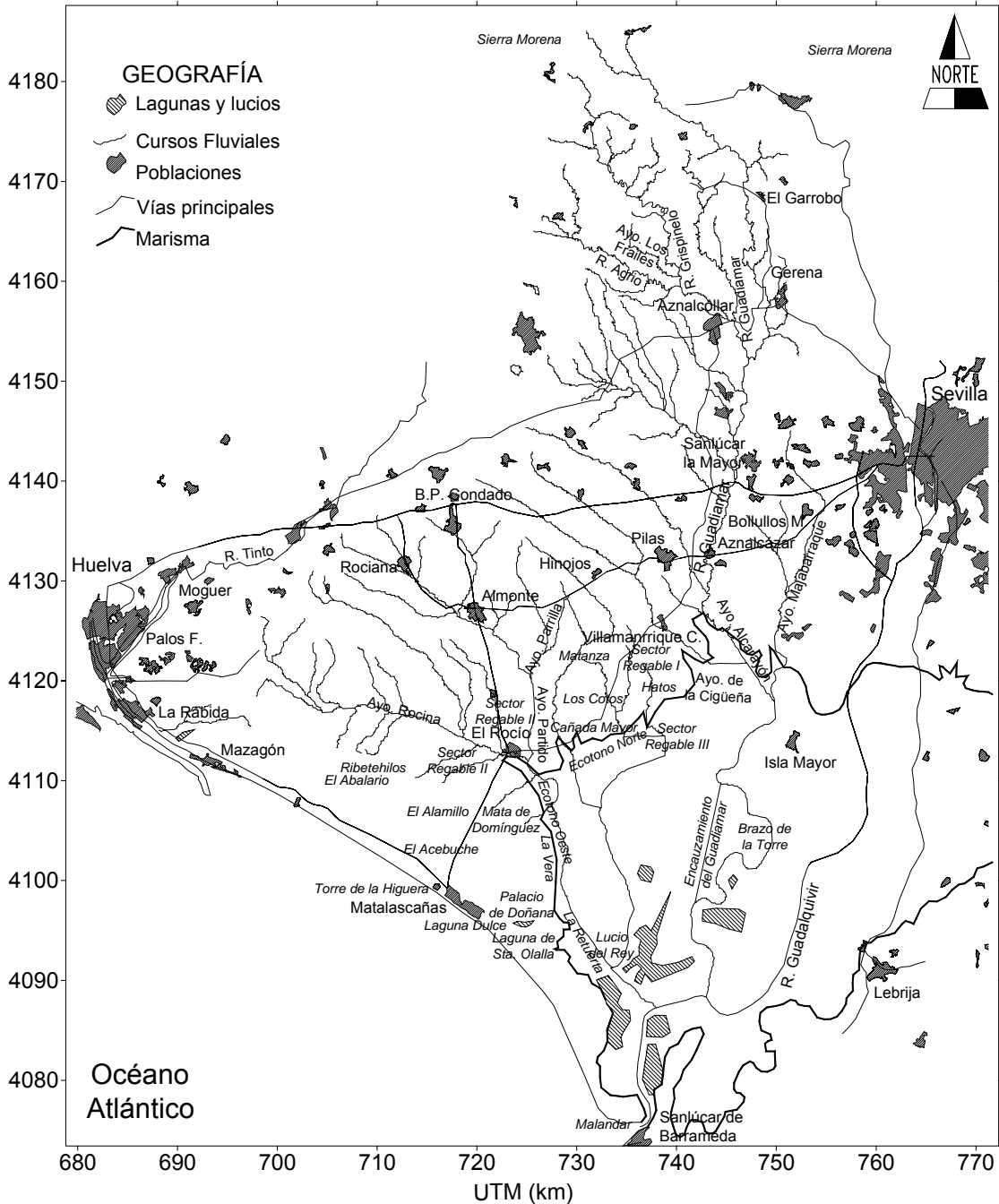


Figura 1.4.– Localización de los lugares y otros elementos geográficos mencionados en el texto.

Son pocos los datos hidrológicos antiguos que existen aunque se conocen las grandes avenidas del río Guadalquivir desde 1400, y hay referencias buenas de la gran riada de 1709 (Rodríguez Ramírez, 1993).

Algunas fechas de significación hidrológica son las que se indican en la Tabla 1.2.

Tabla 1.2.– Fechas de eventos de interés hidrológico.

Fecha	Evento
1930's	Inicio a gran escala del cultivo del arroz
1940's	Incentivos al arrozal tras la Guerra Civil
1947	Plantaciones forestales de pinos y eucaliptos
1964	Se crea la Reserva Biológica de Doñana con la adquisición de 6794 ha de terreno por la WWF
1969	Se crea el Parque Nacional de Doñana con 32000 ha, efectivo en 1978
1972	Se declara de interés nacional el Plan de riego Almonte–Marismas
1988	Se hace público el Plan de Desarrollo Territorial Comarcal (PDTC) de Doñana que abarca un área de 2900 km ²
1989	Se crea el Parque Natural del Entorno de Doñana, 54200 ha
1992	Se hace público el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992)
1993	Se hace público el Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana. El Plan de Ordenación Territorial del Área de Doñana (POTAD) incluye a Rociana del Condado y a Bollullos Par del Condado
1994	Se inicia la erradicación de las plantaciones forestales de eucaliptos en el parque
1998	Accidente de ruptura de la balsa de lodos mineros de Aznalcóllar Inicio de la gestión del Proyecto de Restauración de Humedales Doñana 2005, "Proyecto Doñana 2005" Proyecto del Corredor Verde del Guadiamar
2002	Plan Andaluz de Humedales de la CMA–JA
2003	Se evalúa el Plan de Desarrollo Sostenible de Doñana

La temperatura media anual del suelo varía entre 19 y 20 °C (según la 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. Los valores mínimos estacionales corresponden al invierno (enero), donde ocasionalmente se puede producir escarcha nocturna aunque el día es más templado; los valores máximos estacionales corresponden al mes de julio, con valores medios entre 25 y 29 °C y puntas de más de 30 °C.

Las precipitaciones medias anuales según el PDTCD (1984) varían entre 500 y 600 mm, con los valores mayores en el norte y los menores sobre la marisma. Presentan una clara estacionalidad unimodal, con el mínimo en verano (junio a septiembre) y el máximo en diciembre, aunque ocasionalmente en algunos años puede haber un máximo secundario en abril–mayo.

La Figura 1.5 muestra la evolución pluviométrica en el Palacio de Doñana 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 (en el que hay datos) existe una tendencia general húmeda moderada pero con fluctuaciones notables, de modo que más puntualmente se tienen etapas secas entre 1979 y 1986, entre 1991 y 1995 y desde 2003, y etapas húmedas entre 1986 y 1989 y entre 1996 y 1998, siendo el tramo 1998 a 2003 medio (ligeramente húmedo). En 1993 y en 1995 los bajos caudales del

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 el tercio del valor medio. Estas notables fluctuaciones interanuales forman parte de la naturaleza y esencia de Doñana.

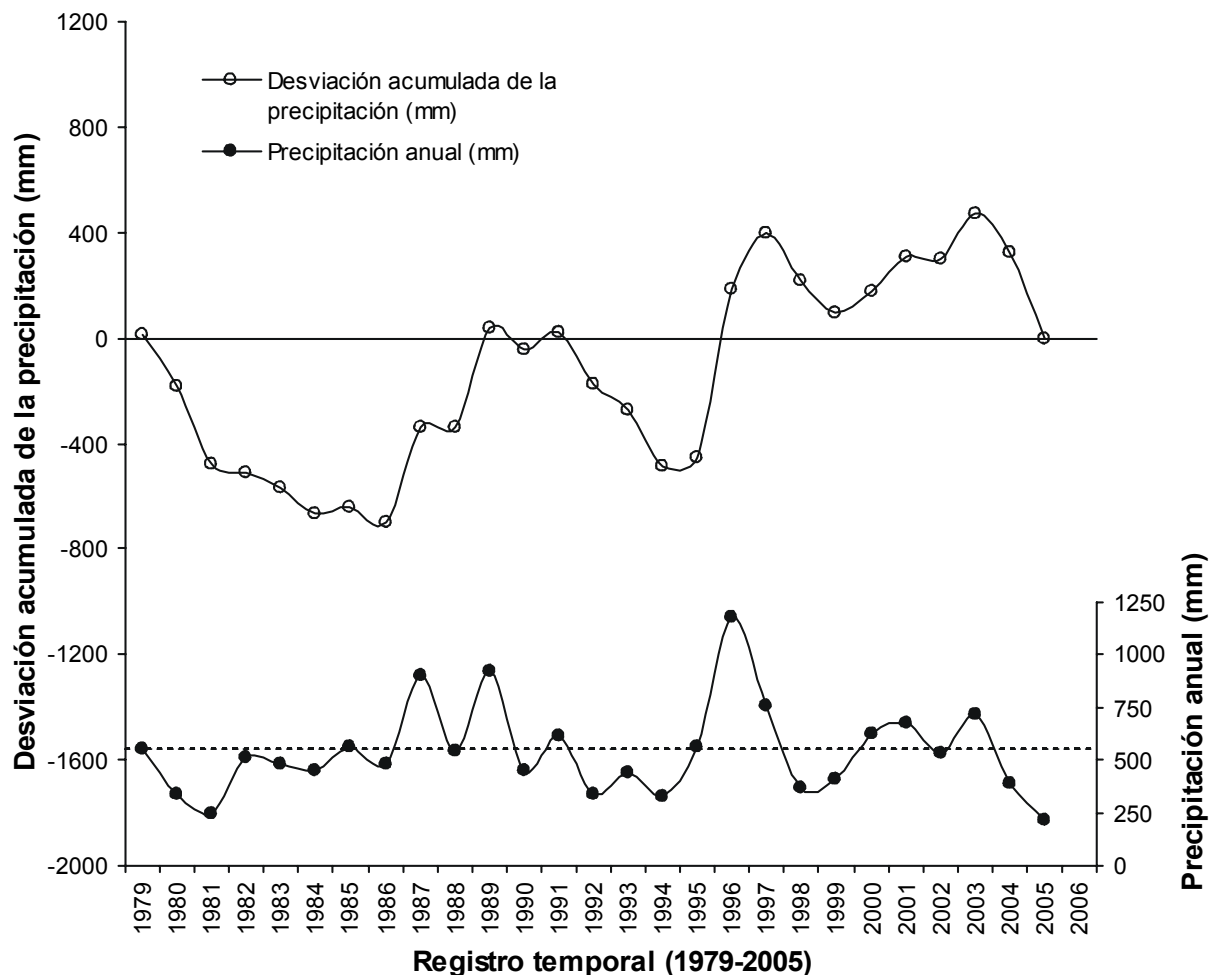


Figura 1.5.– Desviación acumulada de la precipitación registrada en la estación del Palacio de Doñana durante el periodo 1979–2005 (precipitación media = 539,6 mm).

Para lograr una mejor perspectiva de los periodos húmedos y secos se ha utilizado la serie de Sevilla–Tablada entre 1992 y 1990, extendida hacia atrás con los datos pluviométricos de la Iglesia de la Anunciación (Sevilla) que existen desde 1866 hasta 1967. No habiendo sido posible actualizar los datos de Sevilla–Tablada durante la preparación de la figura por las dificultades de adquisición de la información meteorológica, se ha utilizado la estación del Palacio de Doñana para su extensión. Se han realizado las curvas de doubles masas de los periodos comunes para homogeneizar la serie de Sevilla–Tablada (ver Apéndice). En el periodo total reconstituido se tiene una precipitación media de 573 mm/año.

En la Figura 1.6 se han representado las desviaciones anuales acumuladas de la media, asignadas a Sevilla–Tablada, como representación aproximada (algo más húmeda) de la situación pluviométrica a lo largo de los años en Sevilla.

Muy groseramente parece haber un ciclo de unos 40 años muy irregular. Una anomalía principal aparece en 1960–65 (extensible hasta 1972), que es un periodo anormalmente húmedo, precedido por un periodo moderadamente seco de entre 1940 y 1959 y seguido de otro periodo seco entre 1972 y 1985, que es cuando se inician las principales desarrollos de aguas subterráneas en Doñana y se arrancan los trabajos hidrogeológicos.

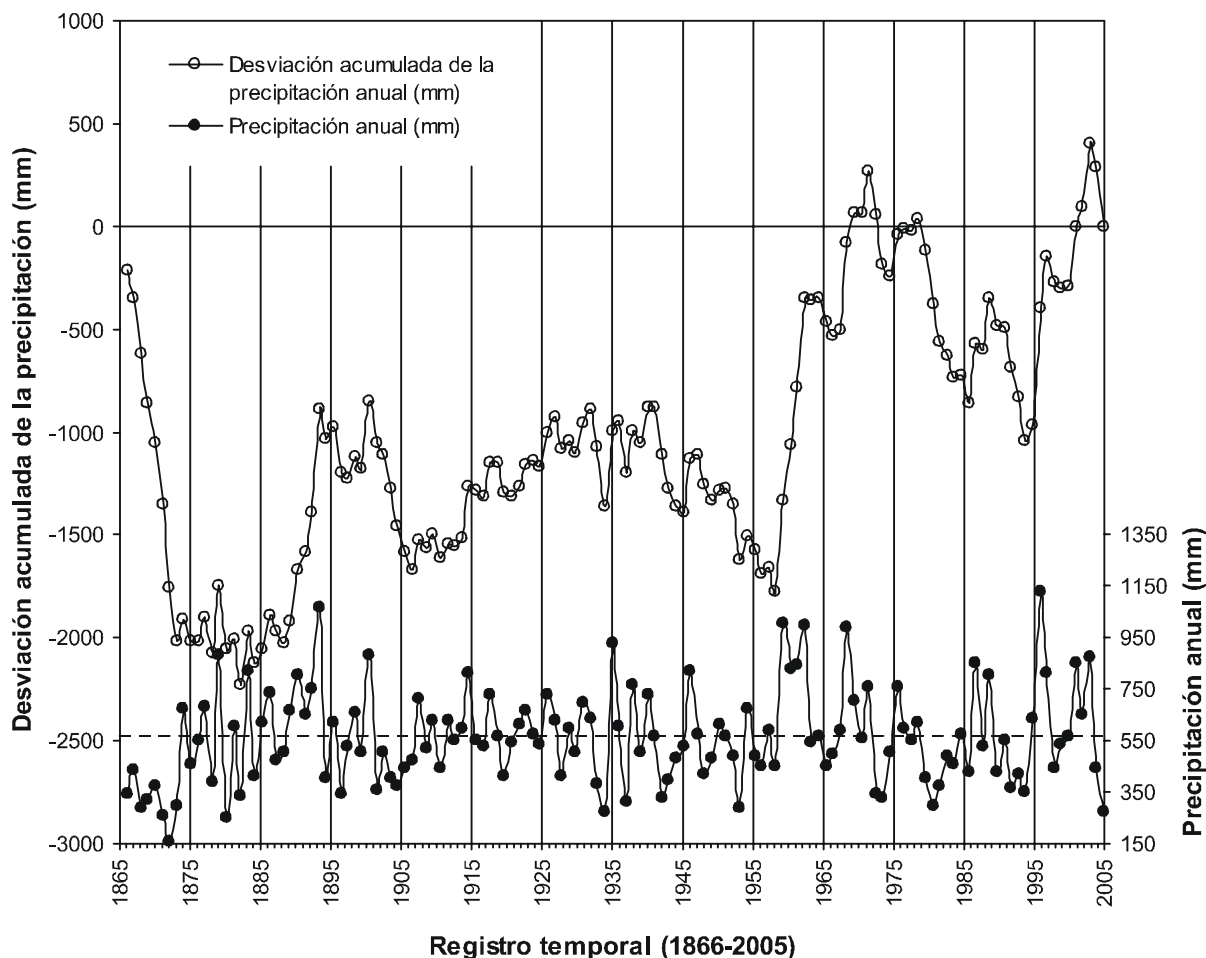


Figura 1.6.– Desviación acumulada de la precipitación registrada en la estación de Sevilla–Tablada (precipitación media = 555,4 mm). Los valores de los periodos 1886–1921 y 1991–2005 se han estimado mediante el método de dobles masas a partir del registro temporal coincidente en las estaciones Sevilla–Iglesia de la Anunciación (periodos 1922–1930 y 1951–1966) y Palacio de Doñana (periodo 1979–1990).

1.2.– Aspectos generales

Doñana y su comarca no son concebibles sin hacer referencia al agua, que es el sustento y el motivo de su importancia como reserva de la Naturaleza, además de ser un recurso clave para la población residente y visitante. De aquí que de entre los muchos valores locales a considerar y valorar, y que se deben gestionar con cuidado y racionalmente, se haga siempre referencia especial al agua como condicionante esencial y fundamental.

El agua tiene dos aspectos principales. El más fácil de apreciar y el que tiene mayor impacto en el visitante es el agua superficial, tanto por su presencia

inundando temporalmente la vasta extensión de la marisma del Guadalquivir, como por su ausencia al dejar una extensa llanura seca en verano con solo ocasionales manifestaciones hídricas residuales y unas pocas lagunas permanentes a las que acuden tanto las aves como la fauna terrestre. Se trata en su mayor parte de agua que escurre desde las cuencas vertientes a la Comarca de Doñana y que son en parte exteriores a la misma. Buena parte procede o procedía de la cuenca alta y media del río Guadamar y de los reboses del Guadalquivir. Ambos aportes están controlados hasta cierto punto antrópicamente mediante obras de ingeniería hidráulica.

El otro aspecto del agua es el subterráneo, 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. Este agua se recarga casi exclusivamente por infiltración de la lluvia local, y solo es incrementada en pequeña cantidad por retornos de riego en los terrenos irrigados con la propia agua subterránea local, por infiltración de aguas usadas (que son también aguas subterráneas de origen local) y por pequeños aportes del río Guadamar en su tramo inferior antes de entrar en la marisma, donde la existencia actual de extracciones de agua subterránea favorece su recarga.

Este enorme acuífero es en general de permeabilidad baja a moderada, aunque ocasionalmente existen algunos niveles groseros en profundidad que pueden ser localmente bastante más permeables. Se le conoce tradicionalmente como Acuífero 27 (antigua nomenclatura del IGME; actualmente es 05-51 por la parte que corresponde a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHGQ), que es la mayor parte) y más comúnmente, como Unidad Almonte-Marismas. La Figura 1.7 indica los límites de las diferentes unidades hidrogeológicas y su denominación. El acuífero descarga continuamente al mar a lo largo de la costa, a los arroyos principales (La Rocina), al río Tinto y sus afluentes (salvo perturbaciones por las extracciones), y a los ecotonos o franjas de contacto entre las arenas y la marisma, además de alimentar extensas superficies vegetales con plantas freatófilas, tanto naturales (monte negro y los bosques en galería que subsisten) como plantadas (principalmente eucaliptos) y de mantener el agua de muy numerosas lagunas temporales y algunas permanentes (sistema de Santa Olalla). Estas descargas naturales de agua subterránea y los caños y arroyos asociados son una parte esencial que explica la riqueza ecológica de Doñana. Las descargas artificiales mediante pozos son también un recurso básico para la población estable, la agricultura de regadío y el turismo.

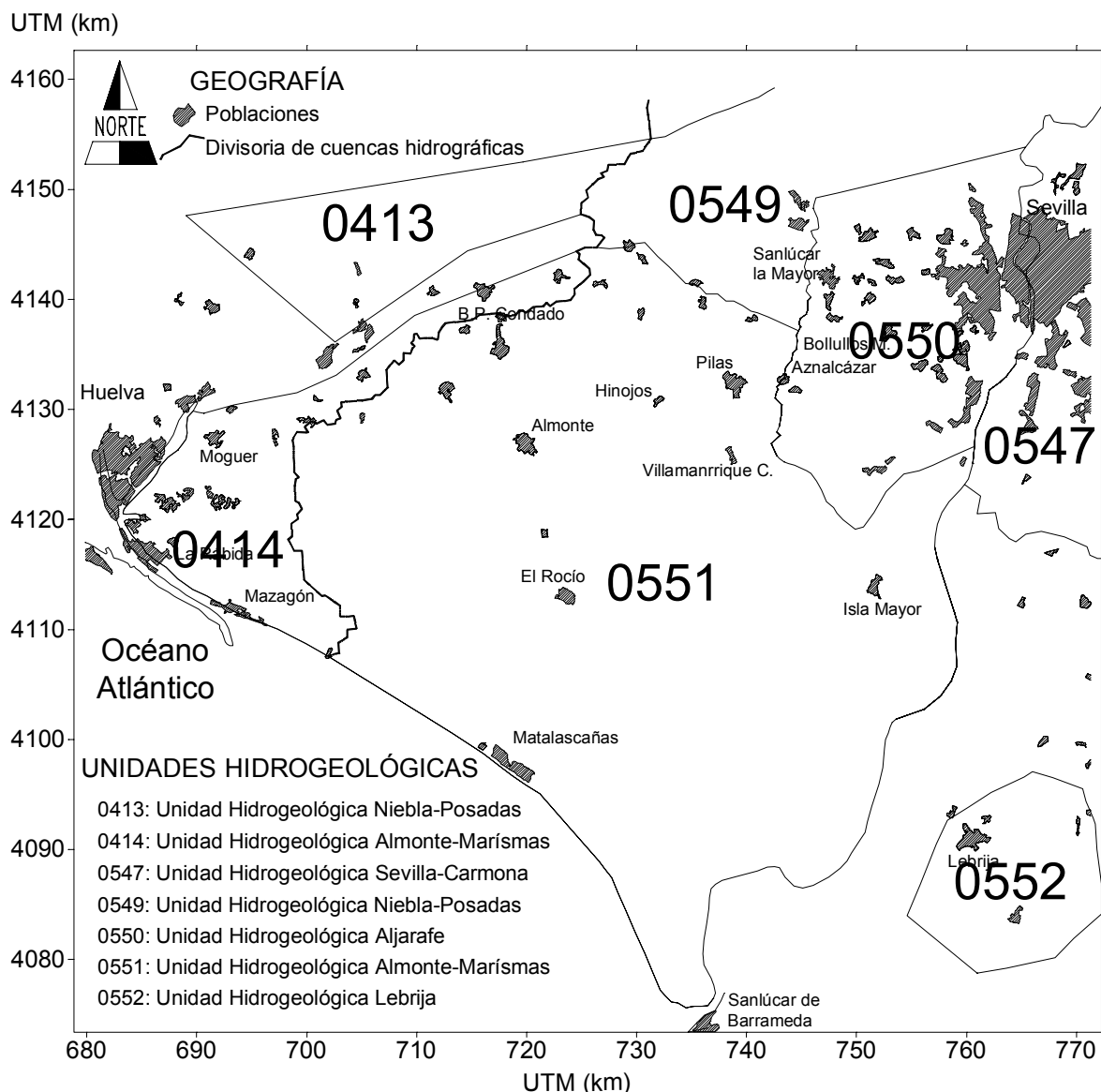


Figura 1.7.— Unidades hidrogeológicas en la Comarca de Doñana y sus alrededores. Fuente: IGME (1998).

Entre las vías superficial y subterránea del ciclo hidrológico existen conexiones, principalmente la descarga de agua subterránea que alarga la vida de las zonas encharcadas y encharcadizas, y que mantienen habitats húmedos permanentes para refugio de la fauna residente, y que sustenta 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 territoriales de la zona. Dado que a efectos prácticos la recarga es la misma que entonces –salvando diferencias por cambios en la vegetación y por descenso del nivel freático– 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 se vierten a cauces y al mar– es desviada 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 de la Comarca de Doñana, y cuya apreciación ha ido cambiando a lo largo del tiempo.

Lo anteriormente referido se centra en el aspecto de cantidad de agua. Pero también el aspecto de calidad, o de composición química y físico-química de las aguas es de importancia clave por cuanto afecta a la vegetación y a su través a la fauna y al propio hombre, además de su importancia en cuanto al aporte y generación de sedimentos. Este es un aspecto mal conocido y preocupante, por cuanto la agricultura y la población contribuyen nutrientes y contaminantes al sistema superficial, directamente o a través de los sistemas subterráneos, en éste último caso con aparición muy retrasada y modificada. El arrastre de sedimentos tiene un serio impacto en las áreas llanas de marisma, y en buena parte es debido a prácticas agrícolas y a cambios en la cobertura vegetal del territorio.

Estos planteamientos son los mismos que ya se hicieron en el Dictamen del Comité Internacional de Expertos de 1992 (CIED, 1992), pero el grado de conocimiento y la conciencia sobre la necesidad de conservación y protección ha crecido y evolucionado notablemente, y tanto la Administración con competencia e influencia sobre los recursos hídricos como los usuarios han adquirido una actitud más positiva hacia la conservación de la Naturaleza.

Las necesidades de estudio, conocimiento y datos hidrológicos, y de uso del agua en un determinado territorio, han de ser proporcionados a la situación de que se trate, teniendo en cuenta la complejidad e importancia ecológica del sistema. Estos son los principios que se aplicaron en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de 1992 y los que se aplican aquí ahora, en un contexto de presiones que no ha variado substancialmente desde esa época, si bien, como se ha dicho antes, el grado de conciencia social ha despertado notablemente.

Hidrológicamente, Doñana y su comarca fueron escasamente conocidas 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, y la introducción del bosque de pinos en las primeras décadas del siglo XX y de eucaliptos hacia mediados del mismo siglo. Previamente y durante siglos, la débil pero no nula ocupación humana actuó sobre parte del territorio, pero lentamente y con presión reducida, integrándose en el contexto. En las últimas décadas los cambios y alteraciones se han sucedido con rapidez inusitada.

Los estudios hidrológicos apoyados por la FAO a finales de la década de 1960 y los del Proyecto de Transformación en Regadío del Área Almonte-Marismas iniciados en 1972 supusieron un notable avance en el conocimiento y generación de datos, pero en solo una parte del territorio, existiendo numerosos vacíos. Esta fue la situación hasta 1991, que fue objeto de Dictamen en 1992 (CIED, 1992).

1.3.– El Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos

El Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de 1992 (CIED, 1992), elaborado con datos hasta 1991, apunta las deficiencias en la red foronómica y de observación de las aguas superficiales en la marisma. La situación es mejor

en lo que se refiere a las aguas subterráneas, aún no siendo satisfactoria. Se indica los numerosos trabajos de modelación realizados, pero apoyados en bases documentales pobres o poco referenciadas. Se insiste en la dificultad de obtener cifras de la recarga al acuífero con precisión y acotando la incertidumbre. La gestión del agua es una tarea que no puede basarse en cifras precisas y que por lo tanto exige actuar sobre el sistema hídrico bajo un grado inevitable de incertidumbre y asumiendo que se producen notables variaciones anuales respecto a los valores medios. Es algo naturalmente inherente al funcionamiento hidrológico, tanto si se refiere a las aguas superficiales como a las subterráneas, aunque los comportamientos, conocimiento y naturaleza de los errores son diferentes.

Ante la incertidumbre de datos del momento del Dictamen –que ha ido disminuyendo con el tiempo– se optó por aportar un balance horquillado, que mostraba una reducción importante de las descargas naturales, las que quedaban reducidas a una cantidad entre la mitad y la cuarta parte o menos del valor natural. Quedaban fuertemente afectadas las áreas del ecotono norte y borde del Río Tinto, bastante afectadas La Rocina y el ecotono oeste, y en menor proporción la descarga al mar, y todo ello para unas extracciones totales en el año 1991 evaluadas entre 62 y 73 hm³. Estas cifras de la horquilla pueden tener un error importante, quizás hasta del 20% a un lado y otro del valor central. Eso explica que otros trabajos den cifras diferentes que sean igualmente creíbles. En el Dictamen se insiste en la necesidad de un control más fino y realista de las extracciones por bombeo.

También en el Dictamen se apunta la gran escasez de datos de calidad de las aguas, en especial de las superficiales, y se llama la atención sobre el problema real que supone el gran incremento de nitratos en el acuífero en el área de Moguer, y también en el área norte de El Rocío y bajo Matalascañas. Sin embargo la información que se disponía era muy fraccionaria.

Las recomendaciones que hacen referencia al agua incluyen la medida más precisa de las extracciones para usos agrícolas y de abastecimiento, la mejora de la red piezométrica y de calidad, los aforos de agua superficial en cauces y la medida de niveles en la marisma, junto con una muy detallada topografía del vaso de la misma, la reducción o supresión de los bombeos de agua subterránea para el riego del arroz, el control adecuado de la calidad del agua superficial y del agua subterránea con vistas a los problemas ecológicos que se puedan derivar, y un saneamiento de los vertidos poblacionales y agroindustriales del área, en lo posible dando preferencia a las tecnologías blandas.

En cuanto a las extracciones de agua subterránea se recomendaba reubicar y reducir los bombeos, 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 8 hm³/a en el Sector regable I (Villamanrique de la Condesa y Encauzamiento del Guadiamar) y de 12 hm³/a en el Sector regable III (Villamanrique de la Condesa) y sin cultivo de arroz regado con agua subterránea, aceptando hasta 8 hm³/a para abastecimiento (sin incluir en ello las poblaciones al Este del Guadalquivir), y de 2 hm³/a para mantenimiento del encharcamiento de lucios y

charcas con interés como habitats (FD21, 2003). Las actuaciones a realizar incluyen como urgentes e importantes las de clarificar la titularidad y legalidad de los pozos y extracciones que se hacen en ellos, y la de establecer medios de medición.

Se indicaba que era recomendable evitar ajardinamientos con alta demanda de agua, salvo que se puedan abastecer con agua de reutilización si ello no crea un problema de calidad, pero en Matalascañas, Magazón y los campings el agua residual tratada podría tener un uso en humedales (FD21, 2002). También se hacía mención a la necesidad de reducir el empleo de fertilizantes y otros productos agroquímicos.

Se apuntaba también que era preciso ordenar y dirimir los derechos legales de los regadíos de arroz con agua superficial, aunque esto afecta menos a la hidrología de la Comarca 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 la Comarca de Doñana, la que se podría realizar a través de un Consejo de Gestión del Agua, asistido por un Consejo Científico del Agua, que recibiría encomiendas de los organismos que tienen la responsabilidad legal.

El Dictamen no se oponía a la traída de aguas a la Comarca 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 debería ser llevada fuera del área o en todo caso debería tener una depuración suficiente.

1.4.- Aspectos legales

En el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos (CIED, 1992) ya se hacía referencia a la Ley 29/1985, de 2 de Agosto, de Aguas, que declaraba todas las aguas, superficiales y subterráneas, del dominio público, y a que la gestión quedaba atribuida en lo que se refiere a la Comarca de Doñana a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, salvo una pequeña parte del área occidental que corresponde a las competencias de la Confederación Hidrográfica del Guadiana. Cabe resaltar que esa atribución legal es clara, y se ejerce por encima de las competencias en materia de gestión de recursos de agua, saneamiento, abastecimiento u otros que puedan tener la Junta de Andalucía o los Municipios, aunque sin esconder las complejidades que pueden surgir. Desde principios de este año de 2006 la gestión de las pequeñas cuencas que vierten al mar entre Cádiz y Huelva y están enteramente dentro de Andalucía, incluyendo los ríos Tinto y Odiel, pero el Guadiamar, se ha transferido a la recién creada Dirección General de la Cuenca Atlántica Andaluza, dependiente de la Agencia del Agua (creada en 2005). Así, el área de la Comarca de Doñana no es arena del Guadalquivir es ahora JA y no depende ya de la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHGU), aunque en el texto se haga referencia a ella por razones históricas.

Desgraciadamente, las circunstancias que acompañaron a la promulgación de la Ley de Aguas de 1985 incluyeron disposiciones transitorias a largo plazo que han dejado temporalmente parte de las aguas subterráneas en el dominio privado, aunque 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 Comisarias de Aguas. Tampoco el Plan Hidrológico de la Cuenca del Guadalquivir, redactado a consecuencia de la Ley de Aguas, contiene previsiones específicas para la Comarca de Doñana salvo algunas indicaciones de transferencias de aguas. Salvando situaciones particulares y los a veces notables esfuerzos de personas concretas, estas Comisarias de Aguas, hoy parte de las Confederaciones Hidrográficas, o los organismos equivalentes, 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. La Comarca de Doñana ha sufrido fuertemente esta situación, que afortunadamente está empezando a cambiar institucionalmente.

En el preámbulo del Decreto 735/1971 de 3 de Abril en el que se recogen 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, tras su declaración de interés nacional, mediante la captación de aguas subterráneas. 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 (BOE, 1971c) 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 dicha Ley (Artículo 1.2) 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 van 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.

Los derechos de aguas en la Zona Regable Almonte–Marismas 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, insta el reconocimiento de parte de los derechos de que es titular a través de dicha vía. Por otra parte se constituyen 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 efectúan acción alguna. De aquí una causística que complica el tratamiento legal y ha hecho lenta e insegura la actuación de las Confederaciones Hidrográficas. Según expertos de la propia Comisaría de Aguas del Guadalquivir, una posible salida lógica sería la de dar un tratamiento administrativo análogo a la regularización, dentro de lo establecido en los Planes Hidrológicos (Orden Ministerial de 13 de Agosto de 1994 para la Cuenca del Guadalquivir), pero reconociendo que por diversas circunstancias arraigadas con el paso de los años, cada subsector de la Zona Regable ha evolucionado hacia una situación que requiere un tratamiento administrativo de carácter específico, sin esconder la complicación y esfuerzo que ello conlleva.

En 2004 se amplía el Parque Nacional de Doñana en la resolución de 6 de Febrero y en 2005 una sentencia del Tribunal Constitucional declara que el Parque Nacional de Doñana ha de tener una gestión única y atribuible a la Junta de Andalucía, con lo que se modifican las competencias que tenía el Ministerio de Medio Ambiente. La nueva forma de gestión debería comenzar a operar en 01.07.06.

1.5.– Actividades hídricas en la Comarca de Doñana

En el periodo 1992–2006 se han realizado numerosas actividades en la Comarca de Doñana que tienen relación con la hidrología, con las que han avanzado tanto el conocimiento, como la información, como las posibles vías de gestión hídrica, si bien no cubren todo lo que se apuntaba como deseable en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos sobre Doñana (CIED, 1992), y en diversos aspectos aún se está en un estado incipiente.

Dado el punto de vista del conocimiento científico se han realizado varias tesis doctorales y de maestría o graduación de contenido hidrogeológico (Rodríguez Arevalo, 1984 y 1999; Tenajas, 1984; Vela, 1989; Iglesias, 1999; Trick, 2001; Lozano, 2004; Coletto, 2003; Poncela, 1993; Castro 1999), en buena parte dentro de proyectos, primero de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y después de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC). 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 [FLUMEN]. Se ha avanzado en el conocimiento 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). Otro nuevo modelo ha sido realizado por el IGME. Tanto la UPC como el IGME, y más recientemente la Universidad Politécnica de Cartagena (UPCT), han continuado con estudios hidrogeológicos diversos, que incluyen estudios geohidroquímicos e isotópicos ambientales.

Por otro lado el Instituto Geológico y Minero de España, IGME, como Organismo Público de Investigación con competencia e interés en hidrogeología ha realizado estudios diversos, empezando por la colaboración en el proyecto FAO inicial, directamente o a través de su Oficina de Proyectos en Sevilla.

La red piezométrica se ha extendido notablemente bajo la responsabilidad de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, con la asesoría de la UPC y del IGME, y hoy abarca buena parte de los lugares de interés, con puntos de observación en gran parte del área, a distintas profundidades y con puntos especiales para la observación del nivel freático. En la construcción material han participado la propia Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, el ahora extinto Servicio Geológico de Obras Públicas (del MOPU) y el Instituto Geológico y Minero de España. Esta red se mide mensualmente y una parte de ella está instrumentada con limnógrafos. Pero no hay medidas regulares de la calidad del agua subterránea, y la información se limita a datos ocasionales de algunos pozos de bombeo y a los que se derivan de los estudios de investigación en los que han realizado o se realizan otras actividades.

La red foronómica y de calidad de las aguas superficiales se limita a cuatro puntos en cauces, y el Parque Nacional de Doñana mide niveles en marisma de forma automática (5 estaciones) desde hace unos 3 años, pero no hay datos sistemáticos de salinidad y calidad.

Las actuaciones públicas en Doñana de la Junta de Andalucía y del Ministerio de Medio Ambiente que hacen referencia al agua se orientan según los documentos:

- Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional de Doñana (PRUG–Doñana), del Ministerio de Medio Ambiente y la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (2000) y revisión de 2004 (Decreto 48/2004 de 10 de febrero)
- Criterios Ambientales para la Gestión del Agua en Doñana. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (1999)
- Proyecto de Restauración Hidroecológica Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente (1999)
- Corredor Verde del Río Guadiamar. Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (1999)
- Programa Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente (1999)
- Plan de Ordenación del Territorio del Ámbito de Doñana (POTAD). Decreto 341/2003 de 9 de diciembre
- Plan de Ordenación de los Recursos Naturales del Parque Natural de Doñana. Revisión del PORN/PRUG, Decreto 97/2005 de 11 de abril

Sus contenidos están orientados a reducir la presión sobre los recursos naturales y el medio ambiente, dando prioridad a la conservación de los recursos naturales y a la mejora del modelo de desarrollo que se viene realizando en el marco del Plan de Desarrollo Sostenible del Entorno de 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 la consideración de

objetivos económico–sociales a medio y largo plazo, con preferencia a las acciones infraestructurales puntuales y ocasionales, que han sido frecuentes en el periodo transcurrido anterior.

El desarrollo sustentable incluye como parte esencial los recursos hídricos y su integración ambiental y en el mismo juegan un papel importante la actividad agraria (horticultura fruticultura y cultivo del arroz) y la turística. En el Plan de Desarrollo Regional de Andalucía 2000–2006, en cuanto a Doñana y su entorno tiene en cuenta el Proyecto Doñana 2005, el Corredor Verde del Guadiamar, las repoblaciones forestales con especies autóctonas y la reforestación de tierras agrícolas, la recuperación de riberas, la consolidación del suministro de agua y de modernización de las zonas regables, las estaciones depuradoras de aguas residuales, las estaciones de vigilancia de la calidad de las aguas y la reutilización de aguas residuales (FD21, 2002). Pero según WWF/Adena (WWF–Adena, 2001), el plan carece de mecanismos para priorizar las actuaciones en función de los intereses y valores del espacio. Se requiere que el Plan de Ordenación cuantifique los objetivos y establezca indicadores, con participación social y de las instituciones implicadas, para promover el uso sustentable y abordar los problemas ambientales que existen en los sectores agrícolas y de turismo. Desde 1992 se ha avanzado lentamente en este sentido.

El Proyecto de Restauración Hidroecológica Doñana 2005, conocido como “Proyecto Doñana 2005”, surgió en mayo de 1998 como actuación del Ministerio de Medio Ambiente tras el accidente minero de Aznalcóllar, y es complementario al Proyecto “Corredor Verde del Guadiamar”, de la Junta de Andalucía. Abarca los diversos cauces afluentes a la marisma y parte de la propia marisma. El Proyecto “Doñana 2005” está liderado por el Ministerio de Medio Ambiente y actualmente se desarrolla en coordinación con la Junta de Andalucía. Es una de las grandes oportunidades para tratar de restaurar ecológicamente el área de Doñana y sus humedales en un contexto respetuoso con la Naturaleza y el alto valor del territorio. Aunque arrancó con retraso y con dificultades de coordinación, sus fundamentos ecológicos iniciales fueron a veces escasos, y sus actuaciones carecían en parte de flexibilidad, visión de cuenca y del conjunto territorial, y de soporte científico suficiente y adecuado, en sus etapas actuales se ha reforzado el apoyo ecológico y el apoyo científico, y se han ido corrigiendo parte de los defectos del inicio.

Las actuaciones principales del Proyecto Doñana 2005, declaradas en abril de 1999 de utilidad pública en cuanto a las obras, son:

- 1.– restauración de los arroyos de la Laguna de los Reyes, Soto Grande y Soto Chico
- 2.– mejora y ampliación de la depuradora de El Rocío
- 3.– restauración del arroyo del Partido
- 4.– restauración de la Marisma Gallega transformada
- 5.– reactivación del Caño Guadiamar
- 6.– reactivación del Caño Travieso
- 7.– recuperación del Brazo de la Torre en su tramo mareal inferior
- 8.– prolongación de la Montaña del Río
- 9.– evaluación y seguimiento del programa

- 10.– investigación asociada al programa
- 11.– difusión del programa

Estas actuaciones son paralelas a:

- A.– Proyecto básico del Corredor Verde del Guadiamar
- B.– Regeneración de la zona afectada por el vertido de Aznalcóllar
- C.– Propuesta de calidad exigible a las aguas del río Guadiamar

El proyecto está orientado principalmente a obras, con una serie de actuaciones de estudio e investigación (en número de 10). Ya se ha iniciado el estudio de aspectos concretos, como la definición del vaso e hidrodinámica de la marisma, o el efecto sobre las aguas subterráneas de la remodelación de arroyos. Las líneas de investigación incluidas inicialmente en la actuación 10 eran:

- Topografía de la marisma
- Modelización de la hidrología superficial de la marisma. Aportaciones balances y déficits hídricos
- Dinámica sedimentaria
- Evolución de las comunidades vegetales de la marisma
- Evolución del pláncton de la marisma
- Evolución de la avifauna de la marisma
- Dinámica química y metales pesados en los sedimentos de la marisma
- Presencia y movilización de metales pesados en las cadenas tróficas

La inversión prevista era de 180 Mpta (1,08 M€), a gastar ente 1999 y 2005 y continuación posterior. El presupuesto total era de 13949 Mpta (83,84 M€). Se trata pues de una proporción del 1,3%, que aunque es algo más alta que lo que dedica España actualmente a I+D (1,03% del Producto Interior Bruto) se antoja como muy insuficiente como previsión (sería más razonable llegar al 3–4% del presupuesto total). El presupuesto actual es mayor, aunque no se puede decir si la proporción de I+D ha mejorado ya que los fondos asignados salen de las diferentes actuaciones.

Con la participación científica recientemente incorporada la orientación está tomando un rumbo más seguro. Los grupos activos actuales son:

- 1.– Estación Biológica de Doñana
- 2.– Caracoles (en relación con la finca de ese nombre en la Marisma)
- 3.– Hidrodinámica
- 4.– Hidrología del Arroyo del Partido
- 5.– Agua Subterránea
- 6.– Geomorfología
- 7.– Macroinvertebrados
- 8.– Distribución de población de conejos
- 9.– Limnología
- 10.– Restauración vegetal
- 11.– Relaciones hídricas de la vegetación
- 12.– Seguimiento de la contaminación
- 13.– Evaluación de ecosistemas
- 14.– Base de datos
- 15.– Ambiente internacional

- 16.– Agricultura
- 17.– Caracterización funcional de la Marisma y su entorno
- 18.– Comunidades fito-zooplánticas y características físico-químicas del agua

El Proyecto del Corredor Verde del Guadiamar, de 1998, se ha establecido sobre 40 km de río, en una anchura de 0,5 a 1 km. Ha adquirido 4445 ha de terreno y ha expropiado 500 ha.

1.6.– Implantación de la Directiva Marco Europea del Agua

La promulgación de la Directiva Marco del Agua 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 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.

La DMA en muchos aspectos 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. Por ello está previsto una Directiva Derivada sobre el Agua Subterránea, que ya debería estar promulgada, pero que por dificultades de elaboración se ha ido retrasando. El borrador está en su fase final y podría ser publicado en breve.

En estos momentos la DMA ha sido ya incorporada a las legislaciones nacionales y se están desarrollando los reglamentos de aplicación que puedan ser necesarios, sin perjuicio de que los plazos fijados para ir cubriendo sucesivos objetivos se vayan cumpliendo. A este respecto la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (y la del Guadiana respecto en la porción occidental de la Comarca de Doñana), como autoridad responsable, ha ido avanzado en la preparación de los documentos a que hacen referencia los artículos 5 y 6 de la DMA sobre definición y caracterización de los cuerpos (masas) de agua.

La DMA ha supuesto en Europa, y por supuesto también en España, y en el caso concreto de la Comarca de Doñana, un potencial formidable paso adelante, aún en sus inicios, pero con consecuencia de alcance importantes. Sin embargo, aún no ha dado lugar a actuaciones importantes, pero sí ha creado en los organismos una preocupación por su desempeño que supera lo conseguido con anteriores disposiciones, y que está empujando actuaciones largo tiempo diferidas, como es la posible supresión del cultivo del arroz con aguas subterráneas en el área de los Hatos (Sector III del PTAAM).

1.7.– Publicaciones sobre el agua en la Comarca de Doñana y área de influencia

Doñana ha sido siempre un atractivo para estudiosos, que han dejado numerosas publicaciones, pero éstas hacen referencia preferente a la fauna y habitats, y a descripciones de éstas. No sucede lo mismo en Ciencias de la Tierra, mucho menos tratadas, y en especial en lo que respecta a la hidrogeología, y aún más a la hidrología superficial. Los primeros trabajos relevantes no aparecen hasta finales de la década de 1960 y guardan relación con el proyecto FAO–Gobierno Español del Bajo Guadalquivir, y con el Proyecto de Transformación en Regadío del Área Almonte–Marismas (FAO, 1969a, 1969b, 1969c). Incluso el propio Instituto Geológico y Minero de España, como máximo órgano científico–técnico en la materia, no empezó a trabajar regularmente hasta entonces, y se equipó con una oficina de proyectos en Sevilla.

Tras ese primer impulso hidrogeológico, no es hasta finales de la década de 1970 cuando se inician las investigaciones hidrogeológicas lideradas por el Departamento de Geodinámica Externa de la Universidad Complutense de Madrid. A mediados de la década de 1980 estas investigaciones son continuadas por transferencia de resultados, por el equipo de aguas subterráneas del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC, que ha continuado hasta el presente. Ahora se dispone también con la colaboración también de la Universidad Politécnica de Cartagena. En los trabajos se han integrado otros grupos de investigación de la Universidad de Córdoba, Universidad Autónoma de Madrid, de la Universidad de Huelva, del IGME y de otros centros. Estas conexiones permitieron en 1998 abordar los trabajos en el Guadiamar tras la ruptura de la balsa de lodos mineros de Aznalcóllar, formando un equipo pluridisciplinar, que además pudo considerar en detalle el posible impacto en Doñana.

Los trabajos en hidrología superficial se iniciaron también en la segunda parte de la década de 1980 por la UPC, pero no han sido financiados hasta hace poco dentro del Proyecto Doñana 2005. Por eso hay mucho menos conocimiento e información generada, a parte de los estudios de la erosión–sedimentación en relación con el Arroyo del Partido para conocer y buscar soluciones al aterramiento de la conexión entre la Marisma del Rocío y la Marisma del Guadalquivir, y que ha venido realizando la Escuela de Ingenieros Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid.

Muchas de las publicaciones que se consideran han contado con el apoyo de conocimiento del equipo del Parque Nacional de Doñana y de la Estación Biológica de Doñana.

En el Anejo a este informe se da una relación no exhaustiva pero lo más completa posible de los trabajos que hacen referencia a la hidrología e hidrogeología de Doñana, o que aportan conocimiento e información relevante sobre aspectos hidrológicos, clasificada por temas.

1.8.– Referencias bibliográficas

- 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.
- 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.
- 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].
- 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.
- 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.
- Iglesias, M. (1999). Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalarío, Doñana, Huelva. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- 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 Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña.
- 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.
- 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. 177 pp.
- 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, F.J. (1998). *Origen y movimiento del agua intersticial en el acuitardo arcilloso de las marismas del Guadalquivir*. Tesis Doctoral. Facultad CC. Geológicas. UCM. 1–316 + anejos.
- Trick, T. (1998). *Impactos 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.
- 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 Geominero de España, Madrid: 114 + anexos. Informe inédito.
- [FLUMEN]: web del Grupo de investigación de Hidrología Superficial de la Universidad Politècnica de Catalunya. <http://www.flumen@upc.edu>
- WWF–ADENA (2001). *Depuración de aguas en la comarca de Doñana. Análisis y propuestas de actuación de WWF–Adena*. 16 pp.

Documentación legislativa

- Decreto 2412/1969, de 16 de octubre (agricultura), de creación del Parque Nacional de Doñana.
- Decreto 735/1971, de 3 de abril (presidencia), por el que se dan normas de carácter técnico y administrativo a la explotación de aguas subterráneas en determinadas zonas de Andalucía.
- Decreto 1194/1971, de 6 de mayo, por el que se declaraba de Interés Nacional la Zona Regable Almonte–Marismas (Sevilla y Huelva).
- Decreto 2101/1971, de 9 de noviembre,
- Decreto 2148/1972, de 8 de julio, por el que se aprueba la primera parte del Plan General de Transformación de la Zona Regable Almonte–Marismas (Sevilla y Huelva).
- Decreto 2244/1974, de 20 de julio, por el que se aprueba la segunda parte del Plan General de Transformación de la Zona Regable Regable Almonte–Marismas (Sevilla y Huelva).
- Ley 91/1978, de 28 de diciembre, del Parque Nacional de Doñana, BOE nº 11, de 12 de enero de 1979.
- Real Decreto 357/1984, de 8 de febrero, por el que se modifica el Plan General de Transformación de la zona regable de Almonte–Marisma para hacerlo compatible con la conservación del Parque Nacional de Doñana. BOE nº 47, de 25 de febrero de 1984.
- Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. BOE nº 189, de 9 de agosto de 1985; corrección de errores en BOE nº 243, de 10 de octubre
- Orden de 13 de agosto de 1999 por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de Cuenca del Guadalquivir, aprobado por el Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio.
- Resolución de 6 de febrero de 2004, de ampliación del Parque Nacional de Doñana (BOE núm. 47, de 24 de febrero de 2004).

Capítulo 2

Redes hidrométricas en la Comarca de Doñana y áreas de influencia

2.1.– Introducción

2.2.– Redes hidrometeorológicas: cantidad y calidad

2.3.– Red de foronómica: cantidad y calidad

2.4.– Red de observación de aguas en marisma y lagunas: cantidad y calidad

2.5.– Redes de observación de las aguas subterráneas: cantidad y calidad

2.6.– Red de medida de la recarga: cantidad y calidad

2.7.– Conclusiones

2.8.– Referencias bibliográficas

Capítulo 2.– Redes hidrometeorológicas en la Comarca de Doñana y área de influencia

2.1.– Introducción

El conocimiento hidrológico con el detalle adecuado a los problemas a afrontar y puesto al día solo es posible con un proporcionado reconocimiento del terreno y con un variado conjunto de herramientas, que dado la complejidad de la naturaleza, han de ser, en lo posible, varias e independientes. Qué herramientas se han de emplear es el resultado de conjugar la naturaleza del problema, con la precisión requerida, los recursos humanos y económicos disponibles, y el tiempo posible.

Pero además de ese reconocimiento, y también como necesidad, se debe disponer de una red de observación y vigilancia, y en su caso de control para la gestión, extendido a lo largo del tiempo y periódicamente adaptada para mejorar la información que se obtiene. Esa red se debe operar y mantener, y los resultados han de archivarlos adecuadamente y hacerlos accesibles, además de elaborarlos y convertirlos en resultados sintéticos que sirvan para cubrir objetivos, asegurar el conocimiento, evaluar las situaciones, tomar decisiones y ayudar a la planificación. Se trata de una inversión a veces significativa, mantenida en el tiempo, poco brillante políticamente, pero esencial para no cometer errores de bulto en la gestión territorial. Sin embargo es uno de los puntos más débiles en muchos aspectos y situaciones.

Afortunadamente en Doñana se ha avanzado notablemente en algunos aspectos, y se está empezando a caminar en otros, pero aún hay situaciones que se pueden considerar que están muy por debajo de lo que se estima que sería deseable.

2.1.– Redes hidrometeorológicas: cantidad y calidad

2.2.1.– Necesidad y aportaciones al conocimiento

La disponibilidad de series temporales de datos hidrometeorológicos suficientemente completas y detalladas de una zona concreta es de extremada relevancia para el éxito de los estudios hidrológicos y la planificación y gestión medioambiental de la misma. Las aplicaciones posibles son múltiples: evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos, de sequías y avenidas, del riesgo de incendios, del posible control de plagas, etc.

Adicionalmente, la posibilidad de combinarlas (en los escasos lugares en que esto es realizable) con datos de composición química e isotópica del agua de lluvia, así como de composición de partículas sólidas en el aire, proporciona una poderosa herramienta para el conocimiento cualitativo y cuantitativo del conjunto del ciclo hidrológico. Por ejemplo, permite cuantificar la escorrentía superficial y la recarga a acuíferos, explicar (a través de sus características químicas e isotópicas) la calidad del agua superficial y subterránea, y predecir, mediante la identificación de los procesos físicos y químicos de control y su

contribución relativa a la cantidad y calidad del agua, las modificaciones previsibles en ambos aspectos ante distintos escenarios de cambio global.

En definitiva, dado que la precipitación es la fuente primaria del agua disponible en cualquier sistema natural, la medición y descripción suficiente y detallada de la cantidad y calidad de lluvia que cae sobre ese sistema debería estar en la base de cualquier programa de gestión de los recursos hídricos de la zona en cuestión.

2.2.2.– Redes meteorológicas que cubren la comarca de Doñana, funcionamiento y acceso a la información

En el conjunto de Andalucía existe una amplia red de estaciones hidrometeorológicas, aunque la mayoría de ellas registra un reducido número de variables: temperatura y precipitación total diarias y valores mensuales. La zona de interés para los estudios a escala regional de Doñana, que abarca aproximadamente desde el estuario del Tinto (al oeste) hasta la margen derecha del río Guadalquivir (al este), y desde el mar (al sur-suroeste) hasta las estribaciones de Sierra Morena (al norte), presenta una disponibilidad de estaciones y datos ligeramente superior a la media andaluza.

Hasta donde se conoce, no existen redes ni estaciones individuales oficiales de calidad del agua de lluvia, aunque sí se han encontrado datos históricos puntuales generados en el marco de proyectos de investigación (Iglesias et al., 1996, 1997 y 1998; Manzano et al., 2001, 2005).

La información parece algo desperdigada y de obtención laboriosa en la mayoría de los casos. Pero esta situación mejorará con seguridad cuando esté completamente operativo el Sistema de Información de Climatología Ambiental (SICA) actualmente en construcción por la Junta de Andalucía [CMA-JA-a], pues se prevé que el mismo integre las mediciones de casi todas las redes que se citan en este documento.

A continuación se realiza una síntesis de las redes inventariadas, su titularidad, alcance y accesibilidad. Buena parte de esta información procede del sitio web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía [CMA-JA-a], y se ha completado con información de los otros organismos que se mencionan, y del propio conocimiento del área a través de los trabajos que se han realizado en la misma.

La información meteorológica de la comarca de Doñana está cubierta por las siguientes redes de estaciones:

○ Red del Instituto Nacional de Meteorología (INM)

El INM tiene en Andalucía alrededor de 900 estaciones termo-pluviométricas, con medición manual diaria de temperatura y precipitación, 42 estaciones automáticas o EMAS, con medición automática cada 10 minutos de velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y precipitación, 9 estaciones sinópticas, con medición manual de

alta precisión, cada 3 horas, de gran número de variables y 14 climatológicas, con medición manual cada 6 horas de gran número de variables, salvo radiación [INM].

De entre todas ellas, las que miden datos de interés para estudios en la Comarca de Doñana se recogen en las Tablas 2.1 (estaciones meteorológicas automáticas) y 2.2 (termopluviométricas), y ambas en la Figura 2.1.

Tabla 2.1.– Estaciones automáticas (EMAS) del Instituto Nacional de Meteorología (INM) en la zona de interés para Doñana. Datos proporcionados por el INM.

Nº EMA	Código	Nombre	Provincia	UTM X	UTM Y	Altitud	Inicio EMAS
E009	4642E	Huelva, Observatorio	Huelva	685320	4128050	19	feb-89
E232	5860E	Aeródromo El Arenosillo	Huelva	701184	4108739	41	mar-93
E033	5787E	Sevilla, Centro Met. Territ.	Sevilla	764703	4143636	11	
E061	5790X	Aero. Tablada/B.A.	Sevilla	764952	4139663	8	jul-88
E802	4548X	Ayamonte "El Moral"	Huelva	647272	4117183	2	jul-88

Tabla 2.2.– Estaciones manuales termopluviométricas del Instituto Nacional de Meteorología (INM) en la zona de interés para Doñana. Datos proporcionados por el INM.

Código	Nombre	Provincia	UTM X	UTM Y	Cota (m)	Inicio	Medidas*
4605B	Huelva Central Térmica	Huelva	681334	4125496	26	1958	P, T
4622	La Palma del Condado	Huelva	716493	4140580	92	1955	P, T
4625A	Niebla Segunda	Huelva	705448	4137341	39	1978	P
4626	Bonares	Huelva	705208	4133109	75	1971	P
4628	Lucena del Puerto	Huelva	701267	4131039	80	1964	P
4645C	Palos de la Frontera, Pitiusas	Huelva	684727	4120266	25	1992	P, T
5842	Hinojos la Calera	Huelva	730221	4124752	41	1986	P
5845U	Bolullos del Condado Majuelo	Huelva	717811	4134384	105	1985	P, T
5848	Almonte C.D.A.	Huelva	720175	4126950	75	1925	P
5856I	Almonte Los Mimbres	Huelva	721204	4109364	20	1973	P
5858	Almonte-Doñana	Huelva	727682	4097228	5	1967	P, T
5859G	Moguer Las Madres	Huelva	690784	4115282	30	1985	P, T
5860G	Almonte Acebuche	Huelva	716370	4103255	47	1984	P
5783	Sevilla Aeropuerto	Sevilla	774014	4146467	26	1951	P, T
5811M	Sevilla Sanidad Vegetal	Sevilla	774014	4146467	14	1993	P, T
5813E	Gines Colegio	Sevilla	758727	4142615	115	1984	P, T
5814	Gelves Torrequemada	Sevilla	755848	4135195	80	1986	P
5814E	Coria del Río Edafología	Sevilla	760861	4131048	30	1985	P, T
5818	Benacazón Montegranado	Sevilla	747041	4135721	100	1968	P, T
5820	Bollullos de la Mitación Cuatrovita	Sevilla	749739	4131943	50	2000	P
5821	Castillo de los Guardas Valdeflores	Sevilla	733620	4179143	348	1986	P
5822	Castillo de los Guardas	Sevilla	736801	4175069	351	1985	P
5832	Sanlúcar la Mayor	Sevilla	747741	4141141	143	1985	P
5833O	Aznalcázar La Juncosa	Sevilla	743749	4134543	20	1976	P, T
5834A	Aznalcázar Dehesa Nueva	Sevilla	745009	4129335	39	1976	P, T
5836A	Pilas Medina Garvey	Sevilla	739322	4131639	65	1966	P, T
5837	Pilas Santillán	Sevilla	736631	4133568	100	1985	P
5839	Villamanrique de la Condesa C.D.A.	Sevilla	739075	4125617	32	1985	P
5843	Villamanrique de la Condesa	Sevilla	735763	4120587	20	1949	P
5859C	Aznalcázar Casilla Brenes	Sevilla	737398	4087809	4	1985	P

* P: precipitación; T: temperatura

El acceso a los datos tiene un coste relativamente elevado. Algunos organismos públicos los tienen en sus bases de datos hasta el momento en los adquirieron o recibieron la última transferencia.

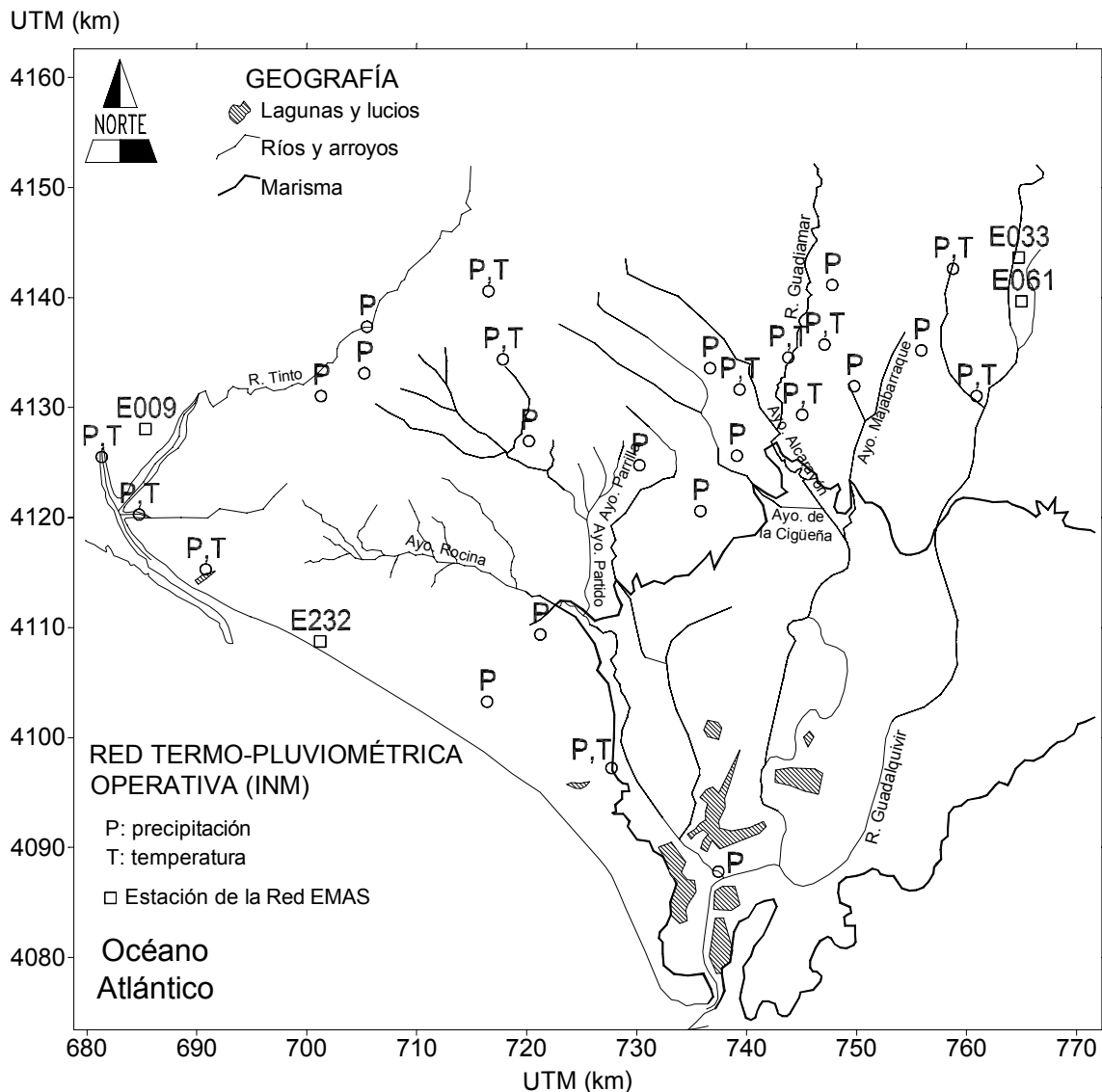


Figura 2.1.– Estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Meteorología (INM) en la zona de interés para Doñana. P, T: estaciones termopluviométricas manuales. EMAS: estaciones meteorológicas automáticas. Fuente: INM (la estación E802 de la red EMAS y otras 3 termopluviométricas quedan fuera de la zona representada).

○ **Redes de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía (CAP-JA)**

La CAP-JA tiene dos redes, una llamada Agroclimática (RIAC) y otra llamada de Alerta e Información Fitosanitaria (RAIFS).

La red RIAC tiene por objetivo la estimación de las necesidades hídricas de los cultivos. Cuenta con alrededor de 90 estaciones automáticas en Andalucía en las que se mide diariamente temperatura, precipitación, radiación solar, humedad, velocidad y duración del viento. Esta red, creada por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, comenzó a funcionar en el otoño del año 2000, por lo que los datos disponibles van desde octubre–noviembre de 2000 a

la actualidad. Las estaciones que se recogen en la Tabla 2.3 y en la Figura 2.2 son de interés para estudios de la comarca de Doñana. La información está disponible en la web de la Consejería de Agricultura y Pesca [CAP–JA–a].

La red RAIFS tiene por objetivo principal la prevención de plagas. Cuenta con unas 80 estaciones automáticas en las cuales se mide precipitación, temperatura del aire y del suelo, radiación y viento. Las estaciones que se recogen en la Tabla 2.4 y en la Figura 2.3 son de interés para estudios de la comarca de Doñana. La información está disponible en la web de la Consejería de Agricultura y Pesca [CAP–JA–b].

Tabla 2.3.– Estaciones de la red RIAC (agrometeorológicas) de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía de interés para Doñana. Coordenadas en metros. Datos de [CAP–JA–a].

Provincia	Nº y Nombre	UTM–X	UTM–Y	Altitud
Huelva	1 El Tojalillo–Gibraleón	674879	4132208	52,0
Huelva	2 Lepe	655814	4123108	74,0
Huelva	3 Gibraleón	671800	4142595	169,0
Huelva	4 Moguer	696178	4113619	87,0
Huelva	5 Niebla	700713	4135997	52,0
Huelva	9 La Palma del Condado	717814	4138619	192,0
Huelva	10 Almonte	724620	4114778	18,0
Huelva	101 Moguer–El Cebollar	162785	4128508	63,0
Sevilla	1 Los Palacios y Villafranca	239190	4118995	21,0
Sevilla	3 Lebrija I	755906	4096340	25,0
Sevilla	5 Aznalcázar	742264	4115401	4,0
Sevilla	6 Villafranco del Guadalquivir	753295	4109806	7,0
Sevilla	7 La Puebla del Río	754404	4124003	25,0
Sevilla	13 Sanlúcar La Mayor	743029	4145411	88,0

Tabla 2.4.– Estaciones de la red RAIFS (Red de alerta e Información FitoSanitaria) de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía de interés para estudios en Doñana. Coordenadas geográficas en grados y altitud en metros. Datos de [CAP–JA–b].

Provincia	Nº y Nombre	Latitud	Longitud	Altitud
Huelva	HU002 Lepe	37° 16' 53"	7° 4' 26"	45
Huelva	HU004 Bollullos Par del Condado	37° 19' 50"	6° 32' 33"	80
Huelva	HU006 Moguer	37° 9' 48"	6° 51' 5"	23
Huelva	HU007 Almonte	37° 6' 23"	6° 51' 5"	20
Huelva	HU0011 Cartaya	37° 20' 55"	7° 9' 9"	73
Sevilla	SE002 Espartinas	37° 23' 6"	6° 9' 0"	150
Sevilla	SE004 Puebla del Río	40° 0' 0"	30° 0' 0"	20

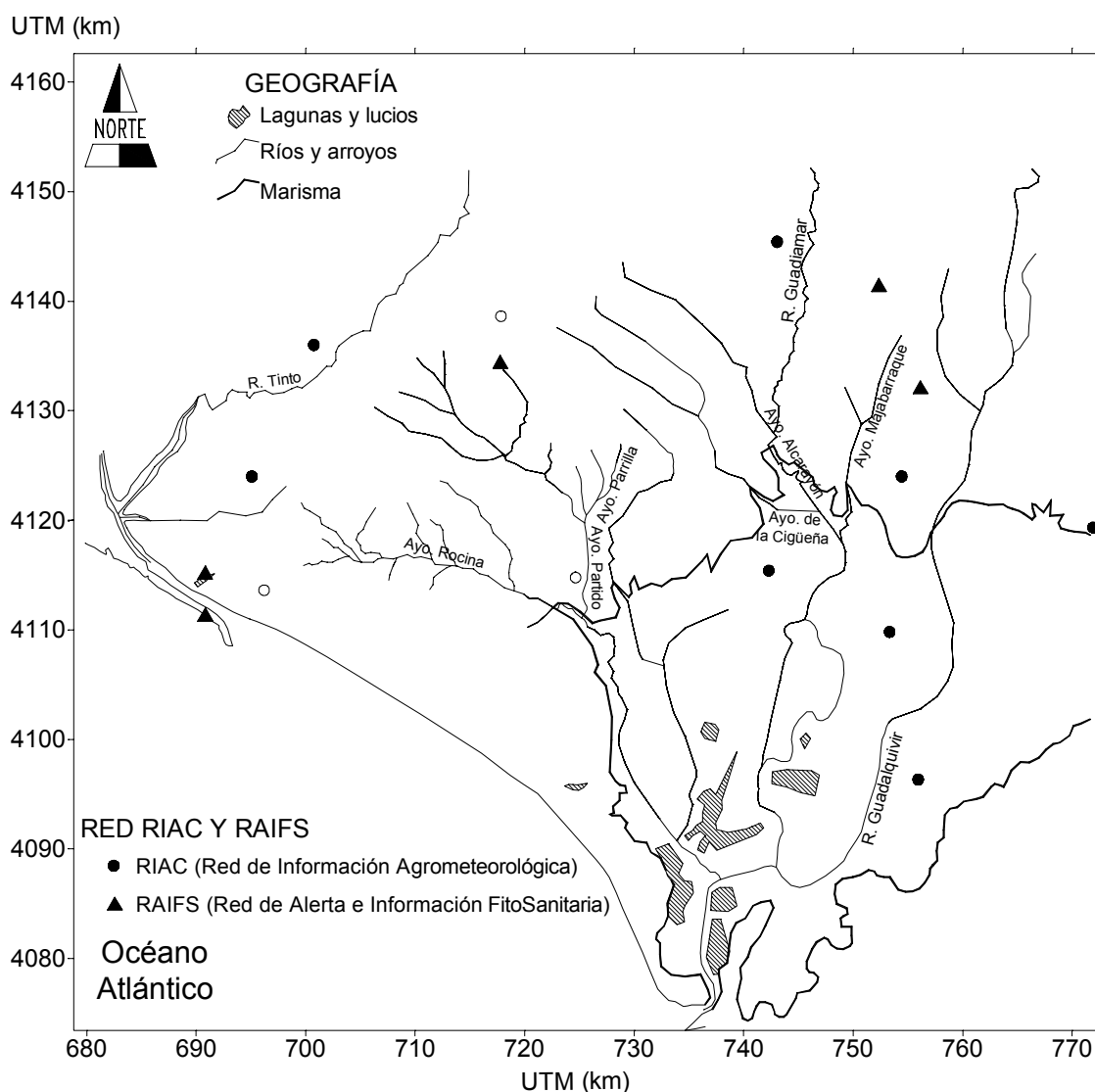


Figura 2.2.– Estaciones meteorológicas de las redes RAIFS y RIAC de la CAP–JA en la zona de interés para Doñana. Modificada de [CMA–JA].

○ **Redes de Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (CMA–JA)**

La Consejería de Medio Ambiente ha creado el subsistema CLIMA en el marco del SINAMBA (Sistema de Información Ambiental de Andalucía) [CMA–JA–a]. El sistema CLIMA reúne en un solo instrumento el conjunto de las redes medidoras de la propia Consejería, del Instituto Nacional de Meteorología, de la Consejería de Agricultura y Pesca, y también en breve plazo la de las Confederaciones Hidrográficas, Tráfico y del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), que dará la predicción de la intensidad de los rayos ultravioleta. La información climatológica, ofrecida por internet, supone un banco de 700 millones de datos, además de dar información cada diez minutos sobre los cambios que se van detectando en temperatura, viento, humedad, etc.

Además, la CMA–JA tiene dos redes propias: la del Centro Operativo Regional de Prevención y Extinción de Incendios (INFOCA), con una treintena de estaciones en Andalucía, y la de la Dirección General de Protección Ambiental (SIVA), con alrededor de 80 cabinas.

Las estaciones de la red INFOCA están distribuidas en zonas forestales de especial interés. Son estaciones móviles sobre vehículos especiales UMMT (Unidad Móvil de Meteorología y Transmisiones) y UNASIF (Unidad de Análisis y Seguimiento Incendios Forestales) del Plan INFOCA. Sólo una de ellas está ubicada en el área de interés de Doñana, cerca del poblado de Los Bodegones, en la cuenca alta del arroyo de La Rocina. El Plan INFOCA creó en la campaña 2002 el Servicio de Información Meteorológica Avanzado que supone, entre otras cosas, medir y/o generar las siguientes variables meteorológicas: temperatura máxima, humedad relativa mínima, velocidad y dirección del viento a varias horas del día, probabilidad de precipitación en 24 horas, su distribución temporal y su cuantía.

La red SIVA consiste en cabinas de medición de contaminación atmosférica, ubicadas en áreas urbanas e industriales, que cuentan también con sensores meteorológicos (precipitación y temperatura). Las estaciones más cercanas al área de Doñana están ubicadas en el río Tinto, una en el valle medio y varias más en el estuario. Los detalles respecto a los parámetros atmosféricos que se miden en las cabinas se pueden ver en el apartado de red de contaminación atmosférica.

No se dispone de las coordenadas geográficas de estas estaciones. Su ubicación se muestra en la Figura 2.3, modificada del mapa de Andalucía que se puede ver en [CMA–JA–a].

SAIH es desigual de unas cuencas a otras y la información pública disponible al respecto no siempre está actualizada, encontrándose a veces falta de concordancia según la fuente consultada. Las dos Confederaciones con estaciones de interés para el área de Doñana son la del Guadalquivir (CHGQ) y la del Guadiana (CHGN).

Según la web actualizada del CEDEX [CEDEX], la red SAIH de la cuenca del Guadalquivir, ya en funcionamiento desde hace algunos años, tiene 118 pluviómetros asociados a otras estaciones de medida, 18 pluviómetros aislados y 6 pluvionivómetros. Se trata de colectores de lectura manual. La mayor parte de ellos, pero no todos, van acompañados de sensores termométricos. En la Figura 2.4 se muestran las estaciones termopluiométricas (cuadrados) de las cuencas del Guadalquivir y del Guadiana en el área de interés para los estudios sobre Doñana.

Según la web de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir [CHGQ], de las varias decenas de estaciones que según la web de la CHGQ han existido en el entorno de Doñana en las décadas pasadas actualmente están operativas las de la Tabla 2.5. Los datos meteorológicos de estas estaciones no están disponibles en la red, debiendo ser solicitados a la CHGQ para su obtención.

Tabla 2.5.– Estaciones termopluiométricas de la red SAIH de la CHGQ operativas en el entorno de Doñana. Coordenadas en metros, referidas al huso 29. Fuente: [CHGQ].

Código	Nombre	Provincia	UTM_X	UTM_Y	Cota	Tipo*
5814	Gelves Torrequemada	Sevilla	755848	4135195	80	PT
5837	Pilas Santillana	Sevilla	736631	4133568	100	P
5838	Hinojos "C de A"	Huelva	732681	4128561	81	PT
5841	Aznalcázar Los Pobres	Sevilla	749073	4119104	20	PT
5844E	Aznalcázar Hato Ratón	Sevilla	739414	4116663	15	PT
5867	Lebrija La Señuela	Sevilla	753822	4100382	4	PT

* P: pluviométrica; PT: termopluiométrica.

La red SAIH de la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHGN) está aún en proceso de equipamiento (Tabla 2.6), debiendo estar operativa en 2008. Aún no hay datos disponibles, pero sí un mapa de ubicación de las estaciones en proyecto [CHGN]. Los cuadros indican las estaciones meteorológicas (precipitación y temperatura) previstas, varias de las cuales están en el entorno de Doñana.

Tabla 2.6.– Estaciones meteorológicas de la red SAIH de la CHGN previstas en el entorno de Doñana. Coordenadas en metros, referidas al huso 30. Fuente: [CEDEX].

Código	Nombre	Provincia	UTM_X	UTM_Y
EM3-17	El Peralejo (El Castillo de las Guardas)	Sevilla	199134	4180024
EM3-18	Valverde del Camino	Huelva	168400	4165978
EM3-19	La Contienda (Escacena del Campo)	Huelva	199003	4153051
EM3-20	La Palma del Condado	Huelva	186465	4141674

UTM (km)

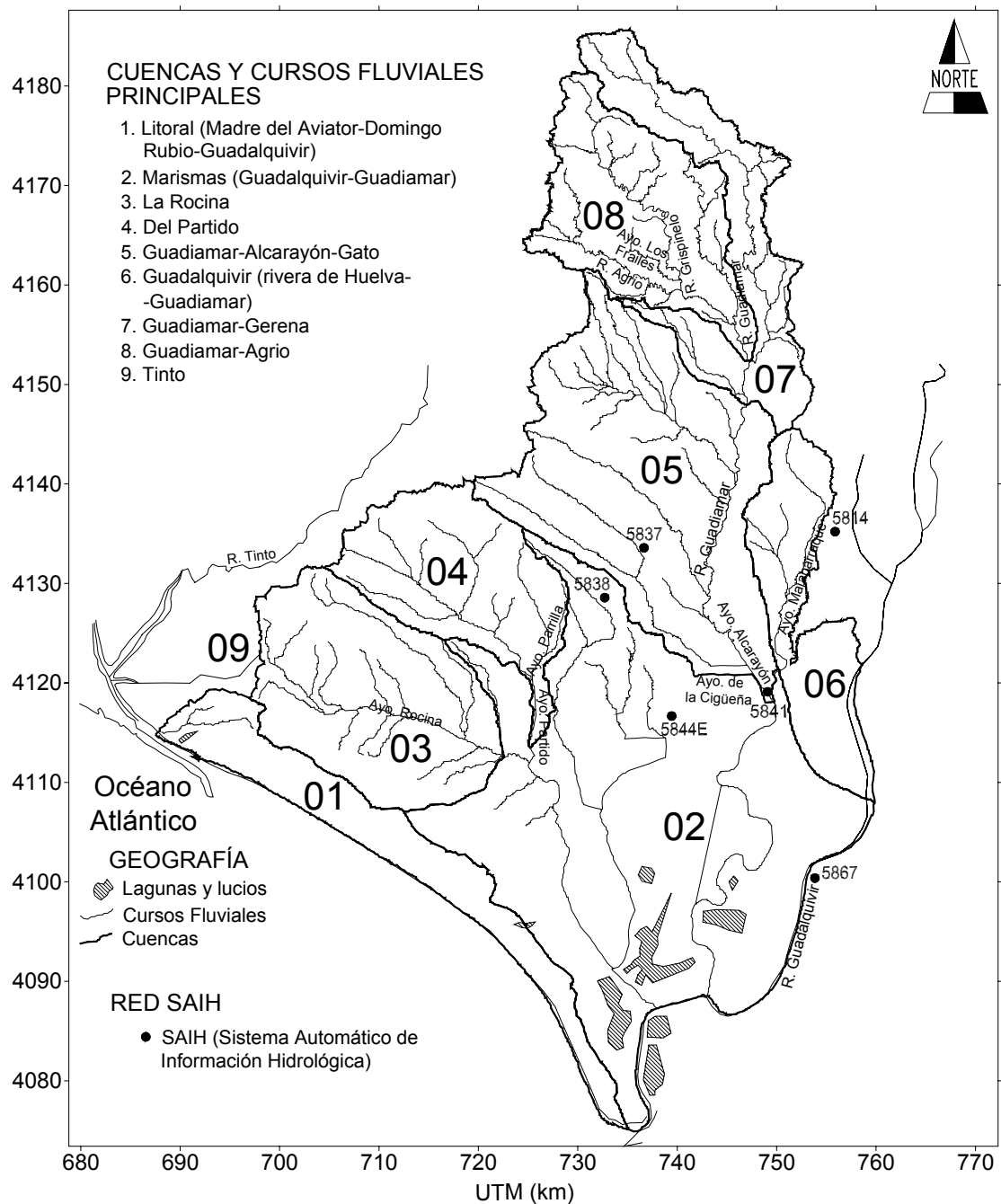


Figura 2.4.– Estaciones termopluviométricas previstas para las redes SAIH de la cuenca del Guadalquivir de interés para Doñana. Datos de [CHGQ].

○ **Otras redes menores con estaciones relevantes:**

Aparte de las mencionadas existen en la zona algunas otras estaciones pertenecientes a centros de investigación. Se han inventariado las siguientes:

– Estación Biológica de Doñana (EBD)

En el pasado ha tenido seis estaciones automáticas midiendo varios parámetros (Tabla 2.7). Esta información está disponible en el sitio web de la EBD [EBD]. La EBD mantiene en la actualidad una estación termoplumiométrica manual ubicada en el Palacio de Doñana. Las variables que se miden son temperatura diaria (a las 8:30 h), máxima y mínima del día anterior y precipitación acumulada diaria. Los datos son accesibles directamente en la web de la Reserva Biológica de Doñana [RBD], donde además de las medidas se pueden encontrar algunos cálculos estadísticos.

Tabla 2.7.– Datos meteorológicos históricos de las estaciones automáticas de la Estación Biológica de Doñana. Fuente: [EBD].

Estación	VARIABLES MEDIDAS	PERIODO DE MEDIDA
01. Palacio	Fecha, hora, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, punto e rocío, presión, radiación global y precipitación	Oct., nov. y dic. de 1993 Ene. a dic. de 1994
02. Mari López	Fecha, hora, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, punto e rocío, presión, radiación global y precipitación	Sep. a dic. de 1993 Ene. a dic. de 1994 y 1995
03. Sta. Olalla (algunos sensores sumergidos en laguna)	Fecha, hora, conductividad eléctrica y temperatura máximas, medias y mínimas del agua, pH, punto de rocío, presión radiación global y precipitación.	Oct., nov. y dic. de 1993 Ene. a dic. de 1994
04. Carril del Corte (algunos sensores sumergidos en pozo)	Fecha, hora, conductividad eléctrica y temperatura máximas, medias y mínimas del agua, pH, punto de rocío, presión radiación global y precipitación.	Nov. y dic. de 1993 Ene. a dic. de 1994
08. Matalascañas	Fecha, hora, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, punto e rocío, presión, radiación global y precipitación	Ene. a dic. de 1990 Ene. a agosto de 1991
16. Mari López	Fecha, hora, velocidad y dirección del viento, temperatura del aire, humedad relativa, punto de rocío, presión, radiación global y precipitación	Dic. de 1989 Ene. a dic. de 1990, 1991 y 1992 Enero a agosto de 1993

– Parque Nacional de Doñana (PND)

El PND tiene nueve estaciones automáticas en la marisma, que son de reciente instalación (Tabla 2.8 y Figura 2.5). Las variables que se miden en cada una de ellas son:

- Estaciones 1, 2, 3, 4, 5: intensidad de lluvia; dirección y velocidad del viento; nivel, temperatura y conductividad eléctrica del agua; evaporación.
- Estación 6: intensidad de lluvia; dirección y velocidad del viento; nivel y temperatura del agua; radiación solar; temperatura del suelo; temperatura del aire y humedad relativa.
- Estación 7: nivel y temperatura del agua; temperatura del suelo.
- Estación 8: nivel y temperatura del agua
- Estación 9: nivel y temperatura del suelo. Recientemente (2/06) se ha instalado una sonda multiparamétrica (conductividad eléctrica, temperatura y concentración de oxígeno en agua).

Las estaciones 6, 7, 8 y 9 son conjuntas con el grupo FLUMEN de la UPC.

Los datos se reciben por radio en las oficinas del PND. El acceso a los mismos es mediante petición al PND. Otras características de las estaciones pueden consultarse en el sitio web [FLUMEN].

Tabla 2.8.– Estaciones meteorológicas automáticas del Parque Nacional de Doñana (PND) en la marisma. Fuente: PND y [FLUMEN]. Coordenadas en metros.

	Estación	Código	UTM (X)	UTM (Y)	Z	Inicio medidas
1	PND	N04	728282,50	4106296,08	1.54	4 – 03
2	PND	N12	734515,00	4100445,00	1.21	4 – 03
3	PND	N14	729932,00	4098094,00	1.11	4 – 03
4	PND	N31	733187,47	4089574,56	0.86	4 – 03
5	PND	N28	736243,58	4089980,48	1.01	4 – 03
6	FLUMEN	D04	736346,00	4106237,00	1.18	1 – 05
7	FLUMEN	D03	740416,00	4105512,00	1.59	1 – 05
8	FLUMEN	D01	737643,00	4093811,00	0.87	1 – 05
9	FLUMEN	D02	738252,00	4091360,00	0.89	1 – 05

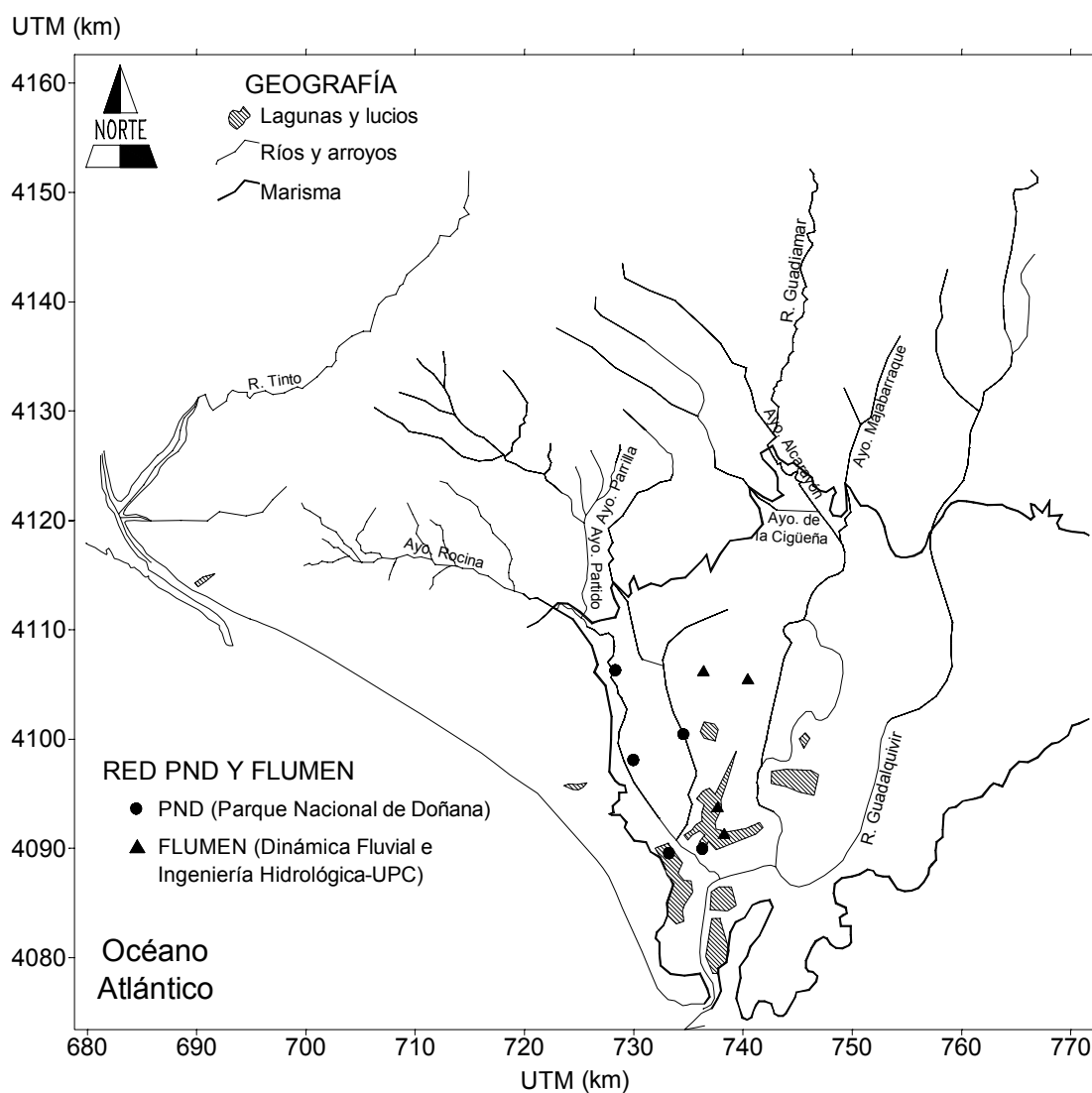


Figura 2.5.– Ubicación de las estaciones de medida de nivel de agua de las redes FLUMEN y PND en la marisma de Doñana.

– Estación de radiación UVA y ozono del Instituto Nacional de Técnicas Aeronáuticas (INTA)

Por su interés y posible utilidad para ciertos estudios en Doñana se incluye aquí la información recopilada acerca de la estación automática de control de la radiación UVA (ultravioleta) y el contenido de ozono en el aire que el INTA tiene en su estación experimental de El Arenosillo (Huelva). En el mismo lugar está la estación 5860E del INM (ver Tabla 2.1 y ubicación en Figura 2.1).

La estación está operativa desde 1997. Las mediciones (gráficos mensuales confeccionados con medias diarias) pueden obtenerse fácilmente por consulta directa de la web del Instituto nacional de Meteorología [INM]. Las coordenadas geográficas y cota absoluta de la estación son: Latitud: 37° 10' N; Longitud: 6° 73' W; Altitud: 41 m.

2.2.3. – Redes de vigilancia del aporte atmosférico

No existe una red específica de muestreadores de la deposición mineral atmosférica, ni la húmeda ni la seca. Solo han existido algunos muestreos temporales para elaborar los diferentes estudios realizados con motivo de tesis doctorales y orientados a determinar la composición mineral principal (Iglesias, 1999; Lozano, 2004; Alcalá, 2006). En la Reserva Biológica de Doñana se mide la calidad del aire en un muestreador volumétrico sobre el terreno, de las partículas sólidas.

Sería muy recomendable que la red de muestreo de la calidad química atmosférica que mantiene el Instituto Nacional de Meteorología en el territorio español incorporase una estación permanente en la Comarca de Doñana, pudiendo ser el Palacio de Doñana o el centro de recepción de visitantes del Parque Nacional de Doñana en El Acebuche lugares idóneos.

2.2.4.– Representatividad de las redes existentes, necesidades pendientes y mejoras deseables

A la vista del apartado anterior, la información hidrometeorológica existente para la realización de estudios y el apoyo a la gestión del agua en la Comarca de Doñana es razonablemente representativa y suficiente en cantidad, densidad y frecuencia, en lo tocante a la cantidad del agua. No obstante, la accesibilidad a los datos de distintas fuentes es muy dispar y con frecuencia lleva un tiempo excesivo, cuando no un coste importante.

No sucede lo mismo respecto a la calidad del agua de lluvia. Esta carencia es especialmente notable dada la ubicación geográfica de Doñana, cerca de una zona de emisión de partículas potencialmente contaminantes como es el polígono industrial de Huelva y en la trayectoria de los vientos (procedentes del Oeste–Suroeste) que aportan esas partículas y también frentes nubosos relevantes. Los estudios de investigación ya citados indican la contribución de algunos componentes al agua subterránea por la lluvia.

Por tanto, una mejora deseable respecto a la red de observación hidrometeorológica sería el control sistemático de la composición química (incluyendo algunos isótopos ambientales indicadores del origen natural o antrópico de esa composición química) del agua de lluvia. Este control debería llevarse a cabo en un número de ubicaciones suficiente como para descartar aportes no naturales pero locales al agua de lluvia, como es el caso de algunos componentes habituales de agroquímicos o de los hidrocarburos usados por los vehículos.

Una segunda mejora, tan relevante como la anterior, sería centralizar toda la información en un lugar de acceso libre para gestores y también para investigadores sobre Doñana. Este lugar podría ser la web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía [CMA-JA-b].

2.3. – Red foronómica: cantidad y calidad

2.3.1. – Red de aforos

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). En un futuro próximo está previsto recuperar parte de los caudales que en el pasado se incorporaban procedentes del Guadiamar (1320 km²) a través del Caño Travieso (Proyecto Doñana 2005, actuación núm.6: Restauración del Caño Travieso; MIMAN, 2001).

El estudio de la hidrodinámica de la marisma, así como el establecimiento de unos criterios para su gestión hídrica, requieren conocer con rigor las aportaciones que recibe. Para ello es preciso que los principales cauces que desaguan a la marisma dispongan de unas estaciones de aforo cuidadosamente mantenidas.

a) Situación actual

En la incorporación del Arroyo de la Rocina a la marisma (justo aguas abajo del Puente de la Canariega, de la carretera de El Rocío a Matalascañas) existe una estación de aforos (Figura 2.6). Está formada por un vado-azud (aforo de caudales grandes) y dos conductos con vertedero de pared delgada (aforo de caudales pequeños/medios). Los niveles se obtienen mediante registro continuo. Las series disponibles son incompletas y poco fiables para caudales elevados.



Figura 2.6.– Estación de aforo del Arroyo de la Rocina en La Canariega.

Por lo que respecta al Arroyo del Partido, inmediatamente aguas abajo del puente de la carretera de El Rocío a Villamanrique de la Condesa existe una estación de aforos inutilizada debido a la inestabilidad del cauce.

El Arroyo de la Cañada Mayor no dispone de estación de aforos.

En el curso principal del río Guadiamar existen tres estaciones de aforos: Gerena, El Guijo y Aznalcazar. Esta última, situada en la parte inferior de la cuenca, tiene asociada una superficie de 880 km². La superficie de la cuenca del Guadiamar al inicio del Brazo de la Torre es de 1320 km². Respecto a esta superficie, la estación de aforos de Aznalcazar deja fuera las cuencas de los arroyos de la Cigüeña, Alcarayón y Majarraque, que totalizan 440 km². Evidentemente, de las tres estaciones del Guadiamar la de mayor interés para el estudio de la marisma es la de Aznalcazar. Esta estación dispone de registro de niveles, aunque la información disponible es escasa.

En la Figura 2.7 se muestra la situación de estas estaciones.

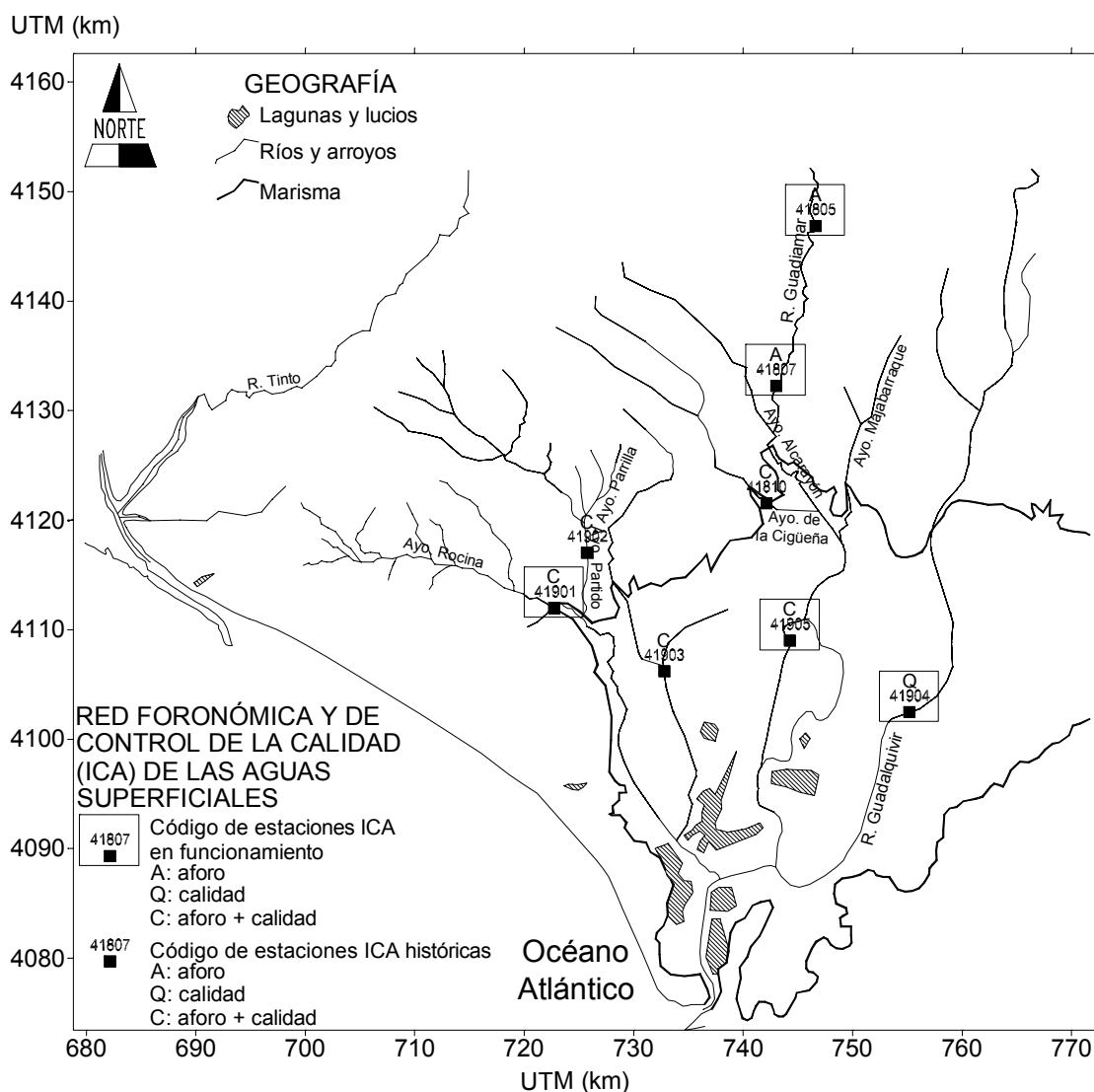


Figura 2.7.– Estaciones foronómicas (aforo) y de control de la calidad de las aguas superficiales de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir en la marisma y de Doñana y sus cuencas vertientes. Fuente: [CHGQ].

b) Previsiones futuras

En el marco del Proyecto Doñana 2005 está previsto mejorar notablemente la medida de los caudales incorporados a la marisma.

La estación de la Rocina se mantendrá en la misma ubicación y presentará las siguientes características:

- Estación compuesta, formada por un vertedero de pared gruesa (azud) para el aforo de caudales altos, atravesado por una serie de conductos o canales con estructuras de aforo para caudales inferiores.
- Conducto de menor sección con las dimensiones y condiciones de flujo necesarias para permitir el paso de peces a su través. Está previsto para este conducto una geometría tipo canal rectangular con un aforador electromagnético por efecto Faraday.

- Medida de caudal en los conductos mayores mediante la creación de una sección de control (vertederos de pared delgada) y medida de niveles con sensores de presión relativa.
- Almacenamiento de los datos registrados por los sensores en un datalogger y transmisión por teléfono móvil a la central de control.
- Diseño de una geometría de aproximación aguas arriba adecuada para el correcto funcionamiento de la estación.

Para aforar el Arroyo del Partido se construirá una estación de aforos en el Puente de la Matanza (carretera de El Rocío a Hinojos), quedando en desuso la actualmente existente justo aguas abajo del puente de la carretera de El Rocío a Villamanrique de la Condesa. Está previsto que la nueva estación tenga las siguientes características:

- Estación de compuerta basada en la creación de una sección de control y medida de niveles.
- Aforo de caudales bajos en el vano del puente situado junto a la margen izquierda, por el cual circulan los pequeños caudales.
- Canal Parshall o vertedero tipo Crump para los caudales bajos.
- Vertedero Crump, que permite el paso de sedimentos a su través, para los caudales altos.
- Medida de niveles se realizará mediante sensores de presión relativa, con almacenamiento de datos en un datalogger y transmisión a central de control vía teléfono móvil.
- Caudal hasta $650\text{m}^3/\text{s}$, que corresponde aproximadamente a unos 500 años de período de retorno.
- Tramo aguas arriba del cauce acondicionado para conseguir una correcta orientación del flujo.

Actualmente el cauce del Arroyo de la Parrilla está interrumpido y desviado hacia el Arroyo del Partido justo antes de su cruce con la carretera de El Rocío a Hinojos, por lo que el aforo del caudal que transporta se realizará de forma conjunta con el Arroyo de el Partido bajo el Puente de la Matanza. En caso de restablecerse el cauce original, todo parece indicar que existe pendiente suficiente para la construcción de una estación de aforos con una sección de control. Se propone que en este supuesto el diseño se realice en el momento de la restitución del cauce natural, de acuerdo con la geometría de éste y de las características de su cruce con la carretera de El Rocío a Hinojos.

Se diseñará una estación de aforos con sección de control del flujo aprovechando el paso de la Cañada Mayor bajo la carretera de El Rocío a Hinojos. La estructura deberá permitir el paso de caudal sólido a través de la misma. Las actuaciones consistirán básicamente en:

- Obras de acondicionamiento del cauce y orientación del flujo hacia el paso bajo la carretera en el que se situará la estructura de control.
- Estructura de aforo consistente en la creación de una sección de control y medida de niveles mediante sensores de presión relativa con datalogger y envío de información mediante teléfono móvil.

En el Proyecto Doñana 2005, la actuación núm.6 (MIMAN, 2001) contempla la restauración del Caño Travieso desde su conexión con el Brazo de la Torre, a

la altura de la Vuelta de la Arena, hasta su entrada en el Parque Nacional de Doñana, con el fin de recuperar las aportaciones hídricas del Guadiamar a la Marisma. También se persigue restituir la conexión mareal de la marisma (con mareas altas) a través del Brazo de la Torre, una vez que éste recupere su antigua funcionalidad fluvial y mareal tal como está previsto en la actuación núm.7 del Proyecto Doñana 2005 (MIMAN, 1999, 2001). En esta actuación se contempla una obra de conexión/control de caudales a incorporar al Caño Travieso y procedentes del río Guadiamar a través del Brazo de la Torre. Es de claro interés que esta obra de conexión/control incluya un sistema de aforo de los caudales introducidos a la marisma.

2.3.2.– Red de control de la calidad de las aguas superficiales en Doñana y su entorno

La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (CHGQ) está preparando un pliego de bases para el “Estudio y diseño de redes de control de calidad de aguas en el Parque Nacional de Doñana y su entorno”. Lo que sigue en este apartado está extraído de un borrador de este pliego. Dado que el territorio de la Confederación Hidrográfica del Guadiana solo tiene arroyos menores en áreas de monte, no hay previsiones conocidas de control específico.

Actualmente el control de la calidad de las aguas superficiales en el ámbito del Parque Nacional de Doñana (PND) se realiza a través de un conjunto de estaciones de muestreo periódico de la CHG, del propio Parque y estaciones de muestreo ocasional de la Estación Biológica de Doñana (CSIC), así como aportaciones de estudios específicos desarrollados por distintas universidades.

En estos momentos, la red de control de calidad del PND, correspondiente a los principales cauces que aportan caudales al Parque, está constituida por un total de 4 estaciones de muestreo periódico (Figura 2.7). Tres de ellas pertenecen a la Red ICA (Red Integral de Calidad de las Aguas), específicamente a la subred PISCIS o ICTIOFAUNA para el control de la calidad de las aguas en relación con la vida piscícola. Existe otra estación de muestreo que completa el sistema de control periódico de la calidad. Las estaciones correspondientes a la red ICA [CHGQ] están ubicadas en: el Puente de la Canariega (La Rocina) (41901), el Arroyo del Partido en El Rocío (41902), Aznalcazar (Guadiamar) (41807) y el Vado del Quema (Guadiamar) (41910), según datos tomados de la web de la CHGQ para el año 2003 [CHGQ]. Se miden 27 parámetros, que incluyen metales pesados, que son de interés por la existencia de mineralizaciones y minería metálica en Sierra Morena. Sin embargo no incluye los componentes químicos principales, que serían de interés para estudios hidrogeoquímicos. Adicionalmente, y fuera de lo que es la Comarca de Doñana, pero en cuencas vertientes a la misma está la estación del Embalse del Agrio (41804), en el río Agrio, afluente del Guadiamar (prepotabilidad) y en El Guijo (41805), río Guadiamar, para valores piscícolas ambientales. La estación La Señuela (41904) está en el río Guadalquivir (ambiental) y hay otra en el Encauzamiento del Brazo de la Torre de Entremuros (41905), para control piscícola. También hay controles no de la red en el Arroyo de la Cigüeña (41810) y en el Arroyo de los Frailes, en la cabecera del Guadiamar (41805).

La red anteriormente descrita es fruto tanto de los controles exigidos por la legislación específica en vigor en el momento de su ejecución, del estado y conocimiento de los usos del agua en el Parque Nacional de Doñana en dicha fecha, como de una primera adaptación a la normativa del Plan Hidrológico del Guadalquivir.

En la Tabla 2.9 se indican resumidos y redondeados los resultados del control de la calidad de las aguas superficiales en los cuatro puntos de la red ICA. Sistemáticamente resulta:

- a) Arroyo de La Rocina en La Canariega. Agua con carga orgánica, que en parte puede ser natural por degradación vegetal, y contribución subterránea variable. Se llega a un débil estado reductor. Sin carga de metales pesados
- b) Arroyo del Partido en El Rocío. Similar a La Rocina, con mayor influencia de drenajes o lixiviados agrícolas
- c) Río Guadiamar en Vado del Quema. Notable efecto agrícola en determinados momentos, y de población, con falta de oxígeno en ciertos momentos. Influencia de elementos pesados del área minera (As, Cd, Cu, Zn)
- d) Río Guadiamar en Entremuros. Empeoramiento del agua anterior con reducción de carga de elementos pesados, excepto del As.

Tabla 2.9.– Algunos resultados de la red de calidad de las aguas superficiales (valores redondeados). Tomados de los datos de la red ICA.

Parámetro	La Rocina La Canariega	Ayo. del Partido El Rocío	Guadiamar Vado del Quema	Guadiamar Entremuros
CE, $\mu\text{S}/\text{cm}$	80–900	400–1500	300–2400	500–9000
TDS, mg/L	50–650	300–1100	200–1600	350–6500
pH, unidades	6,8–8,2	8,3–8,7	7,2–8,1	7,2–8,7
MO, mg/L	15–30	6–25	<4–40	4–8
temp. $^{\circ}\text{C}$	17–38	12–35	10–29	10–32
DBO ₅ , mg/LO ₂	5–40	4–25	<5–80	75–1700
SS, mg/L	15–120	<5–9000	<5–80	75–1700
Sat O ₂ , %	70–150	80–130	34–130	40–160
O ₂ , mg/L	6–11	7–13	5–11	4–12
NO ₃ , mg/L	<0,3–4	<0,3–40	<0,3–35	<0,3–25
NO ₂ , $\mu\text{g}/\text{L}$	<50–250	—	<50–1600	<50–1600
NH ₄ , mg/L	0,1–3	0,2–24	<0,9–0,8	0,1–3
PO ₄ , mg/L	0,2–2,6	2–8	0,3–5	<0,2–1,8
fenol. $\mu\text{g}/\text{L}$	<30	<30	<30–110	<30
Detergente, $\mu\text{g}/\text{L}$	<13	<13	<13	<13
CN, $\mu\text{g}/\text{L}$	<50	<50	<50	<50
Fe, mg/L	1,4–7,8	0,01–3	0,2–0,7	0,02–3,2
Mn, $\mu\text{g}/\text{L}$	<50–800	<50–1500	50–70	150–760
As, $\mu\text{g}/\text{L}$	<7–9	<7–11	<7–25	<7–16
Cd, $\mu\text{g}/\text{L}$	<1	<1	<1–5	<1
Cu, $\mu\text{g}/\text{L}$	<10	<10–15	<10–60	<10–60
Cr, $\mu\text{g}/\text{L}$	<30	<30	<30	<30
Hg, $\mu\text{g}/\text{L}$	<0,2	<0,2	<0,2	<0,2
Ni, $\mu\text{g}/\text{L}$	<30–40	<30–40	<30	<30
Pb, $\mu\text{g}/\text{L}$	<30	<30–40	<30	<30
Zn, $\mu\text{g}/\text{L}$	<10	<10	<10–700	<10–400

CE=conductividad eléctrica; TDS=total de sólidos disueltos; MO=materia orgánica; SS sólidos en suspensión

Esta red ha de ser ampliada para recoger en su concepción y diseño los nuevos usos detectados en su ámbito territorial, así como para posibilitar el adecuado conocimiento y capacidad de gestión del estado de los recursos hídricos. Por todo ello, la futura red del PND, con su consiguiente explotación, deberá ser y constituir una herramienta clave en el seguimiento del Proyecto Doñana 2005 y en la implementación de la DMA, ya que permitirá, con las mediciones hidromorfológicas, fisicoquímicas y microbiológicas clasificar y efectuar el seguimiento del estado de las masas de agua superficiales. A su vez, esta evaluación permitirá a la CHGQ determinar qué masas de aguas superficiales están en riesgo de no alcanzar el buen estado y definir y acometer los correspondientes planes de acción (programas de medidas) para mejorar su estado, lo cual supone uno de los objetivos prioritarios de la DMA. Estos planes han de ser compatibles con el conjunto de actuaciones de regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional propuestas en el Proyecto “Doñana 2005”.

Los principales elementos de calidad que deben de ser considerados en la futura red de muestreo como indicadores del estado ecológico se clasificarán en tres grupos:

- Elementos de calidad biológicos
- Elementos de calidad hidromorfológicos
- Elementos de calidad fisicoquímicos

Para cada elemento de calidad se analizará la conveniencia del tipo de indicador a usar en función del tipo de estación de muestreo. Los más utilizados suelen ser:

- Características físico-químicas de las aguas
- Comunidades fito-zooplánticas
- Flora y vegetación acuáticas
- Macroinvertebrados dulceacuícolas
- Macroinvertebrados de estuario
- Comunidades ictícolas
- Hidrogeomorfología

2.3.3.– Red de vigilancia de las aguas costeras

Si bien el conocimiento del agua marina en la costa es marginal respecto al estudio hidrológico de la Comarca de Doñana, puede aportar alguna información de interés. Tal es la medida de la marea, que 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 datos pueden consultarse en el sitio web [NAO].

En cuanto a posibles efectos de las aguas continentales sobre las aguas marinas costeras, existe el Programa de Vigilancia Sanitaria de las Playas de Andalucía, para los aspectos sanitarios de las zonas de baño marítimos. El número de puntos es acordado entre Municipios y la correspondiente Delegación Provincial de Salud. Se controla Matalascañas y Palos de la Frontera, en función de los resultados obtenidos en la temporada de baño

precedente, para dar a conocer los resultados al inicio de cada temporada de baño.

En los trabajos de investigación hidrogeológica realizados en la zona por la UPC se han tomado algunas muestras de agua marina en la playa de la Torre de la Higuera–Matalascañas, que muestra un impacto de aportes de agua continental en la composición química (cierta ligera dilución).

2.4.– Red de observación de aguas en marisma y lagunas: cantidad y calidad

2.4.1.– Niveles del agua en la Marisma

Actualmente en la marisma están operando dos redes de medida. Ambas son complementarias y han sido instaladas en el marco del proyecto Doñana 2005. Una de estas redes (5 puntos de medida) está operada por el Parque Nacional de Doñana (PND), mientras que la otra (4 puntos de medida) lo es por el Grupo de Investigación FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) [FLUMEN]. Ambas miden en continuo las diferentes variables y envían la información a los centros de control (PND y UPC). Las características de estas redes son las que figuran en la Tabla 2.8 y que ahora se repiten aquí (Tabla 2.10). Ver la ubicación en la Figura 2.5.

Tabla 2.10.– Características de la red de control del agua en la Marisma. Coordenadas en metros.

		Código	X	Y	Z	Desde
1	PND	N04	728282,5033444	4106296,0800102	1,54	4 – 03
2	PND	N12	734515,0000000	4100445,0000000	1,21	4 – 03
3	PND	N14	729932,0000000	4098094,0000000	1,11	4 – 03
4	PND	N31	733187,4749809	4089574,5562612	0,86	4 – 03
5	PND	N28	736243,5771816	4089980,4765095	1,01	4 – 03
6	FLUMEN	D04	736346,0000000	4106237,0000000	1,18	1 – 05
7	FLUMEN	D03	740416,0000000	4105512,0000000	1,59	1 – 05
8	FLUMEN	D01	737643,0000000	4093811,0000000	0,87	1 – 05
9	FLUMEN	D02	738252,0000000	4091360,0000000	0,89	1 – 05

Los parámetros medidos en las diferentes estaciones son:

Estaciones 1, 2, 3, 4, 5

Intensidad de lluvia; dirección y velocidad del viento; nivel, temperatura, turbiedad y conductividad eléctrica del agua; evaporación.

Estación 6

Intensidad de lluvia; dirección y velocidad del viento; nivel y temperatura del agua; radiación solar; temperatura del suelo; temperatura del aire y humedad relativa.

Estación 7

Nivel y temperatura del agua; temperatura del suelo.

Estación 8

Nivel y temperatura del agua

Estación 9

Nivel y temperatura del suelo. Recientemente (febrero de 2006) se ha instalado una sonda multiparamétrica (conductividad eléctrica, temperatura y concentración de oxígeno).

En la Figura 2.8 se ubican las estaciones de ambas redes de medida sobre una base topográfica de la marisma.

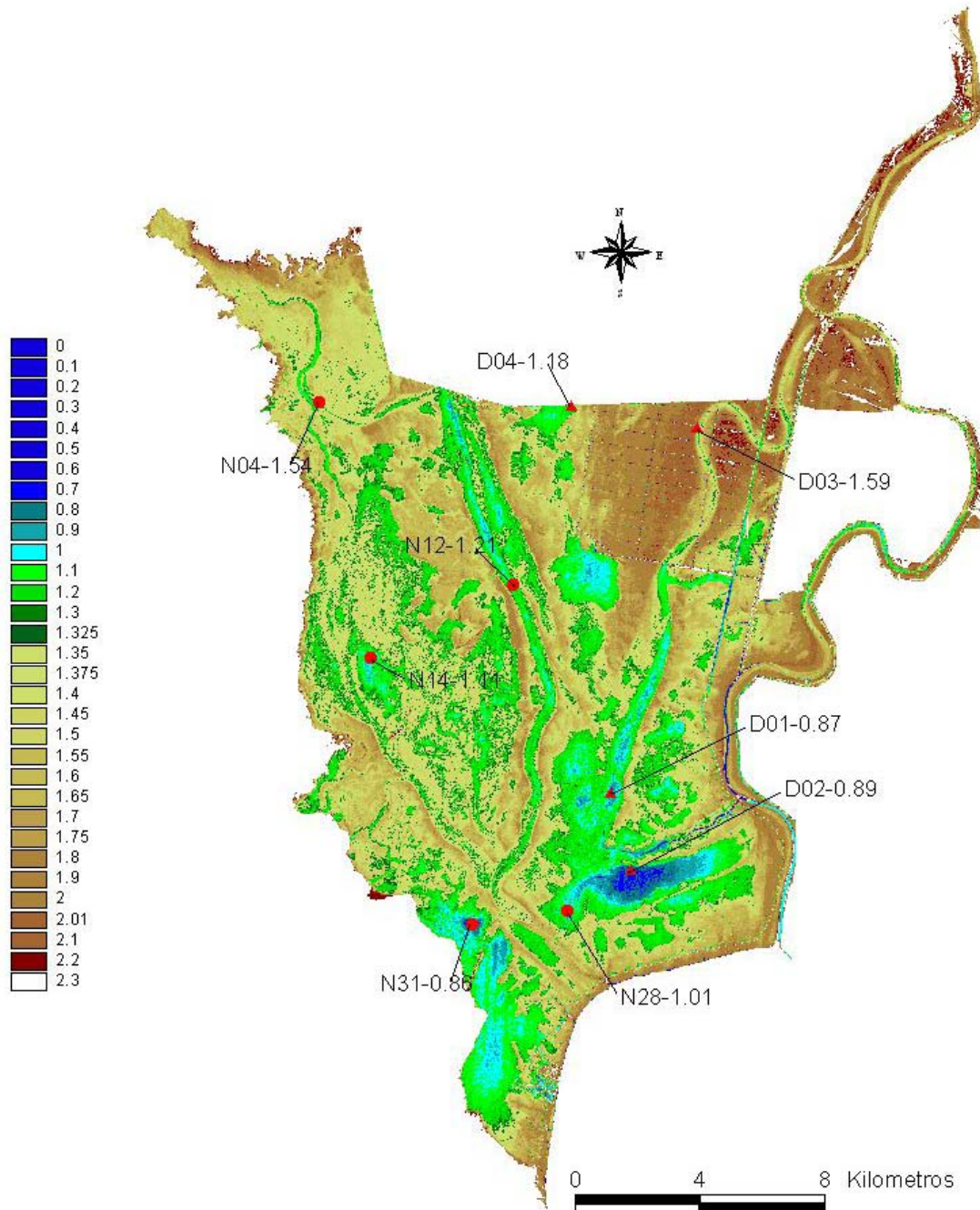


Figura 2.8.— Situación de las estaciones de control del agua en la Marisma (con su código) sobre un mapa digitalizado de alturas (m) del terreno. Círculos: estaciones del PND. Triángulos: estaciones FLUMEN. Cartografía Proyecto Doñana 2005–FLUMEN.

En las fotos las Figuras 2.9 y 2.10 se muestran dos de las estaciones de medida.



Figura 2.9.– Estación automática PN12 ubicada en la Cancela Millán.



Figura 2.10.– Estación automática D02 ubicada en el Lucio de los Ánsares.

2.4.2.– Calidad del agua en la Marisma

No existe una red de control de la calidad del agua en la Marisma salvo los muestreos ocasionales que se realicen por el Parque Nacional de Doñana, la Estación Biológica de Doñana o las investigaciones en curso. Incluso la distribución y evolución de la salinidad solo es conocida por datos esporádicos, a pesar de su interés, gran variabilidad y dependencia del modo de gestión hídrica. La separación entre marisma dulce y marisma salada no es controlada, ni tampoco el aporte y comportamiento de los nutrientes y microcontaminantes, salvo en estudios ocasionales.

Estos aspectos requieren un estudio detallado para a partir del mismo diseñar aquella red que sea viable económicamente y que responda a las necesidades de conocimiento y de orientación de la gestión.

2.4.3.– Niveles y superficie de agua en las lagunas

Al igual que sucede con la marisma, tampoco existe una red de control de niveles de agua ni de superficie inundada de las lagunas de Doñana. La escasa información histórica existente procede de proyectos de investigación de índole ecológica o hidrológica y, por tanto, es local (referida a unas cuantas lagunas concretas y singulares tales como Santa Olalla, Dulce, Carrizos o Las Verdes) y corresponde a periodos de tiempo cortos (tres o cuatro años) y no continuos.

Además, la disponibilidad de esta información para la gestión es escasa, pues se encuentra diseminada en publicaciones y tesis doctorales de las universidades y centros de investigaciones responsables de los proyectos.

La combinación de los distintos patrones de funcionamiento hidrológico con la ubicación, 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 los cuerpos de agua en las zonas encharcadizas, su variabilidad temporal y espacial y su relación con los cuerpos de agua subterránea asociados son factores de control principales de los procesos ecológicos dentro y en el entorno de las lagunas (ver apartado 3.5).

La existencia de redes de control del nivel y extensión de agua en las lagunas es muy relevante para la gestión hídrica de una buena parte del territorio de Doñana. Dicha red debería consistir en estaciones de control automáticas instaladas en lagunas de referencia seleccionadas y en la observación periódica de imágenes de satélite, quizá combinada con registros periódicos desde vuelos a poca altura con sensores específicos para la identificación de cuerpos de agua y de vegetación freatófita de bajo porte.

2.4.4.– Calidad del agua en las lagunas

Todo lo dicho respecto al control de los niveles en las lagunas es extensible al control de la calidad del agua en las mismas.

A pesar de la relevancia de los humedales en la biodiversidad en Doñana, los procesos ecológicos de las zonas encharcables empezaron a ser conocidos hace poco. Es debido fundamentalmente a que los datos disponibles son locales y tienen poca continuidad en el tiempo, al depender de proyectos de investigación.

La red de control de niveles debería ir acompañada de una red (automática, manual o combinada) de control de la calidad del agua en lagunas de referencia y orientada a la gestión. Ambas redes deben cumplir los requerimientos de la Directiva 2000/60/CE. Para diseñarlas se deberá recopilar y usar la información existente, que aunque no cubre todo el territorio de interés, tiene una sólida base científica y es fácilmente extensible a otras lagunas no estudiadas (ver apartado 3.5). No obstante, para el diseño definitivo será necesario también realizar algunos estudios complementarios en zonas específicas. Los trabajos a realizar deben también seguir las indicaciones del Plan Andaluz de Humedales.

2.5.– Redes de observación de aguas subterráneas: cantidad y calidad

2.5.1.– Redes piezométricas

a) Necesidad y aportaciones al conocimiento

En la comarca de Doñana tanto la mayor parte de las actividades económicas como el valioso medio natural existente dependen de una u otra forma del agua

subterránea. En estos lugares el control temporal y espacial de la evolución de los niveles freáticos y piezométricos es una de las actividades fundamentales para el diseño y desarrollo de planes de gestión del territorio.

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 proporcionan, como es la identificación de las zonas de recarga y descarga natural, el trazado de las trayectorias de flujo del agua subterránea en el terreno o la relación existente entre los cuerpos de agua superficial (ríos, arroyos, el mar, lagunas, criptohumedales), 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 un acuífero, estimar con precisión qué parte de esa agua corresponde a recursos y cuál a reservas, contrastar los cálculos de recarga y descarga al acuífero, y calibrar los modelos numéricos de funcionamiento del acuífero.

Esta utilidad es especialmente relevante en áreas de uso intensivo del agua y del suelo, en las cuales muchos de los aspectos a evaluar requieren comparar la situación presente (modificada por la actividad humana intensa) con la previa al inicio de esa actividad. A esta última también se la llama “situación natural del sistema”, “situación inalterada” o “situación no influenciada”. Si las series temporales son buenas, muchas veces permiten deducir las características de esa situación no influenciada aún cuando las medidas comenzaran con el sistema ya modificado.

Para que una serie piezométrica sea buena se deben cumplir las siguientes condiciones:

- 1.- Se conocen bien las características constructivas y el estado de conservación y funcionamiento de los puntos de control (profundidad de los pozos o sondeos, ubicación de las rejillas o zonas de admisión, estado de conservación de las entubaciones, posible existencia de roturas o corrosiones en zonas inicialmente ciegas, etc.).
- 2.- La mayoría (o todos) los puntos de control no son pozos de bombeo, aunque en el entorno cercano los haya. De esta forma se minimiza la influencia de las características del propio pozo (pérdidas de carga, cambios en el patrón de bombeo, etc.) en las oscilaciones de nivel a medir.
- 3.- Los puntos de control tienen un solo tramo ranurado y su longitud es de pocos metros. Sólo de esta forma es posible conocer a qué lugar del acuífero corresponde el nivel piezométrico que se mide. En el caso de varios tramos ranurados o de un tramo muy largo (situaciones frecuentes en pozos de bombeo) los niveles medidos no corresponden a una posición concreta del acuífero, sino que son una media integrada de los niveles piezométricos de todos los tramos ranurados (profundidades) que contribuyen agua al pozo. Como se comenta más adelante, el conocimiento preciso de la profundidad a que hacían referencia los niveles ha sido fundamental para avanzar en el conocimiento de Doñana.

- 4.– La cobertura espacial de la red respecto a la superficie del acuífero es razonablemente homogénea, e incluye una mayor densidad de puntos de medida en zonas sensibles tales como el entorno de áreas de bombeo, el entorno de zonas húmedas que puedan resultar afectadas por la explotación del acuífero, etc.
- 5.– La frecuencia de medidas depende del patrón temporal de las oscilaciones a medir. Para observar tendencias tanto intranuales como interanuales en áreas explotadas basta con realizar medidas quincenales. Si se desea estudiar la relación del acuífero con cuerpos de agua superficial en sistemas de respuesta muy rápida, entonces será necesario realizar medidas más frecuentes, generalmente diarias. El equipamiento de los puntos de control con sensores automáticos es el método más eficiente para disponer de registros continuos. Sin embargo, antes de seleccionar los puntos a instrumentar es importante dedicar un tiempo de observación a las series históricas disponibles, con el fin de prevenir costes añadidos debido a la generación de información redundante o no significativa.

b) Redes piezométricas existentes, titularidad, cobertura y accesibilidad

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). No obstante, desde aproximadamente el año 2000 existe una sola red piezométrica, gestionada por la CHGQ, que integra los puntos históricos de interés de las redes del IARA, del IGME y de la propia CHGQ. Con ello se disminuye el número de entradas de vehículos a las áreas restringidas. Más adelante se describen con cierto detalle estas redes.

Adicionalmente, otros organismos han mantenido redes de entidad mucho menor y de frecuencia no regular, como apoyo temporal a la conservación. Es el caso de la Estación Biológica de Doñana, dentro de la Reserva Biológica, o del Parque Nacional de Doñana. Este último controló entre 1987 y 1990 una treintena de puntos dentro del Parque, fundamentalmente en torno a lagunas y lucios. En 1991 la CHGQ se hizo cargo de estos puntos. Esta información no está disponible en la red y se entiende que debe estar incorporada a la base de datos piezométricos históricos de la CHGQ.

Un caso distinto es el de la red que el Parque Natural de Doñana controla en su territorio occidental (área de El Abalario). Esta red, que consiste en unos 35 puntos, principalmente de control de la superficie freática, está formada por piezómetros cortos (<12 m), pozos de brocal y dos emplazamientos de sondeos puntuales ubicados en el médano costero (Arenosillo y Asperillo) y que también forman parte de la red de la CHGQ (Figura 2.11). Hay medidas mensuales manuales entre 1994 y 1997 y entre 2001 y la actualidad. La red fue diseñada en 1994 por los autores del presente informe para el seguimiento de los efectos de la restauración ecológica del complejo lagunar de El Abalario–Ribetehilos tras la eliminación del bosque de eucaliptus, y ha resultado muy provechosa para observar la modificación de la evapotranspiración y su efecto sobre el nivel freático y las descargas de agua freática a humedales. Los datos

de la misma han sido muy útiles en los últimos años para calibrar modelos hidrogeológicos del acuífero subyacente al Manto Eólico (Trick, 1998; Trick y Custodio, 2004; Lozano, 2004) y también de modelos de cuantificación de la recarga (Giráldez et al., 1994; López y Giráldez, 1995; de Haro et al., 2000).

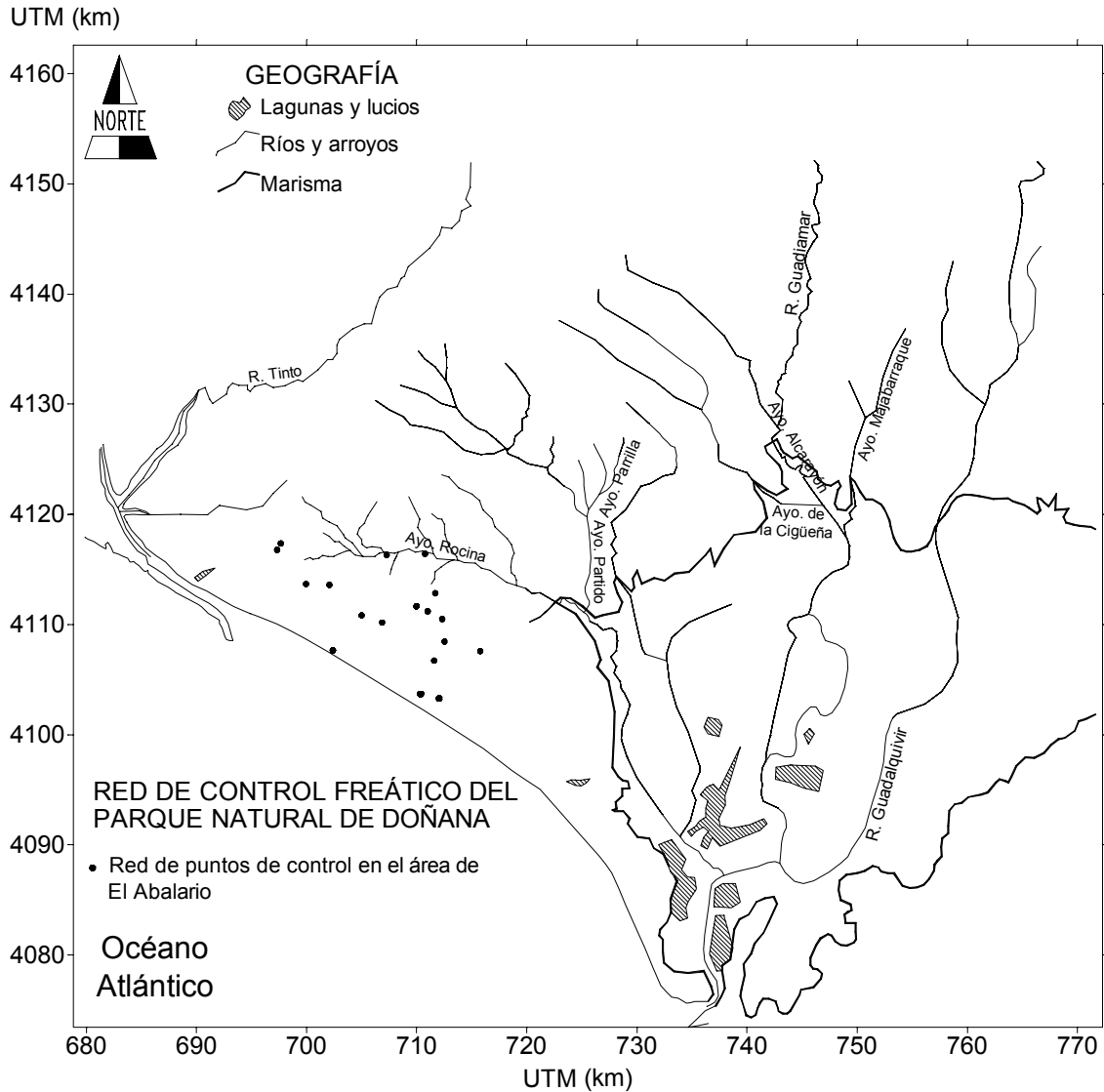


Figura 2.11.– Ubicación de los puntos de la red de control freático del Parque Natural de Doñana en el área de El Abalarío. Fuente: Parque Natural de Doñana.

A continuación se expone sucintamente la información recopilada sobre las características de las redes históricas del IGME y del IARA. El objetivo es únicamente conocer el alcance espacial y temporal de las mismas, pues las series históricas de mediciones realizadas en las mismas están incorporadas a la base de datos piezométrica de la CHGQ. Después se describe la red de control que gestiona la CHGQ.

Todos los puntos de la red tenían varias zonas de admisión, por lo que los niveles piezométricos medidos en cada punto eran valores integrados de los aportes de agua a través de todas las rejillas. Es decir, los niveles piezométricos medidos no correspondían a un nivel o profundidad concretos del acuífero, aunque en caso de heterogeneidad vertical identifican, aproximadamente, el nivel más transmisivo de todos los captados por cada pozo.

Estos datos históricos no están disponibles en la red. Se puede acceder a ellos mediante petición a la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía o mediante petición a la CHGQ, ya que están incorporados a la base de datos de este organismo.

○ **Red piezométrica histórica del IGME**

El IGME dispone de niveles piezométricos desde el año 1966 (inicio del proyecto FAO). No obstante, la red piezométrica histórica del IGME en Doñana estuvo activa, de forma sistemática, entre 1982 y aproximadamente el año 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, llamadas por ellos “campaña flash” (ver Figura 2.12). Estas labores corresponden actualmente a la CHGQ o las contrata.

La red histórica estaba integrada 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 admisión, y también pozos de brocal, excavados a mano y penetrando a lo más unos pocos metros bajo el nivel freático. Los niveles piezométricos medidos correspondían pues tanto a la superficie freática (pozos de brocal) como a posiciones más profundas del acuífero, aunque integradas por varios niveles superpuestos verticalmente. Esta información no se separaba a la hora de tratarla para dibujar mapas piezométricos.

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. Estos sondeos están entubados con PVC y equipados con sensores para el registro continuo de nivel en 15 emplazamientos, 10 de ellos como multipiezómetros. Dentro de las actividades de investigación propias en la zona, el IGME tiene previsto medir mensualmente, durante los dos próximos años, 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. Esta información será de carácter interno, aunque pública por el carácter de la institución.

Los datos históricos están disponibles vía web [IGME; CMA–JA–a] a través del Sistema de Información de Aguas Subterráneas de Andalucía (SIAS), que es una aplicación creada en el marco de un convenio IGME–Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía para el Instituto del Agua de Andalucía. El

SIAS está operativo en la red desde el año 2002, aunque en la práctica es difícil obtener información del mismo. Es de esperar que las interfaces para usuarios mejoren significativamente en breve y que la información esté disponible fácilmente en una u otra web.

○ **Red piezométrica de la CHGQ**

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) –dependiente entonces del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo– y la CHGQ mediante el cual el SGOP perforó en pocos años varias baterías de sondeos múltiples (los llamados emplazamientos nido) ubicados a lo largo de la costa (borde interno de Matalascañas y del médano de Asperillo), de La Vera y de la Rocina, y junto a complejos lagunares o lagunas singulares de todo el manto eólico.

Los emplazamientos nido consisten en 3–4 sondeos por emplazamiento. Los sondeos están separados unos pocos metros entre sí, tienen profundidades crecientes y un solo 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 cuales 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, la CHGQ realizó un nuevo proyecto que permitió disponer de varias decenas más de emplazamientos múltiples en el entorno del Parque Nacional de Doñana en pocos años (21 emplazamientos múltiples y 26 individuales perforados por el SGOP, más 24 emplazamientos múltiples perforados por la Compañía General de Sondeos con idéntico diseño).

La red piezométrica actual de la CHGQ está consensuada por los organismos del Grupo de Aguas del Patronato de Doñana (CHGQ, IGME, PND, EBD, PNatD). Está formada por 101 emplazamientos con 179 piezómetros, y data del año 2003. Hay 60 emplazamientos con un solo 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 (MOPU), 24 emplazamientos con 60 tubos fueron construidos entre 1992 y 1996 por CGS por encargo de la CHGQ, 19 emplazamientos (monopiezómetro) son antiguos pozos del IRYDA–IARA y otros 9 emplazamientos son 9 piezómetros que han sido construidos por el IGME (que además ha seguido perforado otros lugares para emplazamientos mono y multipiezómetro). 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. El acceso a los registros de la red se realiza mediante petición a la CHGQ. La ubicación se muestra en la Figura 2.13.

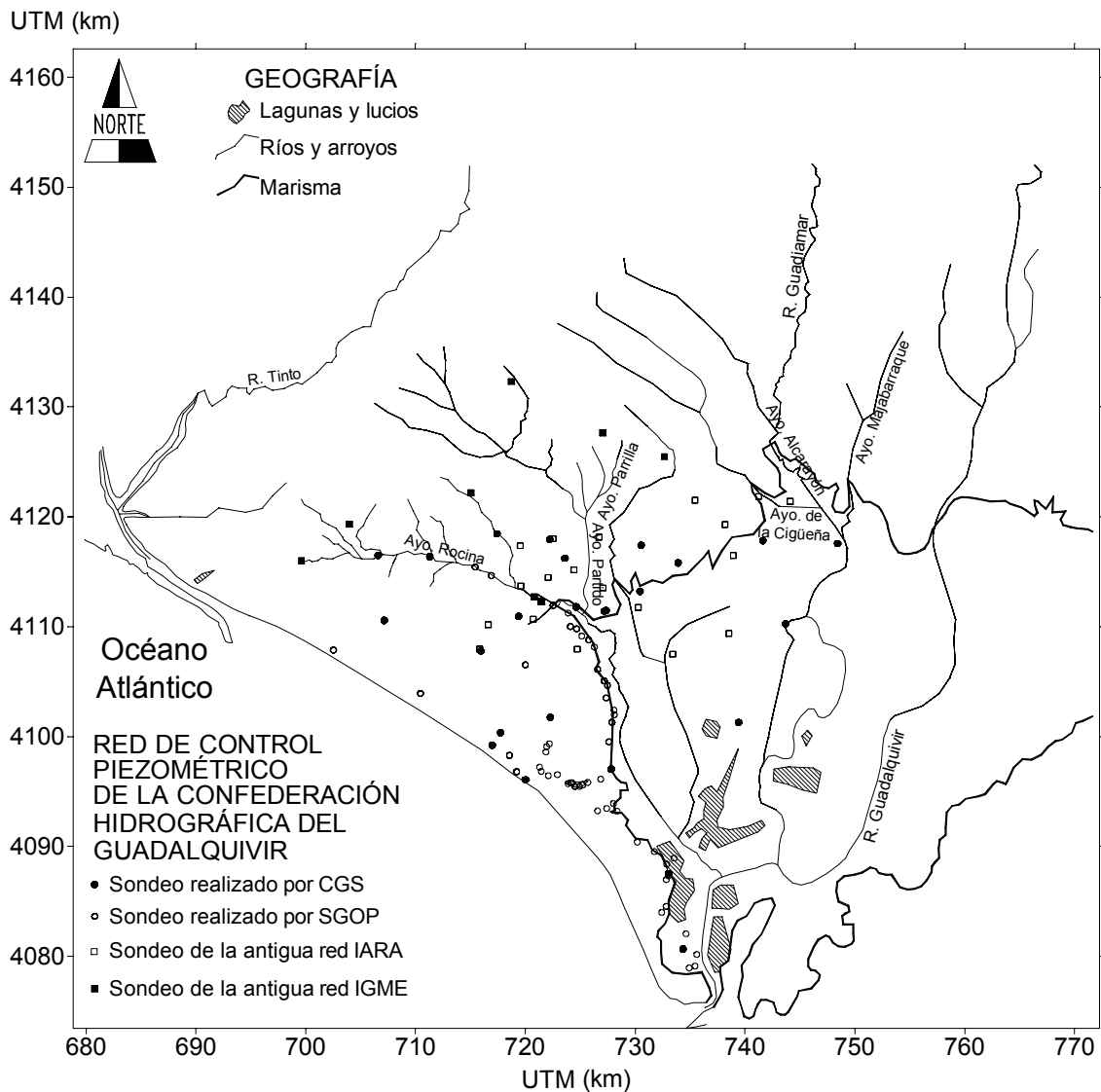


Figura 2.13.– Red piezométrica actual de la CHGQ. Datos facilitados por la CHGQ.

c) Representatividad de las redes piezométricas existentes, necesidades pendientes y mejoras deseables

La red piezométrica actual de la CHGQ es excelente para el conocimiento de la red de flujo de 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 observaciones tales como el descenso acumulado interanual de los niveles freáticos y piezométricos profundos, la evolución del patrón de inundación de algunas lagunas (tradicionalmente atribuido a los bombeos profundos para abastecimiento aunque no contrastado hasta recientemente), etc.

También la red de observación freática del PNatD en el área de El Abalario se puede considerar representativa respecto a la observación de la oscilación de la superficie freática en la zona.

Los aspectos a mejorar se refieren a la caracterización del papel del agua subterránea en el funcionamiento de los humedales (arroyos y lagunas) dependientes del agua subterránea. Si bien esta relación está razonablemente establecida a los niveles cualitativo y semicuantitativo, la gestión eficaz del medio en Doñana requiere poseer un conocimiento cuantitativo de la relación agua subterránea–agua superficial que permita introducir el funcionamiento de esos elementos en la planificación a largo plazo con la menor incertidumbre posible.

Esta carencia se solventaría siguiendo las recomendaciones del Plan Andaluz de Humedales (PAH, 2002), que propone elegir humedales de referencia y focalizar en ellos todos los estudios necesarios para adquirir el mayor conocimiento posible sobre su funcionamiento. En el caso de Doñana se trataría de construir piezómetros cortos (hasta el nivel freático) dispuestos en líneas perpendiculares al cauce de algunos arroyos (La Rocina y alguno de sus afluentes, los Sotos, la Cañada Mayor,..) y lagunas (Santa Olalla–Dulce–Las Pajas; Mata de los Domínguez, Ribeteheilos,...) seleccionados. Esto, junto con la generación de una topografía de detalle (error < 10 cm) que permitiera disponer de un buen modelo digital del terreno, permitiría establecer de forma cuantitativa el papel del agua subterránea en esos humedales.

2.5.2.– Redes de calidad del agua subterránea

a) Necesidad y aportaciones al conocimiento

La reciente entrada en vigor de la Directiva Marco Europea del Agua (2000/60/CE; DMA, 2000), cuyo objetivo es establecer un marco para la protección de las aguas que prevenga todo deterioro ambiental adicional y mejore su estado actual, y la inminente aprobación de la Directiva (Derivada) de Aguas Subterráneas (DAS), cuyo objetivo es establecer estrategias para prevenir, controlar y corregir la contaminación del agua subterránea, hace necesario conocer la situación de la calidad de las aguas subterráneas, el origen de la misma y su posible modificación por procesos de contaminación, entre otras cosas.

Para conocer si la calidad de una masa de agua subterránea está afectada por contaminación es imprescindible conocer previamente los valores característicos de la composición (calidad) natural de ese agua –el llamado fondo químico natural– y los procesos físicos y químicos que la originan. De forma intuitiva, 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. Así, cualquier posible impacto sobre la calidad del agua se evalúa por comparación con ese fondo natural, cuyas características se utilizan como referencia para evaluar el grado de éxito de los programas de recuperación o remediación.

El fondo químico natural (o calidad natural) del agua subterránea es el resultado de un conjunto de factores interrelacionados tales como la geología, el clima, la topografía, los procesos biológicos y el aprovechamiento del suelo. El primer factor que contribuye al fondo natural del agua de un acuífero es la composición química de la lluvia que produce la recarga. La lluvia aporta solutos de origen marino y continental y gases, en distintas proporciones, dependiendo de la procedencia de los frentes nubosos que producen recarga y de la trayectoria espacial de los mismos. 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, oxidación–reducción; biodegradación; etc.

Dado que el origen es geoquímico (procede de las interacciones agua–roca y de los ciclos naturales de los elementos químicos), que tanto los aportes atmosféricos como las reacciones químicas son función del tiempo, y que no todos los componentes tienen igual tiempo de residencia, el fondo químico natural regional de un acuífero dado es un rango de valores que, además, suele variar de forma apreciable tanto espacial como temporalmente. La heterogeneidad litológica y el hecho de que el agua se mueva a lo largo de líneas de flujo contribuyen a esa variabilidad.

Por contraposición, la polución del agua subterránea es de origen antropogénico y se sobrepone al fondo químico natural, tanto espacial como temporalmente. La polución de un agua puede reconocerse mediante ciertos trazadores o indicadores químicos e isotópicos claramente establecidos, de entre los cuales hay que descartar algunas sustancias convencionalmente consideradas contaminantes, tales como NO_3 , NH_4 , F, As y muchos metales, los cuales pueden presentar de forma natural concentraciones elevadas en el agua bajo ciertas condiciones hidrogeoquímicas.

Por tanto, para establecer el fondo químico natural de un acuífero es necesario conocer la composición química característica de la lluvia que produce la recarga, conocer la composición mineral del medio sólido y la del agua que está en contacto con él, tanto en la zona no saturada como en la zona saturada. Esto es crucial para averiguar las reacciones que se producen y cuantificar su contribución al fondo químico natural del agua, y para conocer cuáles de los componentes del fondo natural pueden ser también resultado de procesos de contaminación. Para esto último es necesario identificar tanto las fuentes como los contaminantes potenciales, tanto dentro (agricultura, industria, vías de comunicación, núcleos urbanos, etc.) como fuera de la zona, pues algunos contaminantes pueden ser de origen foráneo y ser aportados por el viento y las nubes a la zona de recarga del acuífero.

Adquirir este conocimiento requiere tener la infraestructura de observación adecuada y generar los datos que se especifican más adelante.

Para la Comarca 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 en otro tanto de los datos propios de grupos universitarios con una larga historia investigadora en Doñana, ha sido posible establecer una primera aproximación al fondo químico natural del acuífero (Manzano et al., 2005).

Tanto el fondo químico natural como los procesos que lo originan se han identificado mediante el estudio conjunto de la composición química del agua y de la composición mineral del terreno a distintas profundidades, utilizando un conjunto de técnicas experimentales y numéricas que han permitido contrastar y validar las hipótesis propuestas. Este conocimiento se ha generado en el marco de proyectos de investigación universitarios (BaSeLiNe, 2003).

Desde la gestión pública, durante los últimos treinta y cinco años se han realizado varios estudios sobre la calidad del agua subterránea a escala regional (IGME–FAO, 1970, 1973, IGME, 1983) 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, intrusión marina). Recientemente, y en cumplimiento de las prescripciones de la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE, DMA, 2000), la CHGQ ha realizado una caracterización del estado de la calidad de las masas de agua subterránea y una identificación de presiones e impactos en su ámbito espacial de actuación (CHGQ, 2005).

b) Redes de calidad existentes, titularidad, cobertura y accesibilidad

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 ya mencionado. Durante esa década y la siguiente, primero el IRYDA y luego el IARA, gestionaron la llamada red de vigilancia del acuífero Almonte–Marismas que se describe más adelante.

Simultáneamente, 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, y el mantenimiento de una red de control de calidad de aguas subterráneas que, muy modificada, perdura hasta nuestros días.

La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir ha realizado puntualmente campañas extensivas bien para el control de la calidad del agua subterránea o bien para estudios específicos. Ejemplo de esto último es 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). En la actualidad, y para cumplir con las disposiciones de la Directiva 2000/60/CE (DMA, 2000), la CHGQ está diseñando una red de control de la calidad del agua subterránea que se espera entre en funcionamiento en breve.

De forma sintética, la información recopilada sobre las redes de calidad del IARA y el IGME es la siguiente:

- **Red de histórica de calidad del IARA**

Como ya se ha comentado, las redes de calidad 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.

Las características de los puntos de medida (pozos del Plan Regable Almonte Marismas), la extensión de la red (ver Figura 2.12) y frecuencia de muestreo se han expuesto al describir la red piezométrica. 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. Se medían los componentes mayoritarios (cloruro, sulfato, sodio, potasio, calcio y magnesio) y otros minoritarios indicadores de contaminación (nitrato, nitrito y amonio), además del pH y la conductividad eléctrica.

Al igual que sucede respecto a los niveles piezométricos, debido a que todos los puntos de control de esta red tienen varios tramos ranurados o zonas de admisión, la calidad medida en cada punto corresponde a mezclas integradas del agua que entra a la entubación a través de todas las rejillas. Esta situación es útil 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 de la evolución de la calidad del agua en el acuífero, pues las muestras no corresponden a una profundidad concreta sino que constituyen una mezcla variable con el tiempo y las circunstancias.

El acceso a estos datos es mediante petición a la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. En teoría deben estar incorporados a la base de datos de la CHGQ.

- **Red histórica de calidad del IGME**

Como ya se ha dicho, el IGME ha generado datos de calidad del acuífero de Doñana también desde la década de 1970, aunque las mediciones periódicas y sistemáticas comenzaron en 1982 y terminaron en 2003. Esta red estable constaba de 15 puntos medidos con una periodicidad semestral. Los parámetros medidos son físico–químicos (pH, conductividad eléctrica y temperatura) componentes mayoritarios (cloruro, sulfato, bicarbonato, sodio, calcio, magnesio, potasio) y nitrate. En la actualidad esta red se mantiene a

partir de la información que suministra el seguimiento de la “calidad del agua subterránea de los abastecimientos públicos urbanos” que captan el acuífero Almonte–Marismas, actividad contemplada dentro de los respectivos convenios de “Asistencia Técnica” 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 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. La periodicidad fue cuatrimestral. El acceso a estos datos se realiza mediante petición al IGME.

Entre las actividades previstas durante la ejecución de proyectos de investigación de la UPCT en colaboración con la UPC actualmente en marcha se contempla la realización de varias campañas sobre una red específica en el sector marismas, para determinar componente mayoritarios, componentes trazas, bromuro y los isótopos ambientales oxígeno 18, deuterio, tritio, carbono 13 y carbono 14.

Aunque hay varios informes internos y un par de publicaciones (IGME–FAO, 1973; IGME, 1983), la mayor parte de esta información está en la base de datos del propio IGME. La información histórica generada por las redes del IGME en el acuífero Almonte–Marismas están disponibles en las Bases de Datos de Aguas Subterráneas en la sede central del IGME en Madrid a través de internet [IGME], accediendo al Sistema de Información de Aguas Subterráneas (SIAS) de las provincias de Huelva y Sevilla. También se puede acceder a través de la web del Instituto del Agua de Andalucía [CMA–JA].

El IGME está poniendo a punto una “Base de Datos Hidrogeológicas de Doñana y su entorno” de carácter multidisciplinar, que integra y actualiza otras ya existentes de diferentes organismos y grupos universitarios de investigación que vienen trabajando habitualmente en el ámbito de Doñana. El IGME pretende operar este Banco de Datos en formato SIG como apoyo a la comunidad científica y a los gestores del Parque Nacional de Doñana.

Como se ha dicho en el apartado de redes piezométricas, las redes históricas 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 integradas por varios niveles superpuestos verticalmente. Esta información es útil para detectar posibles cambios de calidad del agua de abastecimiento, pero no para detectar el momento y lugar físico del acuífero donde se originan esos cambios.

○ **Otros datos históricos de calidad**

Adicionalmente a la información sobre la calidad del agua generada por los organismos públicos mencionados, varios grupos de investigación del ámbito

universitario (UCM, UPC, UAM, UPCT) han generado, desde la década de 1980 y hasta la actualidad, 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 misma. Este conocimiento se ha plasmando en varias tesis doctorales y varias decenas de trabajos presentados a nivel internacional en congresos o recogidos en libros, que se recogen en El Apéndice bibliográfico.

En cuanto a los datos brutos, en los últimos 15 años la UPC construyó una base de datos hidroquímica, isotópica ambiental, piezométrica y geológica con los datos propios más los de todos los otros organismos. Esta base de datos 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 el IGME está poniendo a punto.

c) Representatividad de las redes de calidad existentes, necesidades pendientes y mejoras deseables

Las redes de observación de la calidad del agua subterránea deben estar diseñadas de acuerdo con lo que se pretende controlar y, además, deben estar complementadas con redes de observación de la calidad de la lluvia. De acuerdo con las prescripciones de la Directiva 2000/60/CE, el objetivo de este control es doble:

1.– Establecer el fondo natural de la calidad de referencia, para lo que se necesitan series temporales de datos químicos e isotópicos de calidad que sean representativas de la red de flujo en la parte del acuífero aún no impactada por la actividad humana (en el acuífero libre, por debajo de los 40 m de profundidad).

Para ello es necesario que los puntos de control sean sondeos puntuales (con una sola rejilla) y tengan distintas longitudes (acceso estratificado). La red de emplazamientos multisondeo de la CHGQ sería muy útil, asegurando siempre que los sondeos a usar para el control de calidad están libres de fluidos de perforación y de cualquier otro contaminante.

2.– Observar de forma temprana cambios en la calidad del agua de abastecimiento, para lo cual es necesario un control sistemático de pozos que se utilicen para ese fin.

En estas muestras se deben analizar los componentes químicos inorgánicos mayoritarios, minoritarios y trazas que se establezca de acuerdo con la Directiva 2000/60/CE, así como algunos componentes orgánicos trazadores de contaminación y algunos isótopos ambientales indicadores del origen del agua de recarga, de los tiempos de tránsito/permanencia del agua en el terreno, de procesos de contaminación específicos, etc.

Además del adecuado diseño de la red, la validez y representatividad de las muestras requieren disponer de protocolos de muestreo y de conservación de muestras hasta su análisis. Estos protocolos deben establecerse de acuerdo con los conocimientos científico-técnicos y las normas internacionales de calidad operativas al respecto. En cualquier caso y tipo de punto, la muestra

sólo debe tomarse tras haber asegurado que procede de la formación (acuífero) y no de la entubación, y de que en la formación no quedan restos de fluidos de perforación ni otro tipo de contaminante.

Las redes de control de calidad en aguas subterráneas deben complementarse con las que siguen:

- Redes de observación y series temporales de la composición química (calidad) del agua de lluvia: en la mayoría de las zonas basta con disponer de unas pocas estaciones de muestro emplazadas de forma que se cubra la posible variabilidad química territorial de la lluvia.
- Redes de observación de la composición (calidad) del agua en la zona no saturada del terreno: su objetivo es establecer los procesos físico-químicos responsables de la modificación de la calidad del agua durante la recarga. Los diseños pueden ser variados. El más común consiste en realizar muestreos periódicos, con barrena manual, en perfiles verticales de terreno desde la superficie del suelo hasta la franja capilar. Este tipo de muestras permite estudiar tanto la fase sólida (mineralogía, conductividad hidráulica, capacidad de intercambio iónico,...) como la líquida (extracción del agua intersticial para análisis químico), su evolución con la profundidad y con el tiempo. Otro diseño consiste en instalar cápsulas de succión a distintas profundidades y extraer y analizar periódicamente el agua contenida en su interior. Ambos diseños proporcionan la evolución vertical y temporal de la composición química del agua en tránsito hacia la zona saturada, lo que junto con algunos parámetros de la fase sólida permite cuantificar la recarga, la evapotranspiración y los procesos físicos y químicos que controlan localmente la calidad natural del agua. No obstante, las capsulas de succión no funcionan correctamente en las arenas de Doñana, en especial en las dunas y cuando están secas.

En estos momentos no existe una red sistemática y operativa del control de la calidad del agua subterránea. La red de control de la calidad del agua subterránea de la CHGQ está en fase de diseño, por lo que se desconocen sus características. La red de control de la calidad del IGME está restringida a zonas y proyectos específicos y consiste fundamentalmente en pozos con múltiples zonas de admisión, por lo que su utilidad se reduce al segundo de los objetivos antes mencionados.

Las redes de control de la calidad del agua subterránea existentes o en fase de diseño se refieren únicamente a la zona saturada del medio. Hasta donde se sabe, no está previsto el control de la calidad del agua de lluvia. Estas redes deberían complementarse con algunas estaciones de control de la calidad del agua de lluvia y con algunos emplazamientos para el control de la evolución de la calidad durante el tránsito por zona no saturada. La ubicación de unas y otras debería tener en cuenta no sólo el conocimiento de la calidad natural del agua, sino las posibles fuentes de contaminación existentes.

Una notable laguna de conocimiento en Doñana es el de la presencia y comportamiento de plaguicidas en agua y suelos, dado el carácter agrícola del área, su uso en grandes cantidades en arenas y la especial sensibilidad de los

hábitats. Solo hay algunos datos muy parciales procedentes de estudios ocasionales. Aquí se debería intensificar el control sistemático.

2.6.– Red de medida de la recarga: cantidad y calidad

No ha existido ni existe una red de estaciones para medir la cantidad y calidad de la recarga a los acuíferos, salvo en lo que respecta a la red piezométrica de la parte superior del acuífero. Esta red permite ajustar con más garantía los modelos, tal como se ha podido hacer en el Sector de El Abalarío (Trick, 1991) con la red que mantenía el IGME.

La red de 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 es la secuencia de medidas destructivas de la humedad del suelo (agua y cloruros) que durante varios años ha mantenido en diversos puntos de El Abalarío el Departamento de Agronomía de la Universidad de Córdoba. Esta experiencia podría ser de interés en otras áreas.

Una red de parcelas dotadas con tensiómetros y muestreadores de succión se intentó por el IGME, 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 pluviosidad local es lo suficientemente elevada y los eventos de lluvia lo suficientemente frecuentes para que los perfiles de concentración isotópica del agua de la zona no saturada a causa de procesos de evaporación y difusivos no sean interpretables. 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 el matorral en el primer metro.

Con estas consideraciones, una posible red de medida de la recarga debe consistir en un conjunto de áreas piloto en lugares representativos de las diferentes ambientes que condicionan la recarga –quizás de 15 a 20– dotados de una estación pluviométrica y meteorológica básica más un punto piezométrico con dos o más tubos, por lo menos uno hasta el nivel freático y otro hasta la base del acuífero, equipados con registro continuo de nivel y con posibilidades de muestreo periódico cada 2 a 4 meses. Con ello se puede calcular la recarga por comparación de la respuesta piezométrica a la precipitación, manualmente y luego ajustado a un modelo numérico.

El conocimiento de la calidad de la recarga requiere muestreos destructivos periódicos de la zona no saturada para extraer la humedad y analizarla, y también disponer de algunos sondeos múltiples que penetren a diversas profundidades bajo la superficie freática. Han de ser perforados sin agua para no introducir elementos extraños muy difíciles de reextraer. Eso resulta muy difícil en arenas finas saturadas. Se construyó un emplazamiento en el lado Sur de La Rocina (Finca El Tejar). Tras los muestreos iniciales pero no ha sido objeto de seguimiento. Se está actualmente trabajando en la construcción de otro emplazamiento, sin que hasta el momento se haya resuelto

satisfactoriamente el modo viable de perforación e instalación de los tubos para el muestreo en arenas finas saturadas.

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.

2.7.– Conclusiones

El nivel de observación y medidas de control en Doñana data ya de casi 40 años, aunque es incompleto e irregular, y tiene altibajos notables. Desde el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana se han ido haciendo esfuerzos para mejorar la situación, siendo éstos más significativos en lo que a niveles de las aguas subterráneas se refiere. Hay un progreso notable en los últimos pocos años, en buena parte impulsados por la presión social que se generó tras el accidente de la balsa de lodos minera de Aznalcóllar. Sin embargo el hecho de ser en buena parte reciente no deja aún suficiente perspectiva en cuanto a la eficacia y accesibilidad a la información generada.

En el conjunto hay dos aspectos que flaquean. Uno es el conjunto de la observación de las aguas superficiales y el otro es el de la composición química–calidad. Este último aspecto es más complejo que un simple seguimiento de potabilidad o contaminantes ambientales ya que debe incorporar al conocimiento datos químicos e isotópicos ambientales que además de cumplir con los requisitos medioambientales legales permitan el eficaz seguimiento del ciclo del agua y sus variaciones. Ahí hay aún un notable camino a recorrer.

2.8.– Referencias bibliográficas

[CAP–JA–a]: web de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía.

<http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/estacionesAgroclimaticas/estaciones.jsp>

[CAP–JA–b]: web de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía.

http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/opencms/portal/DGPAgraria/Sanidad_Vegetal/RAIF

[CEDEX]: web del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas.

<http://www.hercules.cedex.es>

[CHGN]: web de la Confederación Hidrográfica del Guadiana.

<http://www.chguadiana.es>

[CHGQ]: web de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.

<http://www.chguadalquivir.es>

- [CMA–JA–a]: web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/>
- [CMA–JA–b]: web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/clima_atmosfera/infgen/SICA/sica2.html
- [EBD]: web de la Estación Biológica de Doñana. (<http://www.ebd.csic.es>).
- [FLUMEN]: web del Grupo de investigación de Hidrología Superficial de la Universidad Politécnica de Catalunya. <http://www.flumen@upc.edu>
- [IGME]: web del Instituto Geológico y Minero de España. <http://www.igme.es>
- [INM]: web del Instituto Nacional de Meteorología. <http://www.inm.es>
- [NAO]: web del Instituto Español de Oceanografía. <http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.html>
- [RBD]: web de la Reserva Biológica de Doñana. <http://www-rbd.ebd.csic.es>
- 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).
- 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.
- BaSeLiNe (2003). Niveles de referencia de calidad natural de las aguas subterráneas en los acuíferos europeos (Baseline Quality in European Aquifers). E. Custodio y M. Manzano. UE (Programa “Energy, Environment and Sustainable Development”). 2000–2003. Project 17/2001.
- 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 (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.
- 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.
- 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].
- Giráldez, J.V., Ordóñez, R., de Haro, J.M. y González, P. (1994). Estudio sobre la hidrología del Parque Natural del Entorno de Doñana: resultados preliminares. XII Congreso Nacional de Riegos. Pamplona. AERYD.
- Iglesias, M. (1999). *Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalarío, 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 Abalarío, Doñana, Huelva. En: 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. En: 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. En: I Asamblea Hispano–Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almería.
- IGME (1983). Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno. Colección Informe, 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.
- 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.
- 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 Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Manzano, M., Soler, A., Carrera, J. y Custodio, E. (2001). Composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{34}\text{S}$) de las aguas del área afectada por el vertido minero de Aznalcóllar (SO España). En: Las caras del agua subterránea (Eds. A. Medina y J. Carrera). IGME. I: 477–487.
- Manzano, M., Custodio, E. y Colomines, M. (2005). El fondo hidroquímico natural del acuífero de Doñana (SO España). En: V Congreso Ibérico de Geoquímica. IX Congreso de Geoquímica de España. Soria. 1–13.
- MIMAN (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.
- MIMAN (2001). *Proyecto Doñana 2005. Actuaciones nº 5: Recuperación de la funcionalidad del caño del Guadiamar. N º6: Restauración del Caño Travieso y N º 7: Recuperación del caño de la Torre. Estudio de acondicionamiento de la montaña del río*. Proyecto Doñana 2005. (CD).
- PAH (2002). Plan Andaluz de Humedales. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla.
- Trick, T. (1998). Impactos de las extracciones de agua subterránea en Doñana (aplicación de un modelo numérico con consideración de la variabilidad de la recarga).
- Trick, T. y Custodio, E. (2004). Hydrodynamic characteristics of the western Doñana Region (area of El Abalarío), Huelva, Spain. *Hydrogeology Journal*, 12: 321–335.

Capítulo 3

Conocimiento del funcionamiento hídrico en la Comarca de Doñana

- 3.1.– Introducción**
- 3.2.– Aporte atmosférico de agua, sales y contaminantes**
- 3.3.– Funcionamiento de las aguas superficiales: cantidad y calidad**
- 3.4.– Funcionamiento hídrico de la marisma en cantidad y calidad; efecto de las intervenciones humanas**
- 3.5.– Funcionamiento hídrico de las lagunas y humedales; efectos antrópicos**
- 3.6.– Funcionamiento de las aguas subterráneas; efectos antrópicos**
- 3.7.– Evolución de la demanda hídrica poblacional y agrícola**
- 3.8.– Balance hídrico de las aguas subterráneas**
- 3.9.– Conclusiones**
- 3.10.– Referencias bibliográficas**

Capítulo 3.– Conocimiento del funcionamiento hídrico en la Comarca de Doñana

3.1.– Introducción

La suficiente y adecuada conservación de un espacio natural, y la protección de los legítimos intereses de la población afectada, y de la que hace falta para mantener el flujo de los bienes y servicios que ese espacio proporciona, requiere un buen conocimiento del funcionamiento de los sistemas. En relación con el ciclo del agua hay que tener en cuenta sus aspectos de agua superficial y de agua subterránea, y las interrelaciones entre ambas, tanto en cantidad como en calidad.

En Doñana y su entorno se partió de unos buenos estudios realizados por equipos competentes en la década de 1970, pero que tuvieron objetivos predominantemente desarrollistas y que por razones económicas y de tiempo, y también de la insuficiente perspectiva del comienzo, fueron parciales. Afortunadamente el área atrajo el interés del Departamento de Geodinámica Externa de la Universidad Complutense de Madrid (Dr. M. Ramón Llamas), por medio del entonces director de la Estación Biológica de Doñana (Dr. Javier Castroviejo), y se pudieron dotar ayudas de investigación a cargo del Comité Conjunto Hispano–Norteamericano. Tras este arranque, con producción científica y de conocimiento del funcionamiento importante, se incorporó el Departamento de Ingeniería del Terreno y el Curso Internacional de Hidrología Subterránea, de la Universidad Politécnica de Cataluña, que continuaron los trabajos con ayudas de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT). Con ello en 1991, cuando se redactó el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992), ya se tenía un buen conocimiento del funcionamiento de las aguas subterráneas, sobre todo en el lado occidental, y se habían realizado estudios sobre las aguas superficiales en las cuencas vertientes. También se había realizado un notable estudio isotópico ambiental por parte del CEDEX (Baonza et al., 1984).

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, y en concreto de su oficina de proyectos de Sevilla. La actividad ha continuado hasta el momento presente, y se ha ampliado al trasladarse uno de los investigadores de la UPC a la Universidad Politécnica de Cartagena. Las interrelaciones y apoyo mutuo con el Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid ha sido de gran eficacia y productividad.

En el momento actual el conocimiento de la hidrología subterránea de Doñana es razonable y está acotada la parte que aún es insuficiente. En cuanto a la hidrología superficial la situación está más atrasada pero está en fase de recuperar etapas, en buena manera por haberse clarificado las necesidades por parte del Proyecto Doñana 2005.

3.2.– Aporte atmosférico de agua, sales y contaminantes

Dada la escasez de aportes fluviales procedentes de áreas externas a la Comarca de Doñana, la fuente principal de recursos hídricos en ésta es la lluvia. Solamente los ríos Guadalquivir y Guadamar podrían aportar recursos de origen externo, pero en las actuales condiciones de manejo influenciado del medio, el agua de ambos pasa de largo por el ámbito territorial aquí considerado. En un futuro próximo, sin embargo, y tras la realización de algunas de las actuaciones del proyecto Doñana 2005, parte del agua del Guadamar entrará a la marisma.

La precipitación que cae sobre el propio territorio de la Comarca genera tanto escorrentía superficial como recarga al acuífero. Además, fuera de los momentos de lluvia (o sea durante casi todo el año) los cursos superficiales permanentes y la mayoría de los estacionales llevan agua de origen subterráneo. Es el caso de los arroyos mayores (La Rocina, El 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 La Rocina o El Partido, o hacia la costa a través del médano costero.

Los aportes hídricos por la precipitación a la Comarca de Doñana no se pueden cuantificar bien con sólo los datos de las estaciones existentes dentro de la propia Comarca, y es necesario recurrir a series históricas y correlaciones con estaciones externas como las de Huelva y Sevilla (Tablada; apartado 2.2). Usando estas series sí se obtiene un conocimiento razonable de los aportes hídricos por lluvia en Doñana.

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 han puesto de manifiesto que existe un aporte atmosférico de sales y de solutos que deterioran la calidad del agua (contaminantes).

El aporte atmosférico de sales al medio hídrico proporciona la composición química mínima de los cuerpos de agua superficial y subterráneos. La lluvia de Doñana tiene una composición ligeramente ácida ($\text{pH} < 7$) y en ella dominan los iones cloruro y sodio, aunque como todas las lluvias se trata de agua muy poco mineralizada.

Una vez en el terreno el agua aumenta su mineralización fundamentalmente por disolución (de minerales, gases y materia orgánica) y por evaporación. En buena parte de Doñana los minerales aflorantes son poco solubles, por lo que el segundo proceso puede contribuir más a la mineralización del agua que el primero. Aún así, buena parte de las aguas superficiales y subterráneas son poco mineralizadas, de tipo clorurado sódico y con $\text{pH} > 7$, es decir que conservan claramente la marca de la lluvia.

Las condiciones cambian en los cuerpos de agua en torno a zonas agrícolas y urbanas, donde la escorrentía de la lluvia por tejados, pavimentos o el terreno

desnudo incorpora al agua sustancias de origen antrópico, cambiando el pH y las características químicas de esa agua.

La lluvia de Doñana también aporta al medio hídrico sustancias de origen antrópico generadas fuera de la Comarca. Así, estudiando la relación Cl/SO₄ en la lluvia local y en el agua subterránea se ha visto que la lluvia que se infiltra aporta una cantidad de S que excede la aportada por el aerosol marino. 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 (SO₂, que se oxida a SO₄²⁺ en el aire) o particulada (las partículas se depositan sobre la superficie del terreno y de la vegetación y son lixiviadas por la lluvia).

En el sector de acuífero libre al oeste de la marisma se han encontrado, además de S, algunos otros metales de origen no litológico penetrando el acuífero hasta alrededor de los 30–35 m. Entre ellos están el Zn, el Cd, el Cu y algunos otros que pueden proceder bien de los agroquímicos usando en la zona en cultivo o bien de aportes atmosféricos desde zonas externas a Doñana (todos ellos están presentes en las emisiones de las industrias de Huelva). En cualquier caso, constatan un aporte atmosférico al medio hídrico de solutos de procedencia externa a la zona. Hasta el momento no se ha constatado que esos aportes supongan un deterioro de la calidad del agua, pero podría ocurrir.

La disponibilidad de series temporales de datos hidrometeorológicos suficientemente completas y detalladas de una zona concreta es de extrema relevancia para el éxito de los estudios hidrológicos y la planificación y gestión medioambiental de la misma. Las aplicaciones posibles son múltiples: evaluación de la disponibilidad de recursos hídricos, de sequías y avenidas, del riesgo de incendios, del posible control de plagas, etc.

Como se ha visto en el apartado 2.2, no existe en la zona una red de control de los aportes atmosféricos. Esta red sería una herramienta muy útil para la cuantificación y la gestión de recursos hídricos superficiales y subterráneos, integrando los aspectos de cantidad y de calidad. También permitiría generar series temporales para su uso en modelos de simulación y previsión de los cambios en el medio ante modificaciones naturales o antrópicas de las condiciones de contorno (recarga, evapotranspiración, usos del suelo, etc.).

3.3.– Funcionamiento de las aguas superficiales: cantidad y calidad

3.3.1.– Aportaciones hídricas

En el marco del Proyecto Doñana 2005 se ha realizado un detallado estudio del comportamiento hidrológico de las cuencas que aportan escorrentía superficial a las Marismas. Así, cabe señalar los anejos hidrológicos de las actuaciones 3 (Restauración Hidrológica del Arroyo del Partido), 6 (Restauración del Caño Travieso), 7 (Recuperación de la Funcionalidad del Brazo de la Torre) y 10 (Modelo Hidrodinámico de la Marisma del Parque Nacional de Doñana y su Entorno). Estos estudios fueron realizados por AYESA bajo la dirección de la

Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (MIMAN, 2001). Lo que se expone a continuación ha sido obtenido a partir de dicha documentación y del “Estudio Hidrológico–Hidráulico de la Cuenca del Guadiamar” realizado por la Universidad Politécnica de Cataluña, por encargo de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y en el marco del Programa de Investigación del Corredor Verde del Guadiamar.

Según los estudios realizados dentro del Proyecto Doñana 2005, la aportación media del Guadiamar en el encauzamiento de Entremuros para el período 1942–94 es de 209 hm³/año, con una elevada irregularidad (desviación típica de 116.8 hm³/año). Los caudales medios mensuales oscilan entre los aproximadamente 13 m³/s de enero, febrero y marzo, y los inferiores a 3 m³/s en el período junio–octubre. Estos caudales incluyen desagües de algunos arrozales.

Debido a la escasez de datos fiables en las estaciones de aforo, el análisis de los caudales de avenida del río Guadiamar se realizó a partir de una simulación numérica del comportamiento hidrológico de la cuenca. Los caudales a la entrada del encauzamiento de Entremuros para diferentes períodos de retorno, T, obtenidos en el estudio realizado en el marco del Corredor Verde del Guadiamar, fueron:

T (años)	10	25	50	100	500
Caudal (m ³ /s)	658	937	1159	1389	1948

En la actuación núm.10 del Proyecto Doñana 2005 (MIMAN, 2001) se determinan las aportaciones del Arroyo de la Rocina, del Arroyo del Partido y de la Cañada Mayor para los años hidrológicos 1995–96, 1999–2000 y 2000–01. Éstas fueron (en hm³):

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

En la actuación núm.3 se calcularon los caudales de avenida del Arroyo del Partido en el Puente de la Matanza (una vez incorporado el Arroyo de la Parrilla). El caudal para 100 años de período de retorno es de 358 m³/s, mientras que el de 500 años es de 620 m³/s.

3.3.2.– Transporte sólido

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 en la colmatación. Aunque este proceso es visible en los arroyos de la Rocina y Cañada Mayor, es mucho más patente en el Arroyo del Partido. Ello justifica la actuación núm.3 del Proyecto Doñana 2005 (MIMAN, 2001: Restauración Hidrológica del 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 pérdida 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, por tanto, su erosión, y en especial la eliminación de la vegetación de ribera y el pastoreo abusivo. Estas situaciones se manifiestan de forma más intensa en las subcuencas de los arroyos de la Cárcava y Calancha. Como consecuencia de lo expuesto anteriormente, las aportaciones sólidas a la red de drenaje, y en particular al cauce principal, han sufrido en los últimos años un fuerte incremento, siendo actualmente muy elevadas.

Con anterioridad a 1981 el Arroyo del Partido desagüaba 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, presentando 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. Debido a ello, el nuevo cauce ha resultado inestable, provocando una fuerte erosión del mismo por los caudales 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 de ello 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 Marisma. El cono de deyección así formado avanza hacia el Este (zona de Matasgordas) y hacia el Oeste (Caño Marín y Aldea de El Rocío). Ello ha propiciado que últimamente, y para avenidas de cierta entidad, el Caño Marín actúe como rebosadero del Arroyo del Partido.

Todo lo anterior justifica la actuación núm.3 del Proyecto Doñana, 2005 actualmente en ejecución y que tiene los siguientes objetivos:

- Controlar los procesos de erosión, transporte y sedimentación de la cuenca del Arroyo del Partido, frenando el avance del cono de deyección sobre La Marisma.
- Reducir el riesgo de inundación en áreas habitadas.
- Realizar una restauración ambiental integral de una amplia zona en contacto con el Parque Nacional de Doñana.

3.3.3.– Calidad de las aguas superficiales

En la Comarca de Doñana hay unos 500 km de cauces (Madre del Avitorejo, Estero de Domingo Rubio, La Rocina, El Partido, Cañada Mayor, Algarbe, Pilas, Alcarayón, Portachuelo, Juncosilla, Sajón, Almirante, Majaberraque, Brazo de la Torre, Brazo de los Jerónimos, Brazo del Este, tramo mareal-estuarino del Guadalquivir y parte inferior del Guadiamar), que drenan una

superficie de unos 1500 km², excluyendo la cuenca del Guadiamar. De este conjunto, unos 300 km de cauce están muy antropizados, con eliminación de la vegetación de ribera, ocupaciones de dominio público y del cauce de avenidas, y contaminación por vertidos diversos. Solo unos 100 km se pueden considerar en buen estado (WWF, 2001) y están protegidos (Estero de Domingo Rubio, La Rocina, Cañada Mayor, Pilas).

Las poblaciones sobre estas cuencas son Rociana del Condado, Almonte, El Rocío, Los Bollullos Par del Condado, Paterna del Campo, Escarcena del Campo, Manzanilla, Chucena, Castilleja del Campo, Carrión de los Céspedes, Hinojos, Pilas, Villamanrique de la Condesa, Aznalcázar, Huévar, Sanlúcar la Mayor, Isla Mayor, Poblado de Alfonso XIII, Aznalcóllar, Castillo de las Guardas y sus pedanías, Albarida del Aljarafe, Olivares, Villanueva de Ariscal, Espartinas, Umbrete, Benacazón, Bollullos de la Mitación, Almansilla, Palomares, Coria y Puebla del Río.

En 2001 había 12 estaciones depuradoras, de las que seis estaban ya en funcionamiento. Una decena más estaban previstas para 2005. Las competencias de depuración están transferidas a la Junta de Andalucía, y la responsabilidad recae en los municipios, que son posibles receptores de ayudas económicas y técnicas para el desarrollo de los proyectos. Sin embargo algunos han sido declarados de interés general y la responsabilidad la retiene el Ministerio de Medio Ambiente, que aporta fondos a través de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Se trata de las poblaciones de El Rocío, Almonte, Rociana, Los Bollullos Par del Condado, Hinojos, Villamanrique de la Condesa, Pilas, Manzanilla, Chucena, Paterna del Campo, Escarcena del Campo, Aznalcázar, Huévar y Sanlúcar la Mayor.

Además de los núcleos de población se tienen urbanizaciones, principalmente en el Aljarafe, a veces fuera de la ordenación urbana, que producen vertidos a pozos negros y fosas sépticas y a algunos cauces superficiales, con soluciones difíciles económica y legalmente, pero que en algunos casos se están abordando (entorno de Sanlúcar la Mayor).

A los vertidos poblacionales se unen los agroindustriales, entre los que destacan los que guardan relación con la industria aceitunera. Se trata de un vertido estacional muy contaminante en salinidad y en materia orgánica (alpechines), que en parte se hace por infiltración al terreno. La eliminación por balsas de evaporación no tiene estudios conocidos ni sobre la eficacia ni de la parte que pasa al acuífero y sus efectos. El vertido de esos efluentes a la red urbana es un gran trastorno para el funcionamiento de la estación depuradora que pueda existir, como se experimenta en la de Villamanrique de la Condesa. El tratamiento de estos vertidos líquidos de forma económica es un problema pendiente y que puede requerir cambios importantes e inversiones en el proceso agroindustrial.

La tendencia es a que las depuradoras urbanas sean gestionadas por empresas especializadas que se resarcen con el pago de los servicios prestados, en general bajo la vigilancia de las autoridades regionales, pero con

a veces escasa implicación municipal, con lo que se pierde un importante elemento de supervisión y corresponsabilización.

3.4.– Funcionamiento hídrico de la Marisma en cantidad y calidad; efecto de las intervenciones humanas

3.4.1.– Hidrodinámica de las marismas

Las Marismas del Parque Nacional de Doñana constituyen un sistema hidráulico muy complejo, siendo aceptablemente bien conocidos los aspectos cualitativos de su funcionamiento pero no así los cuantitativos. En la actualidad existe poca información referente a aspectos de tanto 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-químico-biológicas, las características del movimiento del agua y la influencia que en ello tiene el viento. El conocimiento de estas variables es indispensable para poder definir con rigor las actuaciones necesarias que eviten la degradación de las Marismas.

En el marco del Proyecto Doñana 2005, y más concretamente dentro de la actuación núm.10 (Investigación asociada al programa), se realizó un estudio en modelo numérico de la hidrodinámica de la Marisma del Parque Nacional de Doñana.

La orografía del territorio donde se sitúan las Marismas presenta una práctica ausencia de relieve, quedando definida la red de drenaje por pequeñas 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 las Marismas es de gran interés disponer de una buena información topográfica, muy en particular del relieve, lo que supone una notable dificultad dada la extensión (unos 300 km² de superficie inundable) y la precisión requerida en la altimetría (unos decímetros).

Desde hace poco tiempo se dispone de una nueva técnica para obtener un modelo digital del terreno. Se trata de la altimetría láser de barrido. Consiste en la emisión de pulsos láser desde un equipo situado en un avión que sobrevuela el territorio objeto de estudio. El mismo equipo recibe dicha señal una vez ha sido reflejada por el suelo y mide el tiempo empleado en el recorrido de ida y vuelta, lo que permite determinar la distancia al suelo. Esta distancia se obtiene con una precisión del orden del centímetro. No obstante, el cálculo de la posición del avión y de la orientación de la señal láser emitida introducen también errores, siendo la precisión final de unos 15 cm.

La técnica de altimetría láser de barrido es capaz de medir la altura de varias decenas de miles de puntos cada segundo. La elevada densidad de puntos junto con la precisión en la medida hace que esta tecnología sea muy adecuada para obtener el modelo digital del terreno de una zona extensa y muy llana como es la Marisma. Así, en valor medio y en los aproximadamente 300 km² de Marismas, se determinaron las coordenadas (posición en planta y

altura) de un punto cada 3 m². También pudo determinarse con cierta precisión la altura y distribución de la vegetación existente en el momento en que se realizó la medida, en septiembre de 2002 (Dolz et al., 2005).

El modelo numérico que simula la hidrodinámica de las Marismas permite el cálculo de la evolución temporal de niveles y velocidades en los diferentes puntos de las mismas. Utiliza una aproximación unidimensional para estudiar el movimiento en la red de cauces y una aproximación bidimensional (acoplada a la unidimensional) para el análisis del flujo en el resto de las Marismas. La determinación del nivel y velocidad se realiza cada 10 minutos en cada una de las parcelas de 200 x 200 m² en que se han dividido las Marismas.

La calibración y validación del modelo se realizó con datos de campo referidos a la evolución anual de caudales entrantes/salientes y de niveles en determinados puntos de las Marismas. Para la correcta simulación también fue preciso disponer de datos de campo para que el modelo pueda contemplar de forma adecuada la infiltración, la evaporación, la influencia del viento en el desplazamiento del agua y la resistencia que la vegetación ofrece al movimiento del agua.

En el mes de marzo de 2004 ya se disponía del modelo digital del terreno y se estaba desarrollando el modelo numérico, realizándose una primera calibración–validación del mismo. La calibración se realizó con información de campo relativa al año hidrológico 1999–2000, mientras que la validación se llevó a cabo para los años hidrológicos 1995–96 y 2000–01. Cabe indicar que el año 1995–96 fue extremadamente húmedo. Los principales datos de campo utilizados fueron: lluvia sobre las Marismas; evaporación (con bastante incertidumbre); caudales aportados por los arroyos de la Rocina, del Partido y de la Cañada Mayor y caudales desaguados por las Marismas. Asimismo se disponía de escalas para la lectura óptica del nivel en diferentes puntos de las Marismas. Estas lecturas fueron tomadas en períodos irregulares de tiempo según fuera la accesibilidad de la escala, pudiendo ser una medida cada dos semanas o bien unas pocas (tres o cuatro) a lo largo del período de inundación.

En la Figura 3.1 se compara la evolución temporal de niveles medidos con los calculados en la escala situada en el Lucio del Rey.

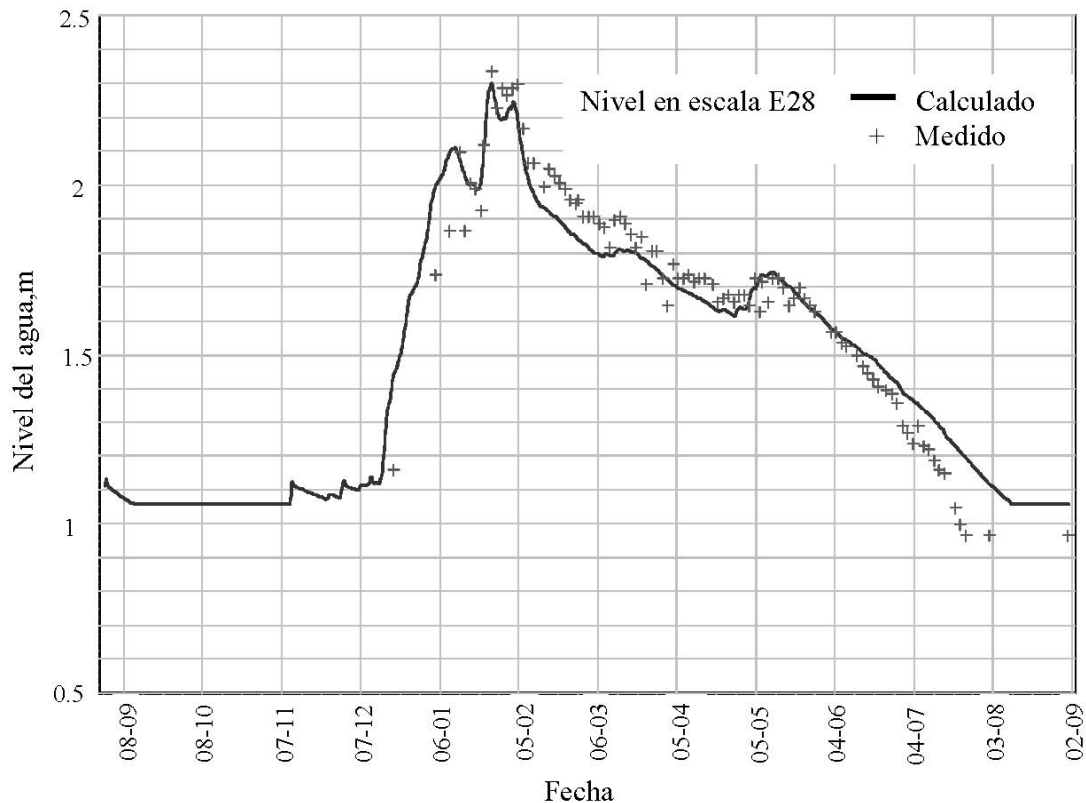


Figura 3.1.— Comparación de niveles medidos con calculados en el Lucio del Rey para el año hidrológico 1995–96. Datos FLUMEN.

Una vez calibrado y validado, el modelo numérico se utilizó para estudiar en detalle diferentes actuaciones previstas en el Proyecto Doñana 2005. Éstas fueron: eliminación de la Montaña del Río, recuperación de la funcionalidad del caño Travieso y del Brazo de la Torre, e incorporación de los caudales del Arroyo de la Cigüeña.

Toda la labor descrita anteriormente en relación con el estudio numérico de la hidrodinámica de la marisma fue desarrollada por AYESA bajo la dirección de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Actualmente el Grupo de Investigación FLUMEN de la Universidad Politécnica de Cataluña está ampliando dicho estudio [FLUMEN]. El objetivo es mejorar la calibración–validación del modelo numérico mediante la utilización de nueva información de campo más abundante y rigurosa. Cabe indicar que actualmente se dispone en la marisma de una red de medida en continuo de variables hidrometeorológicas, cosa que no ocurría cuando se llevó a cabo la primera calibración–validación. Así está previsto:

- Mejorar el modelo digital del terreno, de manera que el modelo numérico pueda disponer de una discretización de la superficie del terreno lo más ajustada posible a la realidad. Para ello se está poniendo a punto una malla irregular que se densifique en las zonas más activas del flujo: entrada/salida de caudales a la marisma y caños. En la actualidad ya se dispone de un modelo digital del terreno con una cuadrícula de 2 x 2 m y diferentes utilidades, como por ejemplo la obtención de perfiles transversales, mapas de pendientes y relaciones cota–volumen de agua y cota–superficie de agua. En las Figuras 3.2 y 3.3 se muestran algunos de

estos resultados, que se muestran volumétricamente y en área en la Figura 3.4.

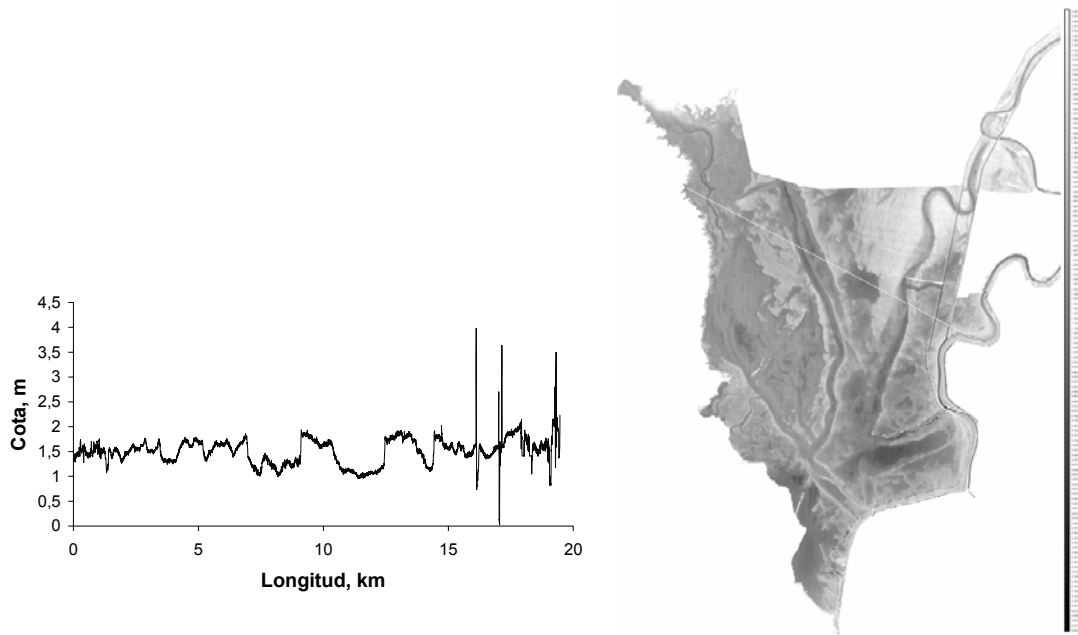


Figura 3.2.– Modelo digital del terreno de la Marisma y un perfil transversal de la misma.

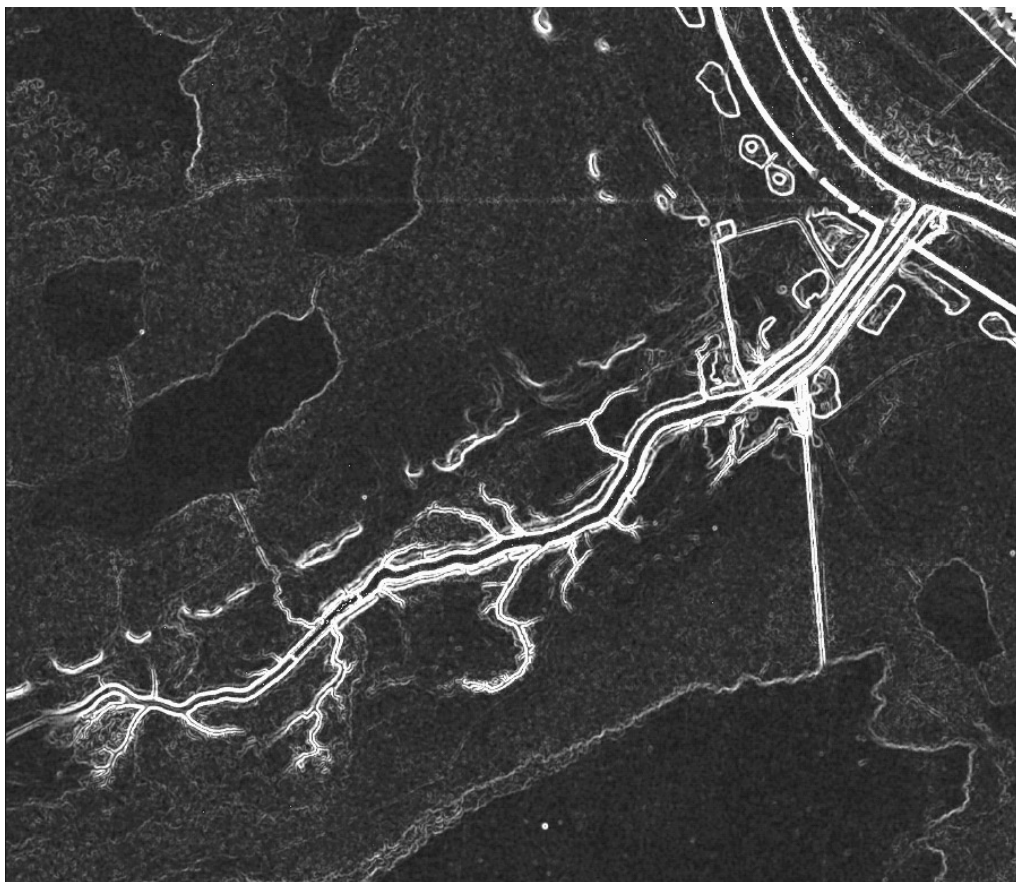


Figura 3.3.– Caracterización de los cauces mediante el análisis de pendientes en el modelo digital del terreno. Caño del Buen Tiro.

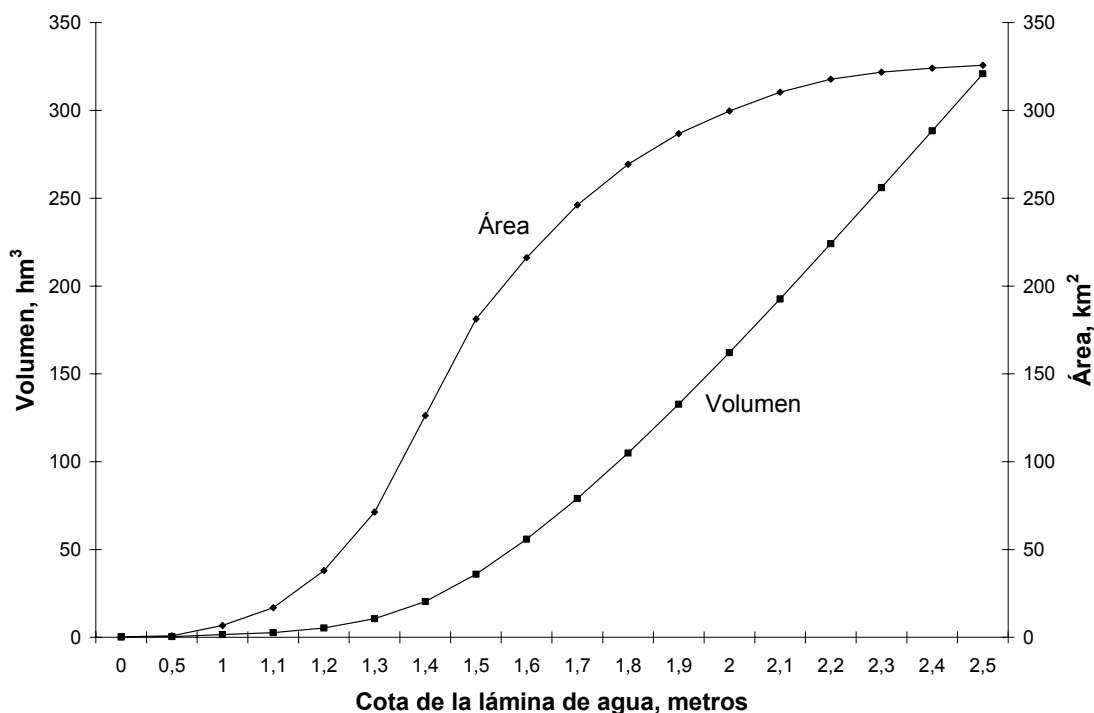


Figura 3.4.– Relación entre el volumen de agua almacenada y la superficie de agua, con la cota del agua en la Marisma de Doñana (datos propios inéditos).

Los valores de área de inundación y volumen almacenado para la situación de Marisma llena coinciden en gran medida con los obtenidos por Urdiales (1999).

Para mejorar la información y elaboración se requiere:

- Disponer de mejor conocimiento de los caudales entrantes a la marisma. Ello requiere mejorar las actuales estaciones de aforo.
- Determinar con mayor precisión la evaporación, lo que será posible con la información obtenida en las nuevas estaciones meteorológicas ya disponibles.
- Estudiar en detalle los procesos de inicio de llenado y final de vaciado. Para ello se están utilizando técnicas de teledetección mediante radar. La simulación del inicio de llenado requiere disponer de información relativa a la infiltración.
- En función de la vegetación se determinará la resistencia al flujo.
- Analizar la influencia del viento en el desplazamiento del agua en la Marisma: Unos primeros datos de campo muestran que esta influencia es notable.

En fase posterior, el modelo hidráulico de evolución temporal de niveles y velocidades servirá de base para el estudio de otros fenómenos vinculados a la hidrodinámica de las Marismas, como es el transporte y sedimentación del material sólido y la evolución de la calidad del agua.

La conclusión de estos trabajos permitirá disponer de una herramienta muy potente para conocer con rigor el comportamiento hidrodinámico de las Marismas y la incidencia que pudieran tener en este comportamiento las medidas a tomar para su protección.

3.4.2.– Efecto de las intervenciones humanas. El Proyecto Doñana 2005

Las sucesivas intervenciones humanas han alterado notablemente el funcionamiento de la marisma, tanto en lo que respecta a las aportaciones del Guadiamar como a las reacciones con el estuario del Guadalquivir.

En el Proyecto Doñana 2005 se contemplaron 11 actuaciones (MIMAN, 1999), todas ellas orientadas a propiciar que las Marismas de Doñana recuperen, en la medida de lo posible, la situación existente antes de la profunda transformación acaecida en la segunda mitad del siglo XX. Por su trascendencia cabe destacar:

Actuación 3: *Restauración del Arroyo del Partido* (en ejecución)

Actuación 6: *Restauración del Caño Travieso* (en ejecución)

Actuación 7: *Recuperación de la funcionalidad del Brazo de la Torre* (próxima ejecución)

Todas estas actuaciones se orientan hacia el restablecimiento de la hidrodinámica natural de los cursos superficiales de agua, de acuerdo con la topografía de la Marisma (Figura 2.8). Con estas intervenciones se espera que la distribución de salinidad se aproxime a la natural y que mejore la calidad al incrementarse la depuración de vertidos y su control, y haber cesado las actividades mineras.

En el caso de la actuación número 3, y tal como ya se expuso en el apartado 3.3.2, se propicia la recuperación de la llanura de inundación del tramo final del Arroyo del Partido.

La actuación número 6 tiene por objeto restaurar el Caño Travieso y de este modo permitir que los caudales de avenida del río Guadiamar sean conducidos a las Marismas de Doñana a través de este cauce. Ello ha sido posible gracias a la reincorporación de la finca Los Caracoles a las Marismas ya que el primer tramo del Caño Travieso se encuentra en ella. La actuación número 6 está estrechamente vinculada a la número 7. En esta última se recupera la funcionalidad fluvio–mareal 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.

En el ámbito del Proyecto Doñana 2005 también se contempla la permeabilización de la Marisma en su límite oriental, respecto al estuario actual del Guadalquivir, actuando sobre la Montaña del Río y su prolongación.

3.4.3.– Salinidad y calidad del agua de la Marisma

La información sobre la calidad del agua en la Marisma es muy escasa y dispersa. Recientemente se ha instalado una sonda multiparamétrica en el Lucio de los Ánsares (apartado 2.4.1), pero es pronto para ofrecer resultados.

Como ya ha sido dicho, el Proyecto Doñana 2005 se orienta a la recuperación de las características hidrológicas naturales en las aguas de superficie,

principalmente por lo que se refiere a la cantidad. Cabe esperar que en un futuro próximo el esfuerzo se oriente hacia la recuperación de la calidad del agua y para ello es preciso mejorar la información de campo existente. Así lo tiene previsto la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (apartado 2.3.2).

3.5.- Funcionamiento hídrico de las lagunas y humedales; efectos antrópicos

3.5.1.- Funcionamiento y relación con el entorno (acuífero y medio natural)

La Comarca de Doñana se caracteriza por la extraordinaria abundancia de humedales. Estos humedales tienen origen geomorfológico y funcionamiento hidrológico muy distintos, pero la mayor parte de ellos depende directamente del agua subterránea (Custodio, 1995; Manzano, 2001; Manzano et al., 2002a y 2002b; Coletto, 2003). Existe una buena aproximación a su clasificación genético-hidrológica, que es el paso imprescindible para la gestión de estos humedales (PAH, 2002; Montes et al., en prensa).

El principal factor de control del funcionamiento y, por tanto, de la ecología de estos humedales, es la hidrología (Custodio, 2000). Este término comprende factores tales como el origen del agua del humedal, el modo de vaciado del mismo, su hidroperiodo (frecuencia y permanencia de la inundación), la mineralización del agua y el tipo iónico (Manzano, 1999 y 2001). Debido a la dependencia que tiene buena parte de los humedales de Doñana del agua subterránea, un factor determinante de la hidrología de los mismos es la ubicación de los humedales respecto al flujo regional en el acuífero. En función de otros factores más locales la variedad de tipos genético-hidrológicos es grande; no obstante es posible establecer unos pocos tipos hidrológicos principales y sus características mayores, que a grandes rasgos son (Manzano, 2001) (Tabla 3.1):

Tabla 3.1.- Principales tipos hidrológicos e hidroquímicos de humedales en Doñana en relación con su ubicación respecto a la red hídrica. De Manzano (2001).

HUMEDALES DE DOÑANA	
UBICACIÓN Y TIPO QUÍMICO	CLASIFICACIÓN HIDROLÓGICA
MARISMA Agua salobre; tipo NaCl	* Temporales estacionales, epigénicos (marisma) * Permanentes, hipogénicos (lucios, ojos)
AREA DE RECARGA DEL ACUÍFERO Poco mineralizadas; tipo NaCl o NaCaClHCO ₃	* Estacionales, hipogénicos (Ribeteñilos, Ansares, Peladillo,...) * Permanentes, hipogénicos (Acebuche -antes-,...) * Estacionales o esporádicos, epigénicos (Río Oro, Jiménez,...) * Mixtos (Sancho Mingo,...)
AREA DE DESCARGA DEL ACUÍFERO Mineralización media; tipo Ca-HCO ₃ o CaNa-HCO ₃	* Estacionales, hipogénicos (Mogea, Sopedón, Ojillo, caños Vera, algaidas,...) * Permanentes, hipogénicos (Santa Olalla, Juan Sardina, Anguila, Cañada Mayor, Rocina,...) * Estacionales, epigénicos o mixtos (Madre de las Marismas)

- 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 eólicas, erosivas o simplemente morfológicas (como los corrales) entre las dunas antiguas y actuales. Esto se debe a que, salvo en las áreas donde se explota el acuífero, en general el nivel freático es 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, que se mantienen colgadas durante un tiempo gracias a la relativa impermeabilización del vaso lagunar por los restos orgánicos y material fino acumulados, y que desaparece habitualmente por evaporación. Debido a los cambios de uso del suelo y a la explotación de aguas subterráneas, hoy en día quedan pocos humedales sobre arenas que sean permanentes de forma natural (Dulce, Sta. Olalla, Las Madres), y la mayoría lo son de forma artificial bien por alimentación externa (El Huerto, Las Pajas, Acebuche), bien por excavación del vaso (habitualmente mediante zacallones, excavaciones locales para tener acceso permanente al agua freática; Alamillo, Moguer,...). Algunos humedales sobre el sector O de arenas se alimentan de agua vadosa, flujos temporales de corto recorrido en la zona no saturada del terreno, por encima del nivel freático regional, que se forman tras episodios lluviosos. En su camino descendente hacia la zona saturada del terreno estas aguas pueden eventualmente encontrar horizontes de menor permeabilidad (edáficos, fondos lagunares, turbas, etc.) que facilitan su desplazamiento lateral frente al vertical, descargando a las pequeñas depresiones del terreno que encuentran en su trayectoria (Figura 3.6).

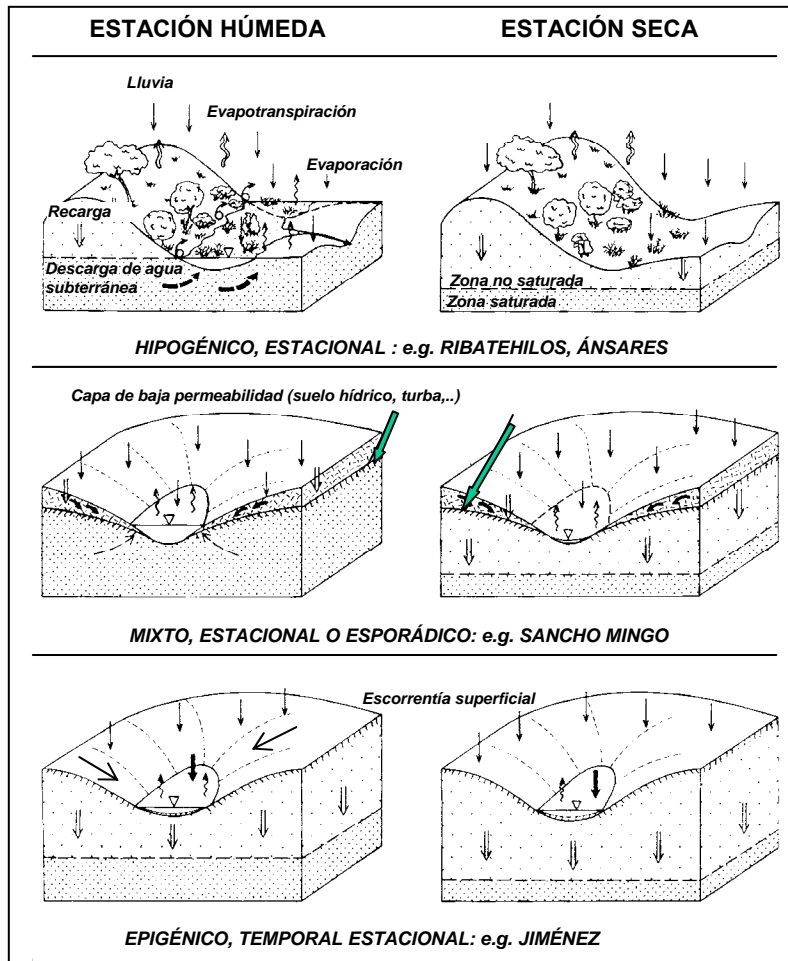


Figura 3.6.– Funcionamiento y clasificación hidrológica de algunos tipos de humedales existentes en el sector occidental del Manto Eólico Litoral. De Manzano (2001).

Atendiendo a la química del agua, los humedales ubicados en la zona de recarga tienen aguas de mineralización muy variable espacial y temporalmente, y en general son de tipo clorurado-sódico o intermedio entre éste 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.

Sea cual sea el origen del agua y su permanencia, todos los humedales que hay sobre las arenas mantienen especies acuáticas y freatofíticas que durante centenares o miles de años han contribuido a retener las arenas eólicas, ayudando así a crear el extenso y vegetado manto eólico litoral de Doñana.

- Los humedales ubicados en las zonas de descarga del acuífero son en su mayoría suelos húmedos densamente vegetados, con o sin lámina libre de agua, ubicados en las partes bajas de los arroyos (algaidas). En condiciones naturales suponen una descarga permanente de agua freática que permite mantener todo el año vegetación acuática y freatofítica. 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 occidental de El Asperillo (río Oro, etc.). También La Rocina es un drenaje lineal de agua subterránea, tanto freática como profunda, que mantiene un bosque de ribera relativamente bien conservado. Los arroyos que descargan a la marisma por el Norte (El Partido, Cañada de la Mayor, etc.) tenían una densa vegetación de ribera alimentada por agua freática, pero en este caso la vegetación fue eliminada hace tiempo para utilizar el terreno en cultivos y vías de comunicación; su caudal, sobre todo en el tramo bajo, es de origen freático la mayor parte del año, ya que la escorrentía de la lluvia sólo es importante con lluvias intensas.

En general tienen aguas de mineralización media a alta, variable a lo largo del año debido a procesos locales de evaporación y reacciones químicas, ya que los aportes de agua subterránea son de composición muy estable.

- También en la zona de acuífero confinado hay diversos tipos de humedales. Algunos son de alimentación subterránea en origen, ya que la marisma, antes mareal y hoy fluvial, recibe agua de los ríos y arroyos que a su vez drenan el acuífero de las arenas al Norte y Noroeste. Entre los distintos humedales de la marisma están: encharcamientos estacionales de aguas dulces a salinas que son residuo de la inundación invernal; encharcamientos permanentes (lucios) de aguas también dulces a salinas procedentes en parte de la descarga del agua freática del cordón arenoso litoral y en parte de la inundación invernal (algunos lucios se mantienen hoy artificialmente alimentados con agua subterránea bombeada desde las gravas y arenas confinadas); pequeñas áreas circulares de arenas permanentemente saturadas por flujos de agua subterránea ascendente desde niveles arenosos más o menos profundos (ojos de marisma); humedales mareales (queda uno, en la margen derecha del Guadalquivir, cerca de la desembocadura);...

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

3.5.2.– Efectos antrópicos sobre los humedales

La extracción intensiva de agua subterránea durante más de dos décadas, localizada en zonas de descarga natural del acuífero, ha ocasionado descensos locales acumulados de los niveles piezométricos profundos que a su vez han supuesto un descenso del nivel freático (Figura 3.7). Estos descensos no están aún estabilizados, y lo que se observa es una situación transitoria hasta que los niveles alcancen una nueva posición de equilibrio de acuerdo con la actual relación entre la recarga y la descarga del acuífero. Estos descensos suponen 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 que hace años eran surgentes, la disminución del goteo ascendente a través de las arcillas de marisma y la formación de un cono de depresión piezométrica de grandes dimensiones en el sector Noreste de la

marisma (Figura 3.8), el cual ha inducido el desplazamiento de agua salina de Sur a Norte y la salinización.

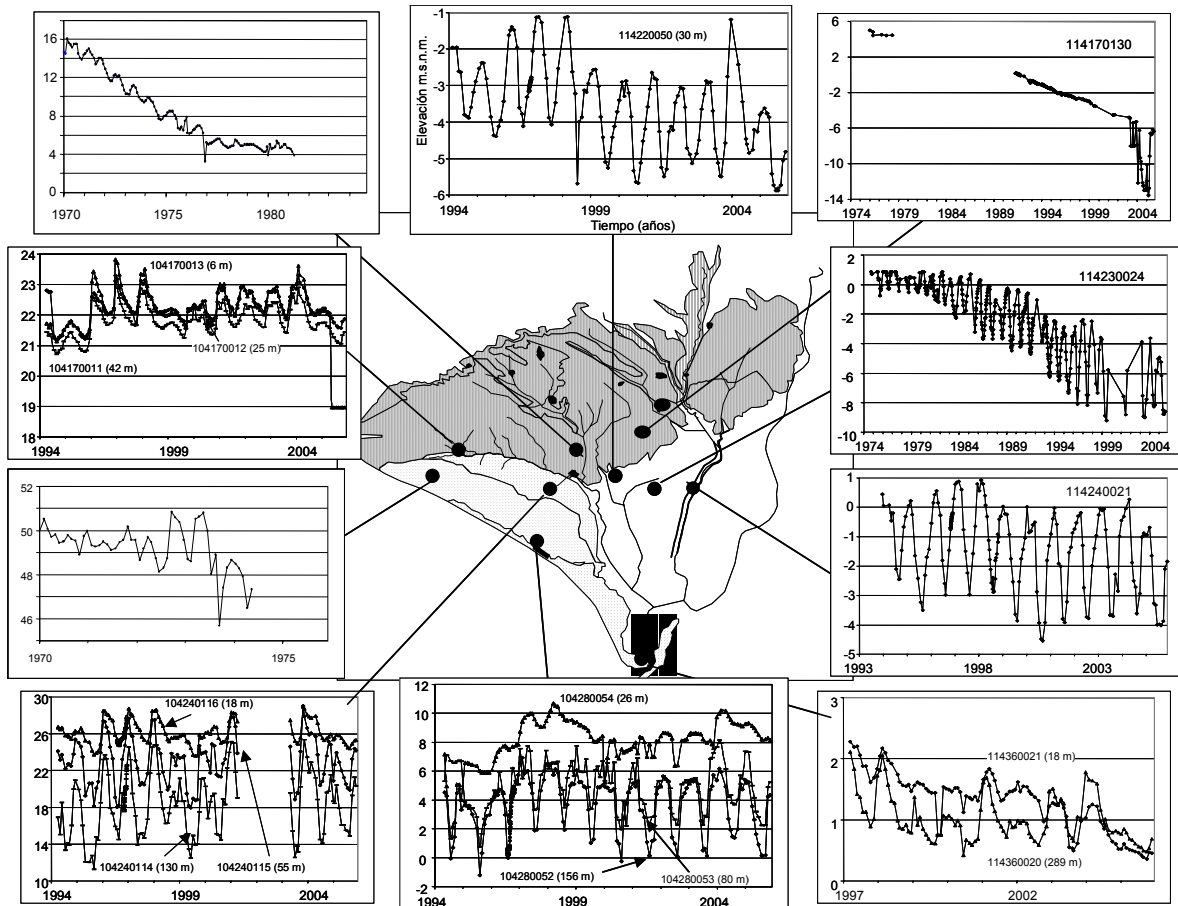


Figura 3.7.– Descensos freáticos y piezométricos acumulados en distintos lugares del acuífero en los primeros años tras el inicio de las extracciones intensivas de agua subterránea. Se observa el efecto sobre el nivel confinado bajo la marisma. De Manzano et al. (2002a).

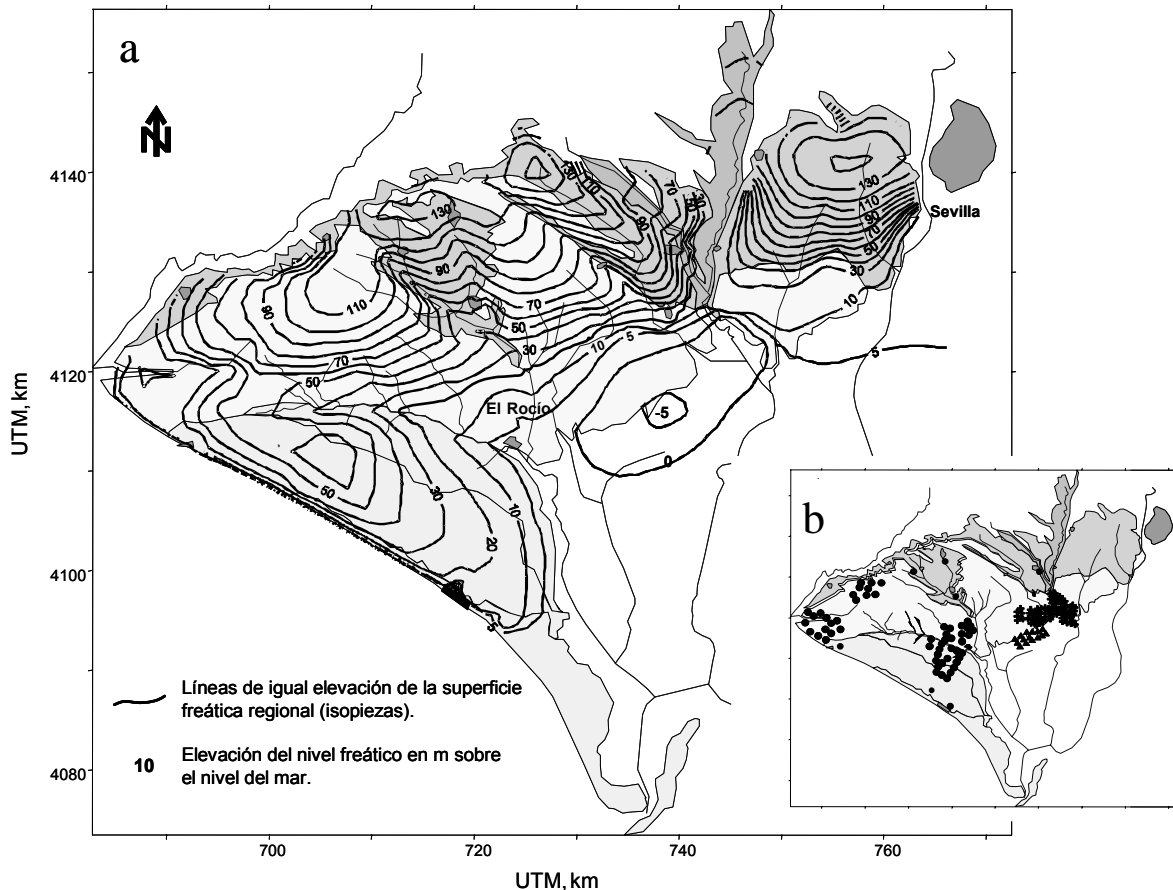


Figura 3.8.— Piezometría representativa de la situación actual a escala regional y ubicación de los principales centros de bombeo. En el cono piezométrico desarrollado al Noreste de la marisma los niveles alcanzan entre 15 y 20 metros bajo el nivel del mar. De Manzano et al. (2002a).

Los humedales situados cerca de las zonas de descarga regional del acuífero (alrededor de la marisma y en el borde Oeste) son vulnerables al efecto sobre los niveles freáticos y piezométricos producidos por las extracciones de agua subterránea intensivas y concentradas en esas zonas (Figura 3.9), 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 y el incremento de la evapotranspiración freática tras la introducción de eucaliptus en la zona hace algunas décadas. La vegetación freatófítica de los Cotos, La Vera y el contorno Norte de la marisma también ha experimentado las dificultades para alimentarse del nivel freático, que ahora es más profundo, secándose muchos ejemplares. Como consecuencia de ello, muchos pequeños humedales situados cerca de las áreas cultivadas (El Acebuche; El Alamillo; El Peladillo; La Mediana y La Rocina, hacia el Oeste; Villamanrique y Guadiamar, hacia el Norte) que hace 20–30 años eran permanentes, son hoy estacionales o incluso esporádicos, inundándose sólo en años muy húmedos.

Un efecto adicional del descenso freático localizado en los bordes de la marisma es la disminución de la descarga de agua a los múltiples arroyos, caños, etc. cuyos aportes, ya sea directos o a través de La Rocina, son relevantes para la marisma en época seca (Figura 3.10). Muchos que antes

eran permanentes son ahora estacionales y, además, llevan agua procedente de los excedentes de riego, lo que significa que introducen nutrientes, materia orgánica, plaguicidas, etc. en zonas de alto valor ecológico. Adicionalmente cambia la distribución de la duración de épocas secas y épocas húmedas, en lo que respecta a la accesibilidad de la vegetación al agua freática (Custodio, 2000; Trick, 1998; Trick y Custodio, 2004; Lozano, 2004).

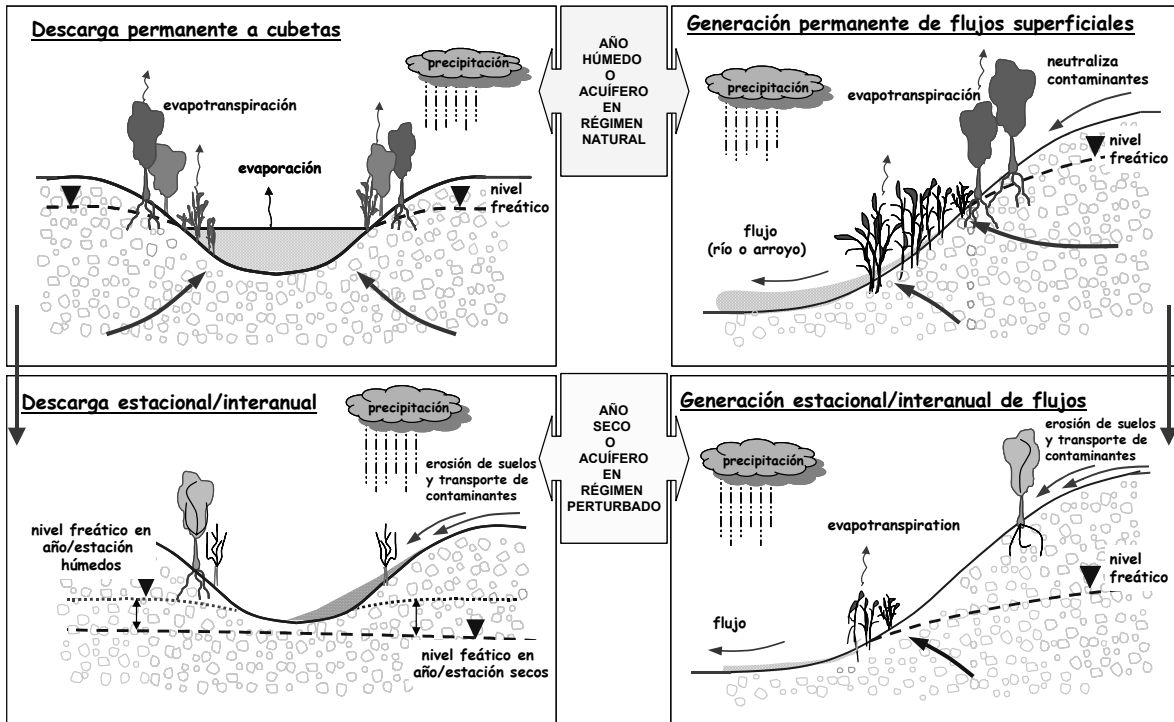


Figura 3.9.– Tipos de humedales dependientes del agua subterránea más frecuentes en Doñana. Derecha: lagunas generadas por la intersección del nivel freático con pequeñas cubetas o depresiones del terreno. Izquierda: pequeños cursos de agua (arroyos, caños, algaidas) generados por la intersección del 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. De Manzano y Custodio (2005).

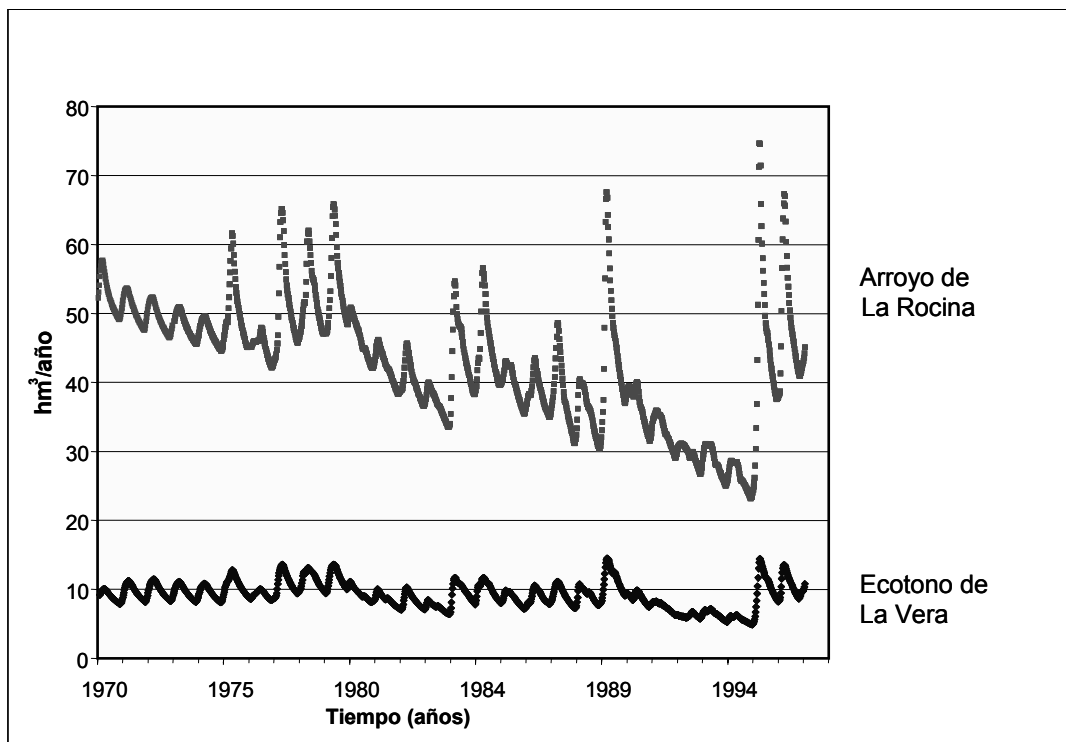


Figura 3.10.– Evolución de las descargas de agua subterránea entre 1970 y 1999 calculadas mediante modelación numérica del flujo de agua subterránea. El modelo está calibrado con datos de extracciones y de evolución piezométrica. Se observa el descenso acumulado interanual debido a las extracciones de agua subterránea. De UPC (1999).

3.6.– Funcionamiento de las aguas subterráneas; efectos antrópicos

3.6.1.– Contexto geológico

Como muestra la Figura 3.11, los materiales permeables de la Comarca de Doñana reposan sobre un substrato margoso y margoso-arenoso de edad Miocena y Pliocena, que aflora en el borde norte en las proximidades del Río Tinto y continua hacia el Este, y se hunde hacia la costa hasta profundidades de 150 a 250 m, mayores entre la desembocadura del Guadalquivir y Matalascañas.

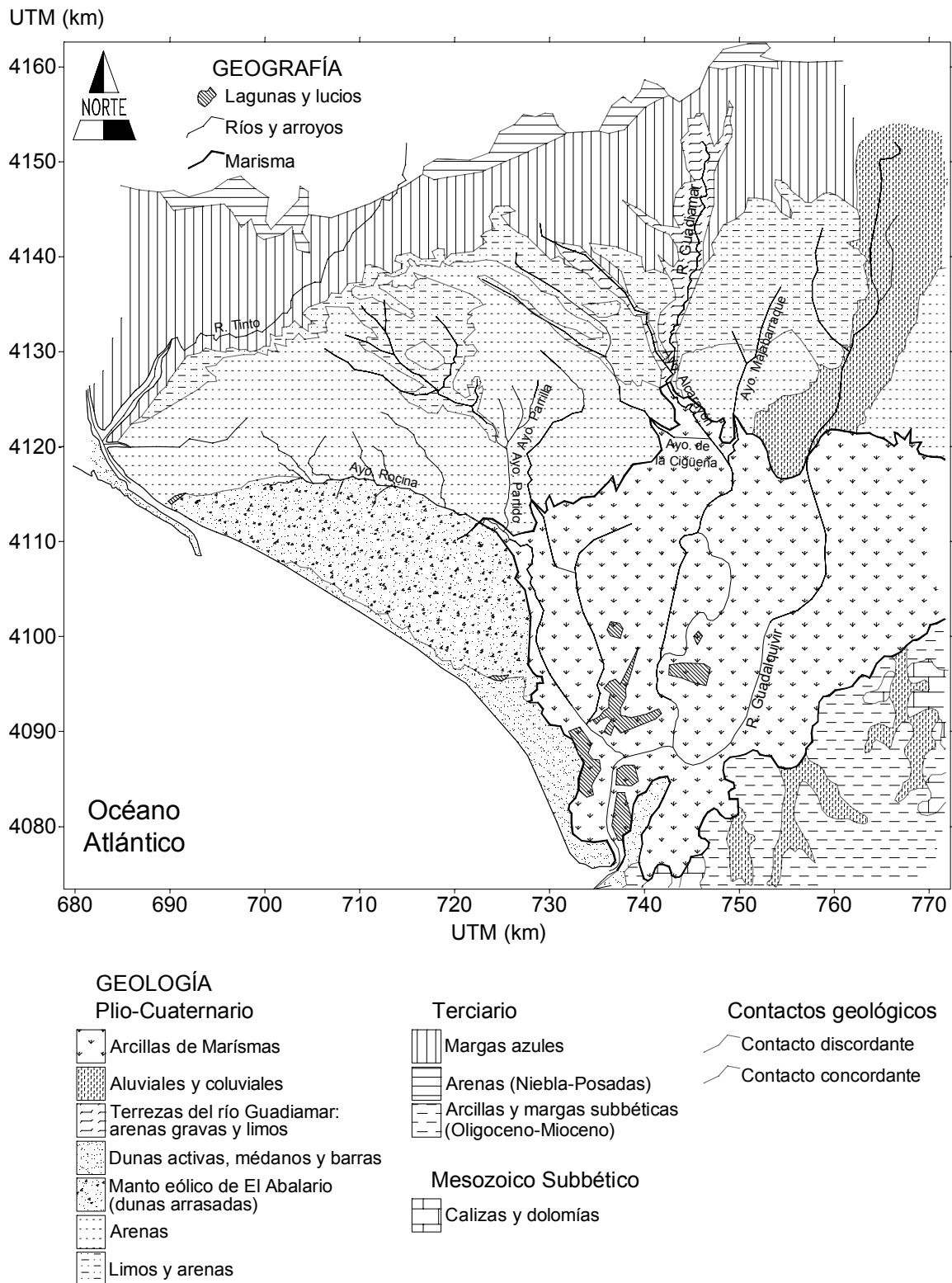


Figura 3.11.– Esbozo geológico de la Comarca de Doñana. Tomado de IGME (1974–1980).

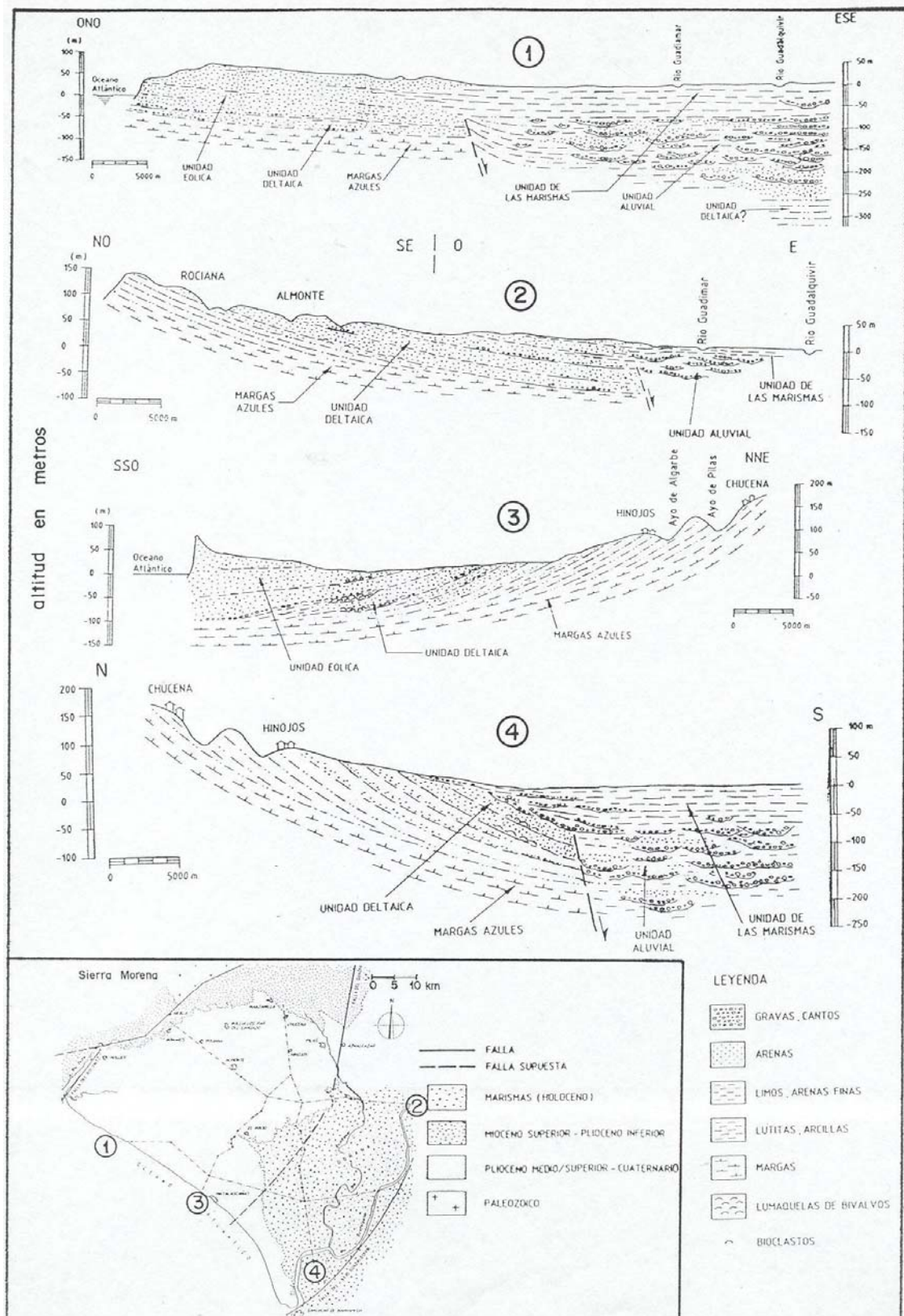


Figura 3.12.— Cortes geológicos representativos (modificado de Salvany y Custodio, 1995).

Sobre estos materiales se han depositado materiales arenosos con niveles de gravas de origen deltaico y de llanura aluvial, que se encuentran mayormente

en el área occidental, en El Abalarío, a profundidades crecientes hacia la costa, hasta unos 80–100 m, y potencia de hasta la decena de metros. Sobre estos materiales o directamente sobre las margas y margas arenosas se depositó en toda la periferia, hasta la costa, un grueso paquete de arenas fluvio–marinas, con abundante contenido en óxidos de hierro, y pasadas más finas y algunos niveles carbonosos–turbosos.

En lo que hoy es aproximadamente la Marisma se mantuvo una depresión abierta al mar con una base arenosa y escasas manifestaciones de la fase deltaica antes mencionada, que fue el valle del tramo final del Guadalquivir, con depósitos de llanura aluvial a diversos niveles y restos de depósitos de cauce de carácter más grosero cuanto más alejados de la actual costa, y de posición variable. Finalmente sobre estos materiales se han depositado durante el Holoceno, en los últimos 10.000 años, materiales finos limoso–arcillosos, a veces ricos en materia orgánica, con pasadas locales arenosas y a veces más groseras, que corresponden al relleno progresivo del estuario que se desarrolló tras el último ascenso del nivel del mar, de unos 100 m (Zazo et al., 1985). Se incluyen en los sedimentos restos de barras arenosas, y de marismas y de encharcamiento con fuerte evaporación.

Una notable barra arenosa que se desarrolla desde Matalascañas hacia la desembocadura del Guadalquivir aísla actualmente la Marisma actual del mar, y aflora claramente en su extremo SE (Malandar).

En toda el área emergida se produjo un proceso de meteorización climática de la superficie del terreno, en un clima posiblemente con fuertes estiajes, que ha dado lugar a una alteración edáfica de las arenas que es rica en finos y en óxidos de hierro, de menor permeabilidad y que se endurece notablemente cuando se seca (fragipan), el cual tiene un cierto papel en la generación de escorrentía superficial con lluvias intensas y en dificultar el drenaje natural de campos de cultivo.

Sobre las formaciones arenosas fluvio–marinas y su alteración edáfica superficial se han acumulado depósitos eólicos, de arena en parte originada de la abrasión marina de las formaciones fluvio–marinas. Estos depósitos, formados en varias etapas, forman un manto eólico hoy estabilizado que recubre buena parte de la zona más próxima a la costa de El Abalarío, de El Rocío y del Ecotono Norte, con espesores variables desde cero a varios metros, y que tiene una especial relevancia para la recarga a los acuíferos y para la vegetación.

Hacia el Sudeste las arenas eólicas forman dunas móviles, que se aprecian claramente desde Matalascañas hacia la desembocadura del Guadalquivir, dando el mayor campo dunar de Europa Occidental, que recubre en parte a las arenas fluvio–marinas, en parte a la barra costera y en parte a sedimentos de marisma, y que acentúan la separación entre el mar y la Marisma.

En la zona costera entre Matalascañas y la desembocadura del Guadalquivir aún subsisten algunas dudas sobre el detalle de la sedimentación geológica.

El extenso acuífero de la Comarca de Doñana, o acuífero Almonte–Marismas es el acuífero 27 de la antigua nomenclatura del IGME (actualmente denominado 05–21 en la parte de la cuenca del Guadalquivir y 04–14 en la parte de lo que era cuenca del Guadiana). Esta formado por el conjunto de todos los materiales arenosos y de gravas antes mencionados, con espesores nulos cerca del borde norte, hasta algo más de 150 m en la zona costera central.

El acuífero se extiende desde la franja Rociana–Almonte–Villamanrique de la Condesa, hasta el mar, y desde el Río Tinto hasta la margen izquierda del 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 Este de la depresión del Guadalquivir (Salvany y Custodio, 1995).

El acuífero enlaza con los sedimentos derivados del valle del Guadiamar y las formaciones del Aljarafe, en el Norte. Se trata de un acuífero que es libre en gran parte del territorio, excepto en la Marisma, donde las arcillas de sedimentación de estuario hacen que las arenas y gravas queden confinadas. Esta descripción hay que matizarla en el área de El Abalarío y otras vecinas donde hay un nivel de arenas gruesas y gravas bajo las arenas finas–medias fluvio–marinas, las que en detalle se comportarían como un medio semiconfinado, siendo el semiconfinante las arenas fluvio–marinas. Algo similar sucede dentro de las propias arenas en el área de Los Cotos (entre el área de El Abalarío y el ecotono Oeste, incluyendo a Matalascañas) donde un nivel arcilloso las divide en dos capas, quedando la inferior con carácter semiconfinado (véase la Figura 3.13).

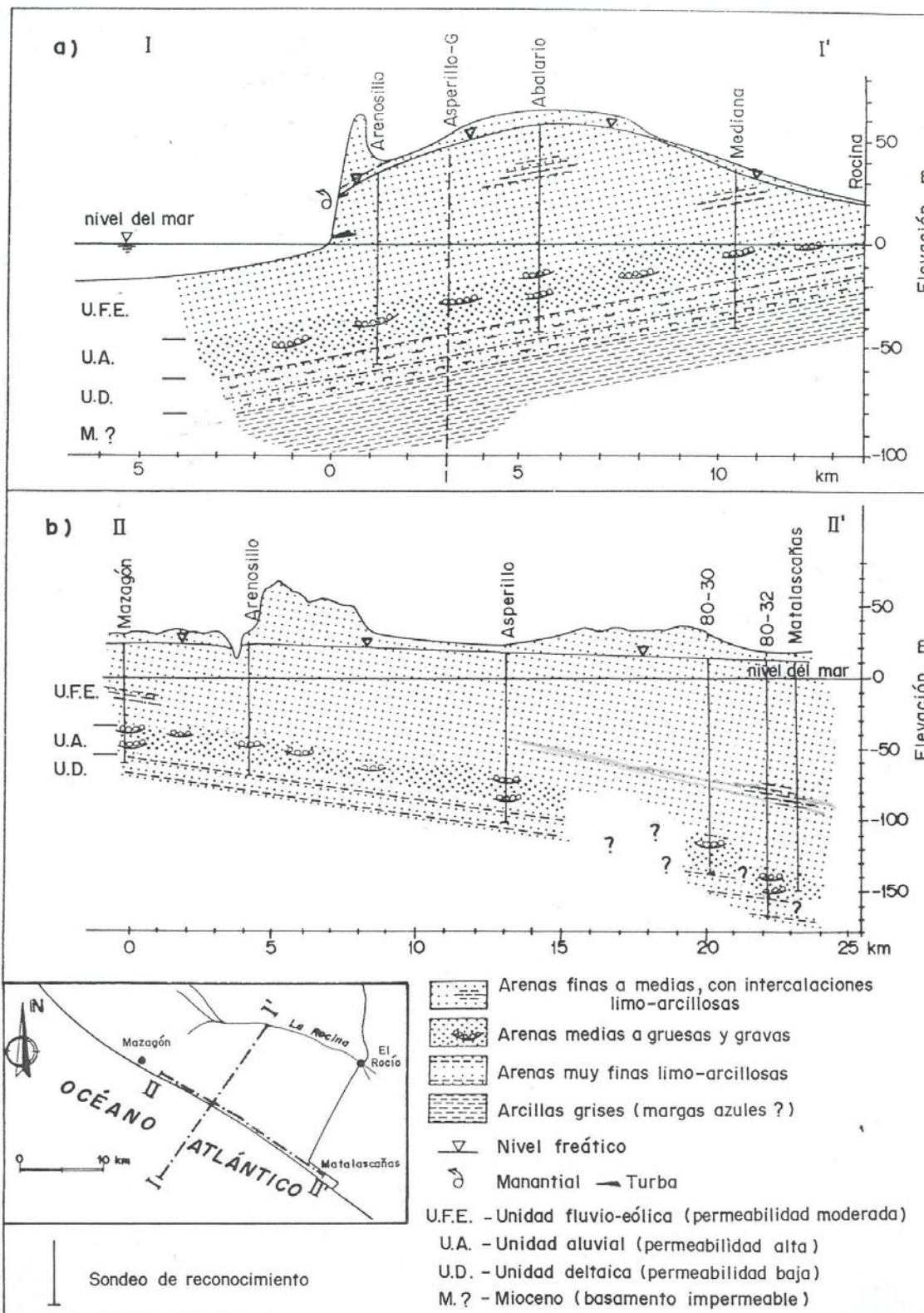


Figura 3.13.- Perfiles apoyados en sondeos perpendicular al mar por El Abalarío y según la costa, mostrando el nivel deltaico profundo más permeable y la existencia de niveles menos permeables intercalados (modificado de Trick y Custodio, 1994).

3.6.2.– Recarga y descarga del acuífero

El papel del manto eólico en la recarga 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 adquieren repelencia al agua de modo que al inicio de las lluvias el agua no moja (no penetra), escurre y se acumula en las depresiones del microrrelieve, donde se puede producir una recarga incrementada, que resulta en una mayor proporción de la lluvia caída (de Haro et al., 2000). Esto parece importante en años secos con algunas tormentas.

Donde no existe el manto eólico las arenas son de granulometría más irregular, con una notable fracción fina de tamaño hasta el de arcilla, y por lo tanto la posibilidad de escorrentía superficial es mayor (se aprecia una mayor frecuencia de líneas superficiales de drenaje) y la capacidad de campo es mayor (vegetación y bosque en mejores condiciones), lo que quiere decir una menor fracción de recarga respecto a la lluvia. Así el territorio no es homogéneo en cuanto a recarga, si no variable, con un papel importante de la presencia del manto eólico.

La única fuente de recarga al acuífero es la infiltración de la lluvia que cae sobre las arenas. Los excedentes de riego no generan recarga neta ya que el riego se realiza con aguas extraídas del propio acuífero, pero sí modifican la calidad del agua. La escorrentía superficial sobre el terreno es poco importante para originar recarga. La superficie freática regional (Figura 3.8) reproduce fielmente la topografía del terreno, con algunas modificaciones locales recientes debidas a la intensa extracción localizada de agua subterránea (Suso y Llamas, 1993). La Figura 3.8 muestra que los ríos y arroyos son líneas de descarga de agua subterránea, unos permanentes y otros estacionales. También muestra cómo en el sector occidental de arenas la topografía y las características hidráulicas favorecen la formación de un domo piezométrico cuyas cotas máximas (unos 60 metros) coinciden con la zona topográficamente más elevada, en el entorno del poblado de El Abalarío. A escala regional buena parte del agua subterránea se mueve desde las arenas y limos hacia el S y hacia el E, es decir, hacia donde el acuífero se transforma en confinado bajo la marisma; a escala local parte del agua sigue otras trayectorias de recorrido más corto, hacia los arroyos, ríos y lagunas.

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 en lagunas o lucios durante la formación, y modificada posteriormente por distintos procesos físicos y químicos (Baonza et al., 1982; Manzano et al., 2001; Manzano y Custodio, 2004). La información que se tiene indica que se trata de agua marina congénita, atrapada en los poros de los sedimentos durante la deposición de éstos en tiempos pasados, en los que el nivel marino era más bajo que el actual. Esta masa de agua salina no ha podido ser desplazada hacia el mar por

el agua dulce recargada en los últimos miles de años en las arenas periféricas debido a la pequeña cota topográfica de esa zona periférica alrededor de la Marisma desde la estabilización del nivel del mar hace unos 6000 años.

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

- 1) al mar, a lo largo de toda la franja costera (los numerosos manantiales y rezumes del acantilado de El Asperillo–El Arenosillo son buena muestra de ello, aunque la mayor parte de la descarga ocurre de forma difusa en el litoral (Custodio, 1993);
- 2) a los arroyos (Las Madres, La Rocina, El Partido, Cañada de la Mayor, Río Loro,..) y los ríos (tramo bajo del Guadiamar, 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 (la escasa profundidad de éste en el sector occidental lo favorece);
- 4) mediante transpiración freatofítica (especialmente en el área entre El Abalarío y La Rocina y entre Los Cotos y la marisma);
- 5) en forma de descargas lineales o difusas a caños y arroyos, alimentados por flujos verticales ascendentes desde tramos relativamente profundos;
- 6) 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, 2001; Manzano et al., 2002a; PAH, 2002; Montes et al. en prensa).

Una parte pequeña, no cuantificada, del flujo de agua subterránea, en vez de descargar antes del contacto con las arcillas podría continuar su camino hacia el acuífero 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. La posible descarga al mar, caso de existir, es poco conocida y probablemente pequeña, ya que el acuífero contiene agua salina confinada bajo la marisma y el cordón litoral de arenas de Matalascañas–Malandar contiene el nivel freático de 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 presentes en los corrales interdunares (Coletto, 2003; Montes et al., en prensa). Pero aunque la conexión hidráulica entre las arenas y las gravas confinadas bajo la marisma hace que éstas sean niveles acuíferos surgentes (con nivel piezométrico por encima de la superficie del terreno), la posible descarga profunda hacia el mar es más difícil de explicar, ya que el potencial hidráulico del agua dulce a la profundidad de las gravas no basta para compensar la diferencia de densidad con el agua de mar. Este aspecto es actualmente objeto de estudios más detallados.

Este esquema de funcionamiento 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 (Figura 3.8): 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.

3.6.3.– Efecto de las extracciones

La concentración espacial de las explotaciones ha producido tres efectos:

- 1) descenso local del nivel freático, decimétrico a métrico, y a veces métrico a decamétrico de los niveles piezométricos profundos (en el área de Los Hatos y Partido Resina los descensos llegan a 16 m); entre Octubre de 2005 y octubre de 1999 el 85% de los puntos de observación tienen un nivel más bajo, según la CHGQ).
- 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) y
- 3) localmente, inversión del gradiente hidráulico y del sentido de los flujos de agua, desplazando muy lentamente las aguas salinas confinadas bajo la marisma hacia algunas captaciones agrícolas en el sector NE de la misma, las cuales se están salinizando.

La explotación intensiva y localizada de agua subterránea ha tenido distinta incidencia en todo el acuífero, pero localmente (entorno de El Rocío, La Rocina, Villamanrique, Palos, Moguer,..) ha ocasionado modificaciones muy relevantes para el medio natural, tales como: 1) la reducción del agua disponible para las freatofitas y para los caños de agua dulce que sustentan buena parte de la fauna herbívora en verano (Figura 3.14); 2) la modificación del hidropериodo (patrón temporal de inundación) de muchos pequeños humedales del manto eólico, que han disminuido su frecuencia transformándose de permanentes en temporales y de estacionales en interanuales (Figura 3.15), o incluso han desaparecido, como indican algunos topónimos locales en zonas donde hoy no hay humedales (Manzano, 1999, 2001, 2002; Manzano et al., 2002b). Las extracciones localizadas e intensas de agua subterránea para abastecimiento a ciudades y urbanizaciones turísticas (Matalascañas, Mazagón) y en menor medida las destinadas a usos medioambientales (Acebuche), tienen también un efecto negativo sobre la cota del nivel freático y, por tanto, para que el mismo sea accesible a las necesidades hídricas del medio natural, tales como la vegetación y la inundación de humedales (Lozano, 2004), como se muestra en la Figura 3.16.

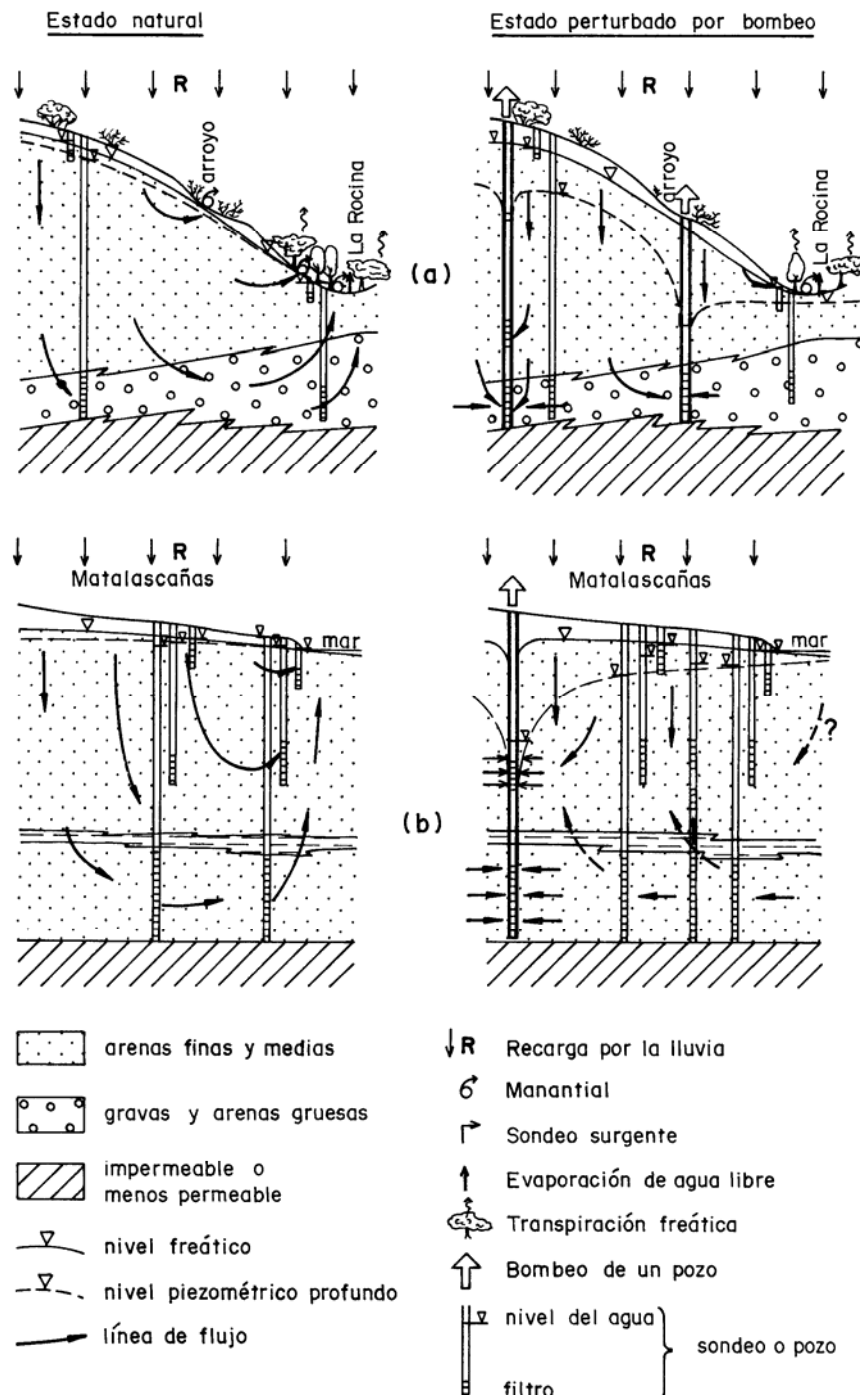


Figura 3.14.– Cambios en la posición de los niveles freáticos y piezométricos profundos y en el sentido de los flujos verticales del agua subterránea entre la situación de funcionamiento natural del acuífero y la influenciada por bombeo. Se muestra el caso de la Boca (La Rocina, junto a la Casariega) (arriba) y el área costera de Matalascañas (abajo). Según Custodio (2000).

Otra actuación humana que ha contribuido significativamente a un descenso apreciable, de orden decimétrico y alcance espacial kilométrico (Trick y Custodio, 2004) del nivel freático y la consiguiente modificación del funcionamiento hidrológico de muchos humedales ha sido la introducción de especies vegetales alóctonas (v.g. eucaliptus) con mayor accesibilidad al agua

subterránea de sus raíces, que la de 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, Mediana y otras aisladas desaparecieron casi por completo a causa de la introducción de eucaliptus hace unos 40 años. La erradicación casi total de estos árboles en esa zona hace unos 10–12 años, dentro de las actuaciones de conservación del Parque Natural de Doñana, favorece la recuperación de buena parte del funcionamiento hídrico original de esas lagunas. Pero esta recuperación está en parte exacerbada por la escasa cobertura vegetal existente, en tanto no se restablezca la vegetación natural. En ese caso se evolucionará hacia una posición intermedia. Véanse algunas consecuencias en la Figura 3.15.

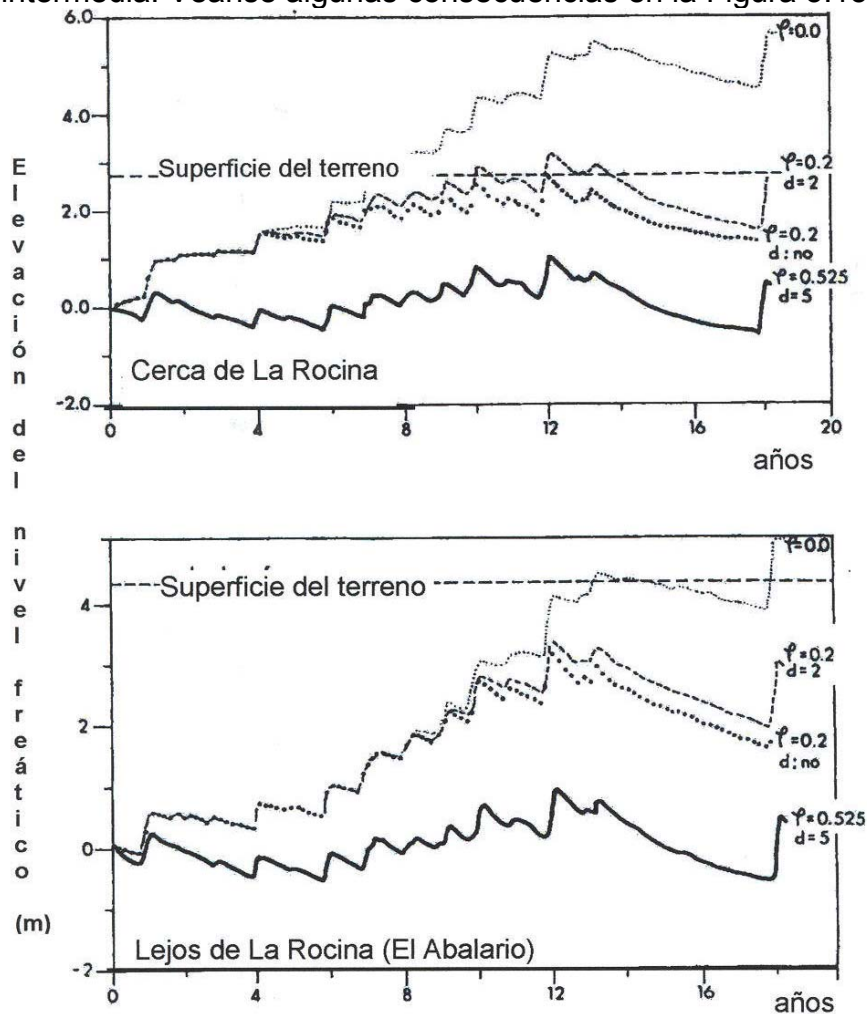


Figura 3.15.– Simulación del efecto sobre la posición del nivel freático de distintas alternativas de gestión de la vegetación en el área de El Abalarío, sin modificar la explotación actual del acuífero. (Modificado de Trick, 1988 en Custodio, 2000). φ es la evaporación freática máxima (m/año) y d es la profundidad máxima alcanzable por la evaporación freática (valor impuesto en m). $\varphi = 0,525$ m/año y $d = 5$ m es el valor de la situación real calibrada (con eucaliptos); $\varphi = 0,2$ m/año y $d = 2$ m es el valor representativo de sustituir los eucaliptos por la vegetación nativa original; $\varphi = 0,2$ m/año y $d = \text{"no"}$ es el valor de sustituir 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 sólo unos 15 años. Sustituir los eucaliptos por una vegetación nativa que sólo alcanzara el nivel freático cuando éste estuviera 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. Leyendo hacia atrás en tiempo, se deduce que el impacto de la introducción de los eucaliptos sobre el descenso del nivel freático ha sido de orden decimétrico a métrico.

3.6.4.– Tiempos de permanencia e hidrogeoquímica

Los tiempos medios de permanencia del agua subterránea en el terreno son muy variables según las condiciones de cada lugar. Mediante el estudio de los isótopos ambientales tritio y ^{14}C en el agua se sabe que:

- a) la transferencia del agua de recarga hasta el nivel freático oscila entre menos de un año y pocos años; que el agua de los manantiales costeros de El Asperillo tiene pocos años de permanencia en el terreno;
- b) que el agua de los pozos profundos (menos de 40 metros) del sector de arenas y las descargas de flujos regionales tiene varias decenas de años de permanencia y
- c) que los pozos profundos bajo la marisma tienen aguas con edades entre 1000 y 15000 años (Baonza et al., 1984; Iglesias, 1999; Manzano et al, 2001).

Las características hidrogeoquímicas y la calidad de las aguas subterráneas de la Comarca de Doñana dependen del lugar, aunque en general están marcadas por la baja reactividad de los materiales, que son arenas predominantemente silíceas.

En el manto eólico, donde no quedan carbonatos solubles, y la recarga es importante, las aguas subterráneas son de baja mineralización, que disminuye al alejarse de la costa (menor impacto del aerosol marino), y tienen carácter clorurado-sódico (influencia marina) y contenidos en cloruro en el entorno de 30–50 mg/L. Este agua de recarga es similar a la del acuífero, también silíceo y carente de carbonatos (si los hubo ya han sido lixiviados), y se mantiene así hasta la descarga al mar, a la Rocina y al ecotono.

En las áreas en que no existe manto eólico, y tanto más cuanto más fracción fina tenga la arena (mayor capacidad de campo) la evapotranspiración es mayor y la recarga 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. No obstante, aún son aptas para riego.

En profundidad pueden existir restos de componentes carbonatados en los sedimentos debido a no haberse aún lixiviado por la lenta tasa de renovación. La acidez del agua de recarga favorece esa disolución. Las aguas resultantes, con la concentración de cloruros que corresponde a las áreas de recarga, son ahora notablemente más ricas en bicarbonato y en calcio. Su lento circular ha sido notablemente perturbado por las extracciones de agua subterránea. Su existencia se manifiesta en los pozos profundos, en especial cerca de las áreas de descarga en La Rocina y en el ecotono, ya que los volúmenes de agua subterránea hasta ahora extraídos no han supuesto una suficiente renovación del agua almacenada en el acuífero. Los trabajos de investigación no han llegado a poner de manifiesto esta renovación, y lamentablemente no existe un muestreo sistemático de puntos seleccionados para realizar ese seguimiento.

En los niveles permeables bajo la Marisma se encuentra agua salina, a veces hipersalina (más salina que la del mar), que es de origen marino, penetrada en

la fase de estuario o congénita con los sedimentos, y en ocasiones agua de lagunas costeras evaporadas. Lo dicho vale para toda la Marisma y la franja costera correspondiente, hasta cerca de Matalascañas, aunque allí el tránsito entre esas aguas salinas y las aguas dulces de Matalascañas no es bien conocido.

Las aguas salinas de Marisma no han sido desplazadas por el agua dulce recargada en las arenas periféricas ya que en el borde del área confinada la cota es insuficiente para compensar el mayor potencial del agua salina (más densa) en profundidad, según el principio de Badon Ghijben–Herzberg. Las aguas de las arenas descargan en el contacto con la Marisma (ecotono) o solo en una franja reducida alrededor de la misma. Así 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. La información disponible es numerosa, pero de escasa utilidad ya que en general se trata de mezclas variables de agua en la vertical, sin datos para determinar las condiciones de muestreo.

Localmente pueden existir variantes notables. 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 luego se precipita masivamente por reoxidación y aumento del pH en el entorno de las áreas de recarga.

Las áreas lagunares son naturalmente áreas de descarga de agua subterránea local (de los cuerpos de dunas circundantes), y en ocasiones también de líneas de corrientes profundas, como sucede en Santa Olalla. La evaporación de agua libre y la transpiración del agua freática circundante por la vegetación 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 considerarse los sucesivos ciclos de inundación–secado y el comportamiento de los sedimentos (Coletto 2003; Lozano, 2004).

La acción antrópica sobre la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea es diversa. La más directa y conspicua es la derivada del regadío con aguas subterráneas locales, pero también es la menos conocida en sus detalles. El agua aplicada al terreno, a la que se suman nutrientes (abonos) y otros productos agroquímicos (plaguicidas, herbicidas, vermícidias, ...), es evapoconcentrada y el exceso, con las sales disueltas y las artificialmente añadidas, se recarga al acuífero subyacente. Está demostrado que se trata de aguas con una salinidad hasta un orden de magnitud mayor y con un elevado contenido en nitratos. En unos lugares ha afectado ya a todo el espesor del acuífero y a los propios pozos (que incluyen algunos de abastecimiento), y se produce una extensión según las líneas de corriente, aunque no está claro si afloran en arroyos locales ya que los niveles se mantienen artificialmente profundos. En otros lugares las aguas contaminadas están aún descendiendo por las arenas fluvio–marinas hacia los niveles más permeables profundos (área de El Abalarío) y todavía no alcanzan de rejilla de los pozos, pero lo harán en algunos años. La descarga en los ecotonos se producirá con retraso,

pero cuando llegue puede suponer un cambio importante en los habitats 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 del fragipan bajo el manto eólico hace que en determinadas áreas de cultivo se produzca una descarga superficial de parte del excedente de agua de riego en arroyos locales, los que van a parar a La Rocina y al ecotono (en parte se pueden infiltrar), aún mal conocido y que es objeto de uno de los estudios del Programa Doñana 2005. El Arroyo de La Rocina ya parece estar recibiendo de forma difusa y concentrada parte de esas descargas.

3.6.5.– Contaminación de las aguas subterráneas

Los vertidos poblacionales afectan poco a las aguas subterráneas ya que son muy pequeños en la cuenca de La Rocina. Pero se desconoce lo que sucede en la cuenca del Arroyo del Partido y los otros hasta el Guadiamar, y como el propio Guadiamar puede afectar al acuífero cuando su aluvial toma contacto con los sedimentos de la Unidad Almonte–Marismas. La gran depresión local de niveles creada por los bombeos favorece la infiltración. Este hecho se estudió con cierto detalle con ocasión del vertido de lodos piríticos y aguas ácidas tras el accidente de las balsas de lodos de las minas de Aznalcóllar, sobre el Guadiamar. Sin embargo no ha habido ningún estudio hidrogeoquímico específico ni tampoco seguimiento.

Los descensos piezométricos a lo largo de los ecotonos, a causa de las extracciones, en especial en El Rocío y en el Norte, no solo 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 extensión del agua salina, que ahora impregna terrenos que antes contenían agua dulce (se identifica el cambio iónico correspondiente). En consecuencia ha ido aumentando la salinidad de algunos pozos. Pero no ha habido un seguimiento del proceso y 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 y por no existir una serie temporal suficiente.

También los descensos piezométricos producidos por las extracciones están afectando a las 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 agua que habitualmente está inundada, y en el comportamiento del vaso lagunar. Éste en muchos casos ha pasado de ser un lugar permanente o temporalmente de descarga a ser un lugar permanente 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, y la generación de sulfatos a partir de los sulfuros atrapados en los materiales durante las etapas de frecuente inundación.

La recarga natural se hacía a partir del agua de lluvia, cuya relación Cl/SO₄ estaba próxima a la del agua marina (=11 para valores en miliequivalentes), pero 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, y se ve reflejado en una clara disminución de la relación Cl/SO₄ y de la relación Cl/Br (Alcalá y Custodio, 2005). Eso se observa en la lluvia y en el agua subterránea, donde penetra hasta cierta profundidad. Ésta difiere poco de la penetración del NO₃⁻ en los campos de cultivo más antiguos.

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 las publicaciones y tesis doctorales. Estos estudios son ahora suficientes para apoyar un modelo conceptual sólido, pero que aún tiene puntos débiles e incógnitas, que deberán completarse.

En un sistema acuífero ideal la temperatura del agua subterránea debería crecer en profundidad del orden de 3°C/100 m, algo menos allí donde haya una recarga intensa. A grandes rasgos esto es lo que sucede en Doñana a partir de datos de la red piezométrica y de registros térmicos a lo largo de los sondeos. Sin embargo se observan algunas anomalías que corresponden a un cierto incremento de temperatura en la parte superior, y que parece corresponder al efecto de cambio de uso del territorio desde bosque/matorral natural a cultivos y urbanizaciones, con penetraciones 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 es por cambio climático global, sino por una causa que se superpone al mismo, como es la indicada (Custodio, 1999).

3.7.– Evolución de la demanda hídrica poblacional y agrícola

3.7.1.– Demanda de agua agrícola para regadío

Tradicionalmente la agricultura en la Comarca de Doñana se había localizado en los campos del Norte y el Noroeste, principalmente viñedo y olivar, en secano. Los primeros intentos de regadío del sector de las arenas corresponden a algunas fincas particulares próximas al Rocío (como por ejemplo Mimbrales) en la década de 1970, y luego en áreas más extensas con el arranque del Plan de Transformación de Riego Almonte–Marismas a finales de la década de 1970 y principios de la de 1980. Según el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos en 1991 se tenía la situación de regadío reflejada en la Tabla 3.2, en la que no se incluye el sector más al Oeste, el de Palos–Moguer, ni los incipientes intentos de riego del olivar. De los casi 53 hm³/a utilizados en esas áreas se pasa a los 72–82 hm³/a totales en toda la Comarca de Doñana, incluyendo el abastecimiento. Esa cifra tenía una incertidumbre razonable, a falta de medidores y controles específicos, pero probablemente no debía ser superior a 15 hm³/año. El riego en el área de Moguer–Palos se había estimado groseramente en unos 12 hm³/a.

En la Tabla 3.2 se incluyen algunas dotaciones medias de agua por tipo de cultivo. En CIED (1992) se consideraba que las dotaciones medias eran de 3000–4500 m³·ha⁻¹·a⁻¹ para cultivos herbáceos, de 10.000–12.000 m³·ha⁻¹·a⁻¹ para frutales y hasta 16,000 m³·ha⁻¹·a⁻¹ para el arroz.

El crecimiento progresivo para riego se detuvo hacia los inicios de la década de 1990 y desde entonces parece haber decrecido algo (Figura 3.16), aunque no se ha dispuesto de cifras de detalle. En la Tabla 3.3 se relaciona un conjunto de datos relevantes. En realidad unas áreas son aparentemente abandonadas mientras se ocupan otras nuevas, para luego reemprender labores en áreas antiguas. No se ha hecho un seguimiento de detalle, que posiblemente sería factible hasta cierto grado con una razonable fiabilidad con ayuda de las cámaras agrarias locales.

Tabla 3.2.– Situación de extracciones agrícolas en los sectores del Plan Almonte–Marismas según el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana. Datos de Giráldez et al., 1991 e IRYDA (1991).

Sector	Sector I		Sector II		Sector III		Total ^(*)		Dotación media m ³ /ha/a
	Ecotono Norte		El Rocío		Marisma		ha	hm ³ /a	
Tipo de cultivo	ha	hm ³ /a	ha	hm ³ /a	ha	hm ³ /a	ha	hm ³ /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	6540

^(*)adiciona otras áreas fuera de los Sectores del Plan Almonte–Marismas

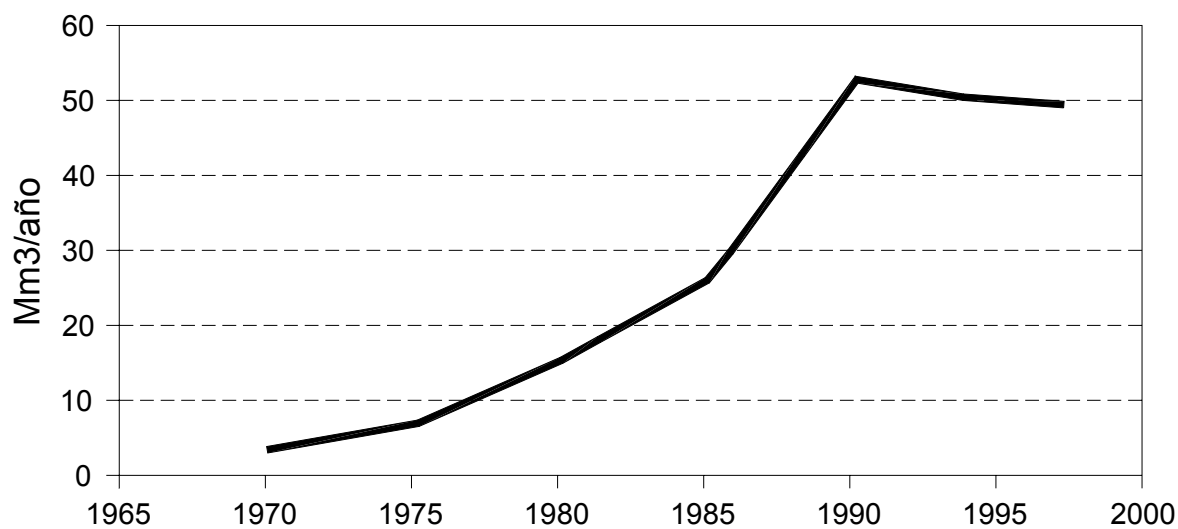


Figura 3.16.– Volumen bombeado del acuífero para riego en el área del Plan Regable Almonte–Marismas según datos de la Junta de Andalucía (1999), en Giansante (2003).

Tabla 3.3.– Evolución del Plan de Transformación Agraria Almonte–Marismas (PTAAM) y Comarca de Doñana.

Año	Superficie, ha transformadas	Regadas	Uso de agua hm ³ /a	Comentarios
1971	—	1100	6	Privadas. Decreto 194/1971 de transformación de 45950 ha
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	En área de la CHGQ, 16580 ha con 75 hm ³ /a en toda la Comarca 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	

Notas:

Comarca de Doñana Año 1992 1996 1999 2003
 ha 17733 28229 32497 31978

Gran crecimiento: Aznalcázar 1993–98
 Villamanrique 1998–99
 Chucena, Hinojos, Escarcena, Pilas 1999–03

Decrece y luego crece: Almonte 1996–02

Riego olivar 6–12 hm³/a (solo en parte sobre acuífero Almonte–Marismas)

El Plan Hidrológico del Guadalquivir (1988) da para el área de la Comarca de Doñana un tope de extracción de 124 hm³/a, con prohibición de nuevos pozos (salvo para abastecimiento) en áreas de su territorio correspondientes a los entornos de Palos–Moguer, Mazagón, Sanlúcar de Barrameda, cuenca media de La Rocina, La Vera–Retuerta y Sur de Villamanrique de la Condesa.

En un inventario de detalle encargado por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir entre 1995–2002, con una inversión de algo más de 1 M€ se han controlado en el Sector Regable III del PTAAM, en 1986, con foto aérea, 5445 ha regadas con agua subterránea, de ellas 1600 ha de arroz (comúnmente se citaban 1000 ha). Del conjunto de 5445 ha eran legales 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 casi 38 hm³/a. En la Tabla 3.4 se presentan datos parciales del área para 1996.

En el sector W, donde además de fresones se han ido introduciendo otros frutos como la frambuesa y el arándano, hay además cítricos y una parte del fresón en cultivo hidropónico. Tres comunidades de regantes con pozos (Nuevo Puerto–Malvinas, Avitorejo y El Fresno) suman 4251 ha, a las que se les puede atribuir unos 20 hm³/a.

La preocupación de la CHGQ por las extracciones, en general ilegales, en la cabecera del Arroyo de La Rocina, para ser usadas en riegos de fresones en el área de Moguer, ha llevado a dicho organismo a un tratamiento detallado de las concesiones/autorizaciones en la parte de la Comarca del Condado que

corresponde a la Comarca 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.

Tabla 3.4.– Crecimiento del área regada del 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	hm ³ /a	ha	hm ³ /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

En 2004 un total de 440 solicitudes 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.

En la Tabla 3.5 se reúnen los datos estadísticos más recientes encontrados, que pueden servir de base a una evaluación de la demanda de agua mediante el uso de dotaciones aceptadas en la zona (Tabla 3.6).

Tabla 3.5.– Resumen de actividad agraria en la Comarca 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 26% sup. agraria. Área Norte
Olivar	4262	HU	Si	
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 Condado de Huelva Área Norte. En 1980 tres veces más
Fresón	4536	HU	Si	Oeste–Noroeste. Max 1999 con 5000 ha Inicio en 1980 ⁽¹⁾
Tubérculos	1031		No	
Frambuesa	545		Si	
Legumbres	396		Si	

⁽¹⁾Crecimiento del sector de los fresones

Año	1980	1984	1988	1991	1999	2000	2001
ha	58	1032	2811	2670	5020	5250	4520

Tabla 3.6.– Estimación de la demanda agrícola de agua subterránea para riego en 2001 según datos de la Tabla 3.5.

Cultivo	ha	Dotación 10 ³ m ³ /ha/año	Demanda de agua hm ³ /a	Comentarios
Arroz	1700	11–13	18,7–22,1	Riego agua subterránea
Olivar	4262	2–2,5	8,5–10,7	Similar a otras estaciones
Frutas y hortalizas	5463	6–8	32,8–43,7	Necesita afino
Fresón	4536	4,5–5,5	20,4–24,9	Necesita afino
Frambuesa	545	5–6	2,7–3,3	
Legumbres	396	6–8	2,4–3,2	
			85,5–107,9	

3.7.2.– Demanda de agua para abastecimiento

Las cifras de 1991 utilizadas en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana son válidas en primera aproximación en la actualidad pues solo ha habido un moderado crecimiento de la población estable y del número de visitantes de fin de semana y turísticos. Los cambios más importantes son la llegada de aguas de abastecimiento de origen exterior a la periferia de la Comarca de Doñana. Tales son:

- a) abastecimiento de Pilas, Aznalcázar y Villamanrique de la Condesa, por Aljarafesa, con aguas suministradas por Emasesa (Sevilla)
- b) Mancomunidad de Aguas del Condado, con aguas importadas del embalse del Corumbel para Almonte, Los Bollullos Par del Condado, Bonares, Lucena, Rociana e Hinojos, aunque también existen los pozos de abastecimiento a El Rocío, Hinojos y La Palma, que en 1999 presentaron problemas de fuerte descenso de niveles
- 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 Moguer.

La extracción de agua subterránea para abastecimiento se estima en 6,7 (entre 6 y 7) hm³/año, de los que 2,5 son para Matalascañas.

Se baraja la posibilidad de que el agua del embalse del Corumbel, además de llegar a El Rocío, se prolongue hasta Matalascañas. Los pozos son una garantía de poder mantener el abastecimiento en años secos, como ya lo demuestra la experiencia reciente. Por ello es razonable que se considere la captación de hasta 200 L/s en punta en la margen derecha del Arroyo del Partido.

3.7.3.– Las aguas residuales

Buena parte de las poblaciones de la Comarca de Doñana vierten a los cauces de arroyos locales, con lo que esas aguas se quedan en la misma área. La principal excepción es Matalascañas que por su situación costera vierte al mar y por lo tanto ese agua no está disponible de nuevo salvo para los usos de riego de jardines privados y públicos, y para áreas ecológicas locales.

En el área y su entorno existen o están previstas 12 plantas de tratamiento de aguas residuales, de las que 6 están dentro de la Comarca de Doñana. No se

ha hecho un inventario de esas instalaciones y se ha tomado la información de Giasante (2003), según la Tabla 3.7.

La situación parece poco satisfactoria y necesita actuaciones más decididas y continuadas, con más implicaciones de los Ayuntamientos. Además se complica por la existencia de almazaras y la estacionalidad de su funcionamiento. Por cada 100 kg de aceitunas prensadas se produce 113 kg de alpechin con un DBO de alrededor de 60 kg/m³.

Tabla 3.7.– Estaciones de tratamiento de aguas residuales urbanas (modificado de Giansante, 2003).

Planta	Estado	Comentarios
Azcalcázar (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	219, biocilindros
Bollullos Par del Condado	no ha operado	
Hinojos	Opera	vierte a Cañada de La Mayor
Hinojos	Opera	vierte a Algarbe
Almonte–Rociana	Opera	deficiente
El Rocío	Opera	nueva, de 2002
Matalascañas	Opera	terciario; aplicación a riego de golf

3.8.– Balance hídrico de las aguas subterráneas

La realización con cierto detalle del balance hídrico de las aguas subterráneas de la Comarca de Doñana requiere una modelación numérica que tenga en cuenta los numerosos cambios que se han ido sucediendo en la explotación y 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. Hasta el momento 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 2000 con ocasión del análisis de las consecuencias del accidente de ruptura de la balsa de lodos mineros de Aznalcóllar, que es público y bien documentado (UPC, 1999). Más recientemente el IGME ha venido trabajando en otro modelo, pero no se ha dispuesto de sus datos ni de sus resultados para el presente trabajo. La tesis doctoral de Trick (1998) incluye una modelación parcial del área de El Abalarío y la de Lozano (2004) el sector El Abalarío–Los Cotos, hasta el ecotono Oeste, calibrado con cierto detalle. Pero no existe un modelo general satisfactorio pues hay áreas mal conocidas y difíciles de encajar, como la parte costera bajo la marisma.

No se ha podido volver a utilizar estos modelos para este dictamen–evaluación ya que ello suponía un trabajo adicional importante al requerir nuevos reconocimientos e inventarios, en especial para completar la información en áreas que aún siguen insuficientemente cubiertas o que se han modificado notablemente. El conocimiento de las descargas naturales (arroyos, caños,

áreas de evaporación freática) y artificiales (bombeos) es bastante especulativo en numerosos aspectos.

Por esta razón, y 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. El territorio de la Comarca de Doñana se ha dividido en 15 áreas, más o menos coincidentes con las que la CHGQ utiliza para sus informes piezométricos. Estas áreas se representan en la Figura 3.19 y las correspondientes superficies se dan en la Tabla 3.8, en la cual se indica además la recarga media y donde se realizaba la descarga natural. Para establecer la recarga media multianual se parte de los resultados de los diversos estudios realizados en el área, tomando aquellos que mejor representen a una zona a largo plazo, y en lo posible calibrados por modelación. Algunos de estos valores representativos de la recarga media anual son:

arenas limosas (borde N; Alfarafe)	20 mm/a
arenas fluvio-marinas	90 mm/a
manto eólico	150–170 mm/a

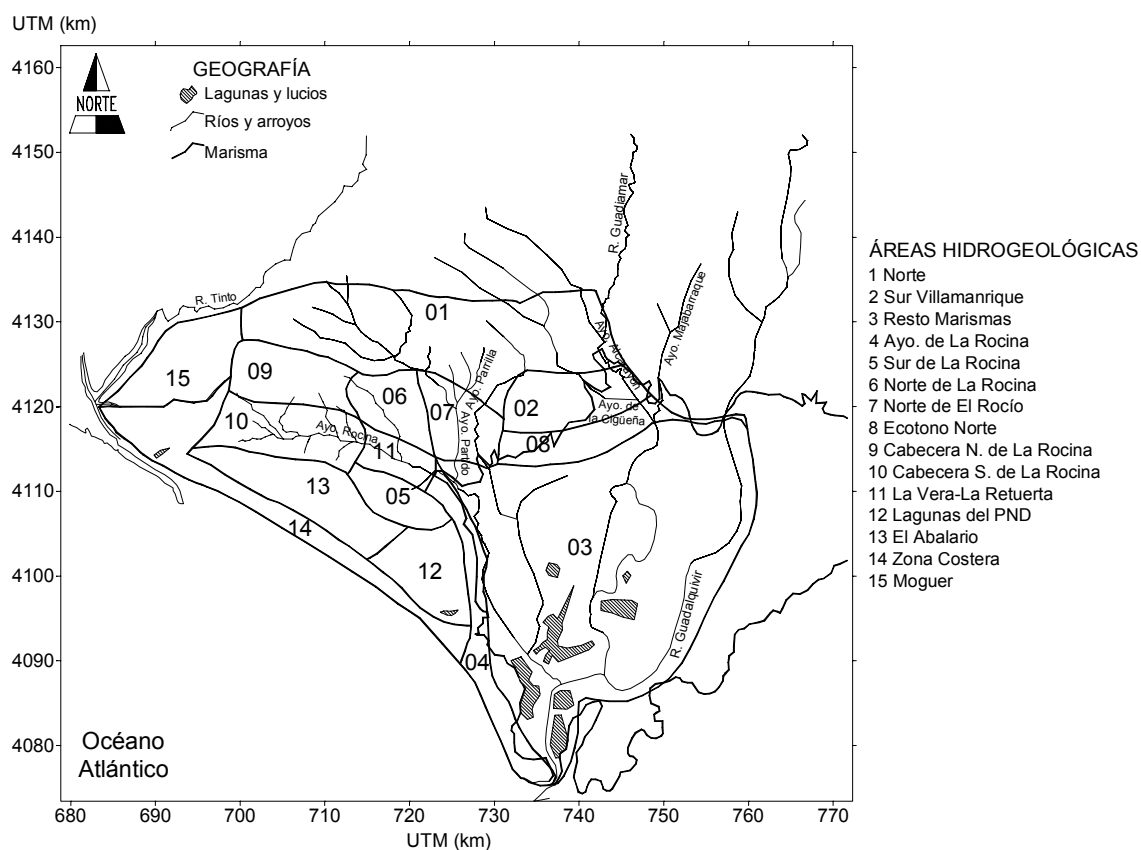


Figura 3.17.— Áreas hidrogeológicas en la Comarca de Doñana.

Para el área de El Abalarío (con manto eólico) se obtienen valores de 150–200 mm/año, y para el área de Los Cotos (al Este de El Abalarío, hasta las lagunas de la Santa Olalla) los valores medios son de 135 a 150 mm/año (Lozano, 2004).

Tabla 3.8.– Recarga media al acuífero por áreas, con indicación de la forma de descarga natural.

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

EF = evapotranspiración freática

R_o = La Rocina

ECO = Ecotono Oeste

ECN = Ecotono Norte

M = mar

RT = río Tinto

AR = arroyos locales

Para la asignación de la tasa de recarga se ha utilizado la descripción de la naturaleza del terreno indicada en la Tabla 3.8. El resultado es que en 2700 km² del área considerada, la recarga media multianual está probablemente entre 158 y 210 hm³/año, aunque la incertidumbre (coeficiente de variación=desviación típica/valor medio) puede valer 0,2 ó 0,3. El Atlas Hidrogeológico de Andalucía indica una recarga media de 213 hm³/a y el modelo UPC (1999) de 172 hm³/a, ambos valores en el intervalo calculado.

En la Tabla la 3.9 se distribuye esa recarga entre las diferentes descargas para el caso de un supuesto estado natural medio del acuífero, es decir sin extracciones de agua subterránea y con la vegetación natural (sin las plantaciones de pinos, y sobre todo de eucaliptos). Según Sousa Martín (2004) el inicio masivo de ambas plantaciones es en 1947. En 1952 había 10.000 ha de eucaliptos, que se quedaron en 5000 ha en 1987 y en buena parte se han erradicado del Parque en el año 2000. En 1965 había 15.000 ha de pinar. 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 (El Partido, 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 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 3.10, que se puede comparar razonablemente con lo indicado en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992). Según el modelo de la UPC (1999) la recarga es de 172 hm³/año, también similar, pero algo menor que los 213 hm³/a del Atlas Hidrogeológico de Andalucía (IGME, 1998).

Tabla 3.9.– Balance medio estacionario del acuífero por áreas en la situación “natural”, es decir, sin extracciones significativas del agua subterránea ni la evaporación freática del bosque plantado.

Área	Balance natural medio, hm ³ /año						
	Recarga	EF	R _o	Arroyos	ECN	ECO	Mar
1 Norte	18–27	4–6	—	10–14	3–5	1–3	—
2 Sur Villamanrique	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

R_o = descarga al arroyo de La Rocina

Arroyos = descarga a otros arroyos del Norte (El 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

Tabla 3.10.– Resultados del balance medio estacionario de los acuíferos de la Comarca de Doñana, en estado natural.

Concepto	hm ³ /año		Comentarios
	hm ³ /año	CIED, 1992	
Recarga	158–210	130–250	en el intervalo
Evapotranspiración freática	18–29	—	ver 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 a ecotono Norte y Marisma	10–15	30–55	similar si se acumula la evapotranspiración freática
Descarga a ecotono Oeste	24–32	25–45	similar
Descarga al mar	43–52	20–50	similar, pero en lado superior

Para el balance medio en condiciones de explotación similar a los actuales hay que hacer un reparto de las extracciones y de los posibles retornos de agua a las diferentes áreas consideradas. Véase la Tabla 3.11. 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. Con los retornos se estima una extracción neta de 81 a 98 hm³/a. Es de notar que las extracciones agrícolas y las extracciones netas 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 ilegales. Algunas estimaciones de organismos oficiales pueden incluso ser superiores a lo indicado. Una parte de lo que en CIED (1992) se atribuía el área de Moguer ahora se atribuye a la cabecera de La Rocina.

Trabajando de forma similar a lo hecho en la Tabla 3.9, se puede preparar la Tabla 3.12. En ella se supone la misma recarga media que en estado natural (en principio aceptable ya que se considera de forma separada la evapotranspiración freática) y el bombeo actual asignado en la Tabla 3.11.

En estos balances no se ha podido considerar en detalle que el área de Palos–Moguer recibe aguas para riego procedente de transvase desde el embalse del Chanza, con lo que el uso de agua subterránea puede que 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 apunta a una situación encabecera de La Rocina menos estrasada. La aportación probable es de 10 hm³/año.

Tabla 3.11.– Asignación de las extracciones de regadío, abastecimiento y ecológicas, y de sus retornos al acuífero, según las distintas áreas.

Área	Asignación territorial 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). (*) Hasta 10 hm³/a en conjunto, importado.

Tabla 3.12.– Balance medio estacionario del acuífero por áreas en la situación actual (2005) de extracciones y recargas.

Área	Balance natural medio, hm ³ /año							
	Recarga	B	EF	R _o	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

R_o = descarga al arroyo de La Rocina

Arroyos = descarga a otros arroyos del Norte (El 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. B es 14–21 y R_o –(5–11)

En la Tabla 3.13 se resumen los resultados para la situación actual de extracciones y con las plantaciones de eucaliptos erradicados 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, pero

no es posible contrastarlo por la falta de aforos suficientes y de observaciones regulares de campo. De nuevo aparece que la red de observación de aguas superficiales es muy insuficiente para establecer el balance hídrico y para la calibración de modelos.

Es muy recomendable para una correcta gestión hacer los balances con detalle a partir de la modelación numérica, con un replanteo cada 2 a 3 años. Pero esto exige una mejora substancial en las redes de observación de cantidad (niveles, caudales superficiales, extracciones).

Tabla 3.13.– Resultados del balance medio estacionario de los acuíferos de la Comarca de Doñana en estado actual de bombeo y con eucaliptos erradicados.

Concepto	hm ³ /año	hm ³ /año CIED, 1992	Comentarios
Recarga	158–210	155–425	Encuadrado
Extracciones	85–98	73–82	Incrementadas
Evapotranspiración freática	7–13	—	Unir a ecotono norte
Descarga a La Rocina	–5 a –3 (507)	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	Incrementada

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 más burda que algunos de los supuestos utilizados en cuanto a extracciones y recargas. 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 conduce a un agotamiento exponencial de los niveles del acuífero, con un periodo (tiempo en reducirse los niveles a la mitad, tomando como referencia el mar) entre 30 y 40 años. Eso quiere decir que existe una notable memoria interanual.

Si el volumen de agua almacenada en el acuífero libre en un momento dado t es V , y es lo que queda de un agotamiento exponencial de reservas cuando cesa la recarga, con un valor inicial V_0 .

$$V = V_0 e^{-\alpha t}$$

en la que α es el coeficiente de agotamiento. Este valor se relaciona con el periodo T (tiempo en reducirse la reserva a la mitad):

$$\alpha = \frac{\ln 2}{T} = \frac{0,693}{T}$$

Durante el agotamiento el caudal de descarga es:

$$Q = -\frac{dV}{dt} = \alpha V_0 e^{-\alpha t} = \alpha V = \frac{0,693}{T} V$$

El valor inicial de Q es $Q_0 = \alpha V_0$ ha de ser igual a la recarga multianual R . El valor V_0 se puede expresar como el producto de la superficie S por el espesor saturado medio H y por la porosidad drenable m (porosidad total menos capacidad de campo):

$$R = \frac{0,693}{T} S \cdot H \cdot m$$

Si σ son las desviaciones típicas de las variables

$$\sigma_R^2 = \sum \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \right)^2 \sigma_{x_i}^2$$

$$\sigma_R^2 = 0,693^2 \left[\left(-\frac{S \cdot m}{T^2} \right)^2 + \sigma_T^2 + \left(\frac{H \cdot m}{T} \right)^2 \sigma_S^2 + \left(\frac{S \cdot m}{T} \right)^2 \sigma_H^2 + \left(\frac{S \cdot H}{T} \right)^2 \sigma_m^2 \right]$$

o bien

$$\frac{\sigma_R^2}{R^2} = 0,6932 \left[\frac{\sigma_T^2}{T^2} + \frac{1}{S^2} \sigma_S^2 + \frac{1}{H^2} \sigma_H^2 + \frac{1}{m^2} \sigma_m^2 \right]$$

Para los siguientes valores probables del acuífero libre de Doñana

Valor	T (años)	S (km ²)	H (m)	M
Mediana	35	1700	35	0,20
σ	5	100	20	0,05

$$R = \frac{0,693}{35} \cdot 1700 \cdot 35 \cdot 0,20 = 236 \text{ hm}^3/\text{a}$$

$$\frac{\sigma_R^2}{R^2} = 0,6932 \left[\frac{5}{35^2} + \frac{1}{1700^2} 100^2 + \frac{1}{35^2} 20^2 + \frac{1}{35^2} 20^2 + \frac{1}{0,20^2} \cdot 0,05^2 \right] = 0,1983$$

$$\sigma_R/R = 0,445 ; \sigma_R = 105 \text{ hm}^3/\text{a}$$

Así pues la incertidumbre es notoria, lo cual es un hecho inherente a la naturaleza de los acuíferos, y en general a la hidrología. Para reducirla, aunque no suprimirla, hay que recurrir a la modelación periódica a partir de un conjunto suficientemente completo de observaciones, lo más precisas posible.

El alto valor de T hace que las evoluciones temporales sean lentas. En realidad las perturbaciones introducidas lo han sido hace un tiempo igual o menor que T, con lo que aún se está lejos de una estabilización. Por eso el balance presentado en explotación, que son valores medios, no se corresponde a la realidad observada ya que las descargas a La Rocina y al ecotono oeste, y los niveles en el área de lagunas, 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 solo puede detenerse con una reducción significativa de las extracciones, según los resultados de una modelación numérica cuidadosa.

3.9.- Conclusiones

El conocimiento del funcionamiento hídrico de la Comarca de Doñana, tanto de las aguas superficiales como subterráneas, permite formular modelos conceptuales del flujo del agua que están bien fundamentados. También lo están los modelos conceptuales de calidad del agua subterránea, aunque aún subsisten dudas y notables incertidumbres en cuanto a los posibles

desplazamientos de los cuerpos de agua salina, y al comportamiento de los contaminantes agrícolas y su posible impacto diferido sobre los habitats. La información actual en cuanto a la contribución atmosférica de sales y solutos y su evolución en el tiempo es aún muy preliminar, y aunque su impacto práctico es pequeño, sí que afecta a los procesos hidrológicos y a su caracterización.

Cuando se entra en el detalle del funcionamiento de las lagunas, arroyos y caños, de especial importancia ecológica, son pocos los estudios de detalle y aún más escasas las observaciones regulares. Y algunos importantes cuerpos lagunares muestran el efecto de extracciones de agua subterránea en áreas relativamente próximas, con lo que su hidropereodo está o puede estar notablemente cambiado.

Cuando se considera el balance hídrico aparecen aún notables incertidumbres, mayores que las que son inherentes a un sistema hidrológico razonablemente bien conocido. Así, en la Marisma es justo ahora cuando se disponen de los primeros datos que permiten ligar cota con volumen y superficie de agua, y aún no se dispone de un método de cálculo contrastado para analizar el efecto del llenado y vaciado, con el impacto del viento y capaz de incorporar las acciones de gestión. Este modelo está en realización.

Cuando se analiza el balance de las aguas subterráneas el primer aspecto de incertidumbre es la propia extracción real, ya que no hay aún un control efectivo y 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 operado cada dos o tres años.

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 la menor descarga a La Rocina y al ecotono oeste (La Vera), y a 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 haya fijado los compromisos a respetar.

La importación de aguas puede solucionar hidráulicamente alguno de los problemas de exceso de bombeo, 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 definidos en cuanto a los excedentes que se produzcan.

3.10.– Referencias bibliográficas

[FLUMEN]: web del Grupo de investigación de Hidrología Superficial de la Universidad Politécnica de Catalunya. <http://www.flumen@upc.edu>

- 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.
- 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.
- 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.
- Coletto, I. (2003). *Funciones hidrológicas y biogeoquímicas de las formaciones palustres hipogénicas de los mantos eólicos de El Abalario–Doñana (Huelva)*. Tesis doctoral, FB, Universidad Autónoma de Madrid.
- 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 Palancar, M. (1995). Las aguas subterráneas en Doñana. *Revista de Obras Públicas*. 142 (3340): 31–53.
- 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.
- Dolz J., Bladé E. y Gili J. (2005). *Modelo numérico de la hidrodinámica de la Marisma*. Publicado en “Doñana, Agua y Biosfera”, pp.149–150. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.
- FD21 (2003). *Bases estratégicas para una agricultura sostenible en Doñana*. Fundación Doñana 21. Sevilla: 1–44.
- 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.
- Iglesias, M. (1999). *Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalario, Doñana, Huelva*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- 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 Abalario), 1018 (El Rocío), 1019 (Los Palacios y Villafranca), 1033 (Palacio de Doñana) y 1034 (Lebrija). IGME, Madrid.

- IGME (1992). *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Colección Informes Aguas Subterráneas y Geotecnia. Ed. IGME. 64 pp + 2 mapas.
- IGME (1998). *Atlas Hidrogeológico de Andalucía*. IGME y Junta de Andalucía.
- IRYDA (1991).
- Konikow, L.F. y Rodriguez, J. (1993). Advection and diffusion in a variable salinity confining layer. *Water Resources Research*. 29(8): 2747–2761.
- Lozano, E. (2004). *Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su relación con las lagunas*. Tesis doctoral, ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Llamas, M.R. (1990). *La importancia de Doñana*. Cauce 2000, Rev. Col. Ing. Caminos. Madrid. 43 pp.
- Manzano, M. (1999). *Los humedales de Doñana y su relación con el agua subterránea*. Ponencia de la 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana (Doñana 2005). Huelva, octubre de 1999. MMA, Madrid.
- Manzano, M. (2001). Clasificación de los humedales de Doñana atendiendo a su funcionamiento hidrológico. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XXIV: 57–75.
- Manzano, M. y Custodio, E. (2004). *Groundwater baseline chemistry in the Doñana aquifer (SW Spain) and geochemical controls*. En: 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*. En: Doñana. Agua y Biosfera. F. García–Novo y C. Marín (eds.). UNESCO, Ministerio de Medio Ambiente y Junta de Andalucía. ISBN: 84–609–6326–8.
- 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. (2002a). 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.; Mediavilla, C. y Montes, C. (2002b). *Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands /SW Spain*. Symposium on Intensive Use of Groundwater. Challenges and Opportunities, SINEX. Instituto Geológico y Minero de España, Generalitat Valenciana y Fundación Marcelino Botín. Abstracts.
- Manzano, M.; Custodio, E.; Mediavilla, C. y Montes, C. (2005). *Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands / SW Spain*. En: Groundwater intensive use. A. Sahuquillo, J. Capilla, L. Martínez–Cortina y X. Sánchez Vila. International Association of Hydrogeologists, Selected Papers on Hydrogeology, 7. Balkema. ISBN: 0 415 36444 2; 209–219.
- MIMAN (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.
- MIMAN (2001). *Proyecto Doñana 2005. Actuaciones nº 5: Recuperación de la funcionalidad del caño del Guadamar. N º6: Restauración del Caño Travieso y N º 7: Recuperación del caño de la Torre. Estudio de acondicionamiento de la montaña del río.* Proyecto Doñana 2005. (CD).
- Montes, C.; Borja, F., Manzano, M. y otros (En prensa). *Inventario y tipificación de los humedales del Manto Eólico Litoral de Doñana.* Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- PAH (2002). *Plan Andaluz de Humedales.* Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla.
- 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.
- Sousa Martín, 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.).
- 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.
- Trick, Th. (1998). *Impacto de las extracciones de agua subterránea en Doñana: aplicación de un modelo numérico con consideración de la variabilidad de la recarga.* Tesis doctoral. ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- Trick, Th. 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 Geominero de España, Madrid: 114 + anex. 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.
- WWF (2001). *Ríos y riberas en torno a Doñana.* Word Wild Fund/Adena. Madrid/Hinojos. 20 pp.
- 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).* En: 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". Int. Geological Correlation.
- 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). *Geogaceta*. 26, 119–122.

Capítulo 4

Gestión de las aguas en la Comarca de Doñana

- 4.1.– Introducción y aspectos generales**
- 4.2.– Gestión de las aguas superficiales fluyentes**
- 4.3.– Gestión de las aguas superficiales de marisma y lagunares**
- 4.4.– Gestión de las aguas subterráneas**
- 4.5.– Participación de usuarios y ciudadanos en la gestión del agua**
- 4.6.– Evolución de los distintos usos del agua en la Comarca de Doñana**
- 4.7.– Referencias bibliográficas**

Capítulo 4.– Gestión de las aguas en la Comarca de Doñana

4.1.– Introducción y aspectos generales

La doble función del agua como base de muchos procesos naturales y como recurso para satisfacer las necesidades humanas supone una competencia y el establecimiento de límites y pautas de comportamiento de acuerdo con principios físicos y químicos y según condicionantes económicos, sociales y políticos. Esto es la gestión del agua.

Gestionar es llevar a cabo un conjunto de actividades conducentes a un fin, aplicando un conjunto de reglas que pueden estar en relación con una Planificación. Es la aplicación del conocimiento para lograr resultados prácticos acordes con unos principios reguladores.

La gestión hídrica es un complejo conjunto de actuaciones multidisciplinares, en las que las Ciencias son solo una parte, y en la que la Sociología juega un papel importante. En un área con grandes valores naturales, como es la Comarca de Doñana, la conservación y protección de la Naturaleza son muy importantes, pero el sujeto final es el propio Hombre como receptor y fin de los beneficios y servicios que se producen.

La gestión hídrica se fundamenta en un conjunto de normas, expresadas en buena parte como leyes y reglamentos que están o deberían estar encuadrados en un conjunto más amplio de gestión territorial y de atención a la sociedad, y se debería llevar a cabo por instituciones con capacidad científica, técnica, legal y económica suficiente, con el adecuado soporte político, y con la efectiva y eficaz participación de los usuarios del agua.

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 solo por ser titular de derechos reconocidos expresamente en la ley, sino por estar afectado de alguna manera o defender intereses reconocibles, tales como los habitats o los seres que de ellos dependen.

En la práctica común la gestión del agua se realiza de forma imperfecta y por órganos o instituciones insuficientes o sesgados. Con ello se toman con cierta frecuencia decisiones o se llevan a cabo actuaciones inapropiadas, y que afectan desproporcionadamente a los intereses e interesados. Es algo inherente a la condición humana, a la incertidumbre asociada a los procesos hidrológicos y al conocimiento y datos 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 reduce la tasa de errores, aunque se actúe despacio y en un contexto que requiere una notable dosis de manejo, discusión y consulta. De otro modo se puede fácilmente caer en equivocaciones por ignorancia, en atropellos por arrogancia y en sesgos por corrupción.

En la Comarca de Doñana son muy numerosas las instituciones que de un modo u otro intervienen en la gestión del agua, lo cual en sí no es malo y

puede ser beneficioso, pero falta una institución de coordinación, no necesariamente con poder ejecutivo directo, pero sí con notable poder moral y eficacia, como ya se indicaba en el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992).

Poco se ha avanzado en ese sentido, y no se esconden las notables dificultades que hay que superar. Pero se han producido algunos notables cambios, apareciendo nuevas instituciones y organismos, y renovaciones de otros. En cualquier caso cabría destacar que los habitantes de Doñana y las instituciones consideran en general que el agua es el factor más importante.

4.2.– Gestión de las aguas superficiales fluyentes

El Proyecto Doñana 2005 contempla como objetivo prioritario el restablecimiento, en la medida de lo posible, de las condiciones hidrológicas naturales. Ello supone que la Marisma incrementará notablemente la conectividad hidráulica con su entorno (ver apartado 3.4.2). Por este motivo se acrecienta la importancia que tiene la correcta gestión del agua en las cuencas vertientes a la Marisma. Evidentemente esta gestión debe contemplar tanto la cantidad como la calidad. Para ello cabe hacer énfasis en los siguientes aspectos:

- La presión antrópica a que están actualmente sometidas las cuencas de La Rocina y del Partido, ya que incide notablemente en la calidad y cantidad de sus aportaciones, las cuales constituyen con diferencia la mayor fuente de agua para la Marisma.
- El abandono de las actividades mineras en la cuenca del Guadiamar, principalmente en la cuenca del río Agrío, lo que aconseja un cuidadoso control de las diferentes actuaciones realizadas en el pasado y que condicionan fuertemente su dinámica fluvial.
- La necesidad de establecer unos criterios que permitan definir un estado ecológico de referencia en la Marisma por lo que se refiere a las necesidades hídricas (cantidad y calidad). Ello sería de gran utilidad en la toma de las decisiones referidas a la gestión del agua que se aporta a la Marisma y también a las actuaciones que pudieran realizarse en ella al objeto de mejorar su dinámica hídrica. No hay un estado natural de referencia en un sistema dinámico que se ha ido modificando, y por ello se ha de decidir, por el procedimiento que se crea más conveniente, cuales son las funciones objetivo a considerar.

4.3.– Gestión de las aguas superficiales de marisma y lagunares

(Aguas lagunares)

Aunque el conjunto de Doñana está considerado como zona de protección en distintos ámbitos y por distintas Directivas internacionales (Convenio Ramsar, Programa MaB y convenio para la protección del patrimonio mundial, natural y cultural de Unesco, Directivas de conservación de las aves silvestres, de conservación de los hábitats naturales y de flora y fauna silvestres y Directiva Marco de Aguas de la Unión Europea,...), el foco de atención está centrado más en la marisma que en las lagunas.

También en el ámbito local la legislación de los parques Nacional (ley 4/1989 del Estado y PRUG, 2004) y Natural de Doñana (ley 2/1989 de la Comunidad Autónoma de Andalucía y PRUG-PORN, 2005) contemplan acciones de protección del conjunto, aunque con menciones especiales a las lagunas como es el caso del control de la carga ganadera en las mismas.

Sin embargo, en la actualidad no se existe un programa específico de gestión de las lagunas de Doñana. Este programa debería estar basado en el Plan Andaluz de Humedales (PAH, 2002), que establece como objetivo último la integridad de la funcionalidad de los humedales andaluces. El PAH establece la siguiente metodología de etapas a seguir para alcanzar este objetivo: 1) caracterizar el funcionamiento de los humedales, 2) establecer tipos o clases funcionales (de acuerdo a la clasificación propuesta en el PAH), 3) seleccionar humedales de referencia que representen a cada uno de los tipos funcionales establecidos y centrar en ellos actividades de observación y estudios a largo plazo que permitan satisfacer las carencias de conocimiento existentes, conocer el estado del sistema en todo momento y generar observaciones de los posibles cambios evolutivos del funcionamiento de los humedales en respuesta a cambios globales o locales, naturales o antrópicos.

Respecto a los humedales de Doñana, es necesario completar la primera de estas etapas. Como se comentó en los apartados 2.4 y 3.5, el conocimiento existente, adquirido en proyectos de investigación, es apreciable pero no completo. Se conocen razonablemente bien los patrones de funcionamiento de los principales tipos de humedales del manto eólico, aunque aún hay algunos con incertidumbres. Se conocen poco los humedales ubicados sobre arenas y limos del sector ubicado al norte de La Rocina y de la marisma. Este conocimiento se debe completar (con observaciones y mediciones durante un tiempo suficiente para observar el comportamiento interanual) para contrastar la clasificación funcional establecida (fase 2) en los trabajos antes mencionados. Llegar a la fase 3 no será difícil, ya que algunos de los humedales más representativos de los distintos grupos funcionales son los más estudiados históricamente.

Las redes de observación permanentes deben centrarse en la evolución de los niveles y superficie de agua en la cubeta, en la relación entre el nivel de agua en el acuífero y en la laguna, en 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 terreno 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 los 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...). La adecuada observación de estos factores requiere usar los siguientes métodos:

- Limnímetros (manuales o automáticos) en las cubetas para conocer la evolución de la profundidad.
- Estudio periódico de fotografía aérea e imágenes satelitales para conocer la evolución de la extensión del cuerpo de agua.

- En el caso de humedales con flujo circulante de agua (arroyos, caños, algaidas), dispositivos de medición de caudales (aforos) entrantes y salientes.
- Cápsulas de succión o lisímetros en la zona no saturada del terreno en torno a la cubeta, para conocer la configuración de los flujos hídricos entre la cubeta y el terreno en la zona no saturada, el papel de la evapotranspiración en el balance de agua del humedal, etc.
- Piezómetros cortos (hasta el nivel freático) en el entorno cercano a las cubetas, para conocer la configuración de los flujos entre la franja freática del terreno y el almacenamiento de agua en la cubeta y su evolución temporal.
- Piezómetros más largos, de distintas longitudes y puntuales (con un solo tramo ranurado) en el entorno más retirado, para conocer la relación del humedal con los flujos profundos y determinar su cuenca subterránea, la influencia de estos flujos en la hidroquímica de la laguna, etc.

Las observaciones de estas redes deben también poder ser usadas para calcular balances de agua y de sales y nutrientes en el humedal, y para observar de forma temprana cambios en dicho balance que puedan inducir un deterioro de la integridad de los humedales. Para ello, todos los dispositivos de medida hidrométrica deben estar adecuadamente diseñados y construidos para poder tomar muestras para análisis químicos. Adicionalmente, será conveniente instalar en la zona algún dispositivo que permita calibrar los cálculos de cuantificación de la evaporación (evaporímetro), así como una estación hidrometeorológica (si no hay ninguna cercana y la variabilidad espacial de la precipitación es relevante).

Las redes de observación han de ser selectivas dado el gran número de humedades, pero deben cubrir suficientemente (aunque con distinta densidad de observación) toda la Comarca de Doñana para asegurar la observación suficiente de todos los posibles cambios de funcionamiento del medio que puedan influir sobre el funcionamiento de los humedales.

4.4.– Gestión de las aguas subterráneas

4.4.1.– Necesidades de gestión

En lo que respecta a las aguas subterráneas, el principal problema de gestión cuantitativo es el de la competencia entre las necesidades de agua de los cultivos de regadío y la conservación de los humedales que se alimentan de esas aguas subterráneas. La demanda hídrica poblacional es de un orden inferior. En el área de Doñana se ha partido de un supuesto erróneo bajo el actual concepto conservacionista, cometido por FAO y el Gobierno Español (esencialmente el IGME y el IRYDA), que es que la extracción de agua subterránea para regar era viable ya que el descenso producido desecaría las áreas de evapotranspiración natural –entonces consideradas inútiles– y ese agua es un recurso disponible permanente. Eso es lo que ha sucedido, con matices, ya que en algunas áreas los recursos asignados no eran sustentables (gran descenso con excesivo encarecimiento de la extracción y caída de la productividad de los pozos).

El cambio de apreciación social que se ha ido produciendo ha llevado a dar valores altos a los bienes y servicios que se derivan de los habitats de Doñana, propiciando así su mantenimiento, conservación y restauración. Esto supone una notable modificación de la óptica y la reconsideración de Planes Oficiales aprobados y de derechos de agua reales o vitales de los colonos establecidos.

La responsabilidad legal última corresponde según la Ley de Aguas a las respectivas Confederaciones Hidrográficas, y para ello han de estar dotadas de instrumentos económicos y legales para actuar. Ni los objetivos ni los medios han estado suficientemente definidos desde el nivel superior de actuación respecto a las Confederaciones Hidrográficas, ni tampoco ha existido una clara voluntad de resolución para no ser impopular, para no ir contra notables intereses creados y bajo un poder que propone actuaciones pero no provee o retira los medios. Con el tiempo las situaciones derivadas se han ido consolidando o consuetudinando, con lo que los cambios y correcciones son cada vez más difíciles y costosas, en un contexto no de buenos y malos sino de intereses que llegan a ser razonables pero contrapuestos ante un recurso limitado y con interferencias, y en un contexto un tanto desdibujado.

Las disposiciones transitorias de Ley de Aguas de 1985 añadieron dificultades importantes al tratamiento legal práctico, que en la realidad han producido un cuadro de complicado tratamiento, que a veces no deja más vía que la expropiación de un derecho cuya existencia legal es dudosa. De ahí que a veces parece que se está ante un callejón sin salida, con estériles enfrentamientos entre Administración y administrados, lo que impide converger hacia acuerdos en asuntos que en el fondo son de interés común a las partes.

En todos estos asuntos la mayoría de los usuarios del agua han estado tradicionalmente del lado contrario a la Administración del agua.

La Confederación Hidrográfica del Guadalquivir está en un proceso de buscar soluciones por la vía de la legalización, pero el problema va más allá de un estricto cumplimiento de la legislación, ya que debe incluir acordar y asumir aquella legislación que permita abordar la problemática real del agua en la Comarca de Doñana, considerando sus peculiaridades, y con el acuerdo mayoritario del conjunto de usuarios.

Así se llega de nuevo a la conveniencia de una institución coordinadora del Agua en Doñana, ampliamente participada y con apoyo político al más alto nivel, capaz de llevar a cabo actuaciones específicas según una normativa específica propia, y basándose en una red de vigilancia y control adecuado.

4.4.2.– Red de gestión

La actual red de vigilancia y control de las aguas subterráneas en Doñana ha de considerarse en sus varias vertientes:

a) De niveles piezométricos

- a1) niveles freáticos, mediante sondeos cortos y con énfasis en los ecotonos, lagunas y áreas de monte negro. La red existente es

razonable aunque sería conveniente una pequeña ampliación en el área de lagunas, y en el área Norte y Noroeste del acuífero. La medida mensual es suficiente.

- a2) niveles piezométricos profundos, mediante sondeos semilargos y largos, con rejilla corta. Su mayor interés hace referencia a las áreas con explotaciones para abastecimiento agrícola, y en especial donde se diferencia un acuífero grosero profundo (El Abalarío). La red existente es buena y en principio suficiente, salvo detalles, y basta con la medida mensual. Es conveniente disponer de por lo menos unas 10 estaciones limnimétricas continuas, que ya existen y en mayor número, varias decenas.
- a3) mantenimiento. La vida de los piezómetros puede ser breve por destrucción y ruptura, y en general pueden acabar colmatados o impermeabilizados en 10 ó 20 años. Eso requiere un programa anual a bienal de reposición que debería explicitarse en el presupuesto del organismo responsable, que en el momento actual son las Confederaciones Hidrográficas en sus respectivas áreas territoriales. También pueden quedar colmatados de arena o lodo, y requerir un proceso de limpieza adecuado (suave y bien diseñado para no provocar el colapsamiento) cada uno a tres años. De igual manera eso debe estar previsto en el presupuesto anual.
- a4) explotación de los resultados. El actual sistema de la CHGQ de tener contratada la informatización de datos y la producción de un informe anual parece adecuado, si bien debería incluir todo el sector Oeste (territorio que pertenecía a la Confederación Hidrográfica del Guadiana). Esa información es asequible sólo mediante petición; no es de acceso público. Se debería difundir mejor dando más fácil acceso a los interesados. Con poco esfuerzo se puede aumentar la utilidad mediante la presentación de tendencias y correlaciones con la precipitación (en parte ya se hace a nivel interno), y la comparación con objetivos, los que pueden ir cambiando a medida que el sistema es mejor conocido y se van consolidando actuaciones.
- a5) operatividad. La gestión de una red de observación es compleja y especializada. Por eso debería responsabilizarse a un único organismo técnico propio (por ejemplo del Consejo de Gestión del Agua que se propone) o concertado, por ejemplo con el Instituto Geológico y Minero de España a través de su Oficina de Proyectos de Sevilla, el cual podría operar los modelos numéricos de simulación y adquirir datos de por sí mediante apoyo de teledetección.

b) De la calidad y composición química

- b1) aspectos generales. El muestreo requiere una metodología adecuada a cada caso, según se trate de un piezómetro o un pozo equipado con bomba. En principio basta con que el muestreo químico ordinario se oriente hacia los componentes principales del agua, con medidas in situ (CE, pH, alcalinidad) y fijación de algunos parámetros (filtrado y acidulación en el caso de metales pesados). Un seguimiento entre semestral y bienal, según los casos, es

suficiente, salvo cuando se aprecie la llegada de un cambio por salinización o retorno de riegos (por ejemplo incremento de los nitratos). No parece que existan protocolos de actuación ni que se disponga de métodos para el muestreo de piezómetros. Podría haberlos para pozos en bombeo, pero no se han encontrado. La sistemática no excluye que se deban continuar investigando ciertos aspectos tales como el transporte de contaminantes agrícolas – principalmente N, P y plaguicidas– y su atenuación y degradación, o la caracterización del flujo de recarga mediante trazado ambiental químico o isotópico. Estas tareas son más adecuadas para ser contratadas o convenidas con Departamentos Universitarios o con el IGME, como lo han sido hasta el presente, pero aportando recursos de origen local en vez de los ocasionales que han procedido predominantemente de fondos estatales o europeos para la investigación. Eso requiere incluir estos conceptos en el presupuesto anual del organismo responsable: CHGQ, CHGN, IAA o, en su caso, en el propuesto Consejo de Gestión del Agua de Doñana.

- b2) aguas de abastecimiento. No queda claro si hay un control periódico y en qué consiste. Es un aspecto a organizar y hacer accesible en la red. Las empresas que gestionan los abastecimientos disponen de algunos datos propios, que los han suministrado ocasionalmente cuando se les ha pedido, pero que en general no son accesibles. Los datos debían elaborarse para explicitar tendencias y fluctuaciones.
- b3) aguas de recarga. El muestreo de la parte superior del nivel freático muestra una primera aproximación de cómo son las aguas de recarga. Se requiere el muestreo de los sondeos freáticos y de los pozos más cortos. No se realiza y solo hay datos ocasionales que corresponden a los estudios de investigación llevados a cabo en el pasado o que están en curso. Debe explicitarse la evolución de la CE, de los nitratos, de los cloruros y de los sulfatos, con control de la relación Na/K y del contenido en fosfatos, y en una fase más avanzada de los plaguicidas y sus metabolitos.
- b4) aguas subterráneas profundas. Salvo por lo que se pueda estar haciendo en pozos de abastecimiento (que no es claro, como se ha dicho) no parece haber un seguimiento de control de los pozos profundos, y menos de los piezómetros, salvo lo que se pueda haber hecho en estudios de investigación. Las campañas de muestreo que realizaba el IARA no han tenido continuidad en los últimos años ya que por acuerdo del grupo de aguas del Patronato de Doñana, en concreto la Estación Biológica de Doñana, no se quiere que haya más de un organismo entrando al parque, para reducir la presión del número de vehículos en las áreas protegidas. Tampoco el IGME mantiene campañas sistemáticas. Aquí se requiere un esfuerzo notable de control, no solo por cumplir con las directrices de la Directiva Marco del Agua, sino para asegurar el conocimiento de los posibles cambios que pueden producirse por introducción de nutrientes de uso humano y agrícola, y de

contaminantes antrópicos. Los resultados deben ser objeto de un informe de síntesis anual de acceso público en la red.

- c) Extracciones y descargas de agua subterránea. Las salidas de agua subterránea son en Doñana una de las mayores incertidumbres, lo que es algo frecuente en sistemas de agua subterránea. La parte de descargas naturales es muy pobremente conocida, y ha sido considerada en el subcapítulo 3.4. También las extracciones por pozos son mal conocidas, a pesar de que en muchos de los pozos agrícolas del Plan Almonte–Marismas se instalaron contadores eléctricos y volumétricos de agua. No se llegaron a medir regularmente, se fueron destruyendo, y los nuevos pozos y los que substituyen a los primeros carecen en general de esos elementos. Con frecuencia las extracciones se evalúan indirectamente a través de la superficie regada y del número de riegos por temporada. En las instalaciones agrícolas de iniciativa privada sucede lo mismo. La situación es mejor, pero no satisfactoria, en los pozos de abastecimiento, si bien los de Matalascañas parecen estar razonablemente controlados por parte de la empresa explotadora.

Una de las claras necesidades de gestión de las extracciones es la clarificación del número de captaciones, su uso y las reglas de explotación, además de un control del volumen extraído, su temporalidad y su calidad. Aquí se tiene una importante actuación aún bastante incompleta y para la que no se cuenta, al parecer, con la suficiente colaboración e implicación de los usuarios. La Administración del agua que tiene la responsabilidad del conocimiento y control carece, y posiblemente seguirá careciendo, de suficiente personal para una vigilancia detallada. De ahí la necesidad de que la labor se comparta con los usuarios en el sentido de que una buena gestión será en beneficio de todos, una vez que las reglas y responsabilidades estén bien definidas y pactadas. Este es otro aspecto con notables deficiencias. El Plan Almonte–Marismas, y los estudios de su época, levantaron expectativas que no son compatibles con la conservación ambiental, y crearon derechos, presuntos derechos y apetencias –abonadas por la falta de actuación administrativa rápida y segura ante transgresiones, ilegalidades y alegalidades– que hoy se han convertido en difíciles de corregir. Para esta tarea la CHGQ (y en su territorio la CHGN) han estado poco preparadas, escasamente motivadas, han carecido de elementos humanos y materiales, y no han dispuesto de soporte suficiente. El actual esfuerzo para enderezar la situación, si bien es positivo y asumido como necesario, parte de notables dificultades.

Sin embargo es urgente clarificar los derechos, establecer los controles e integrar efectivamente a los usuarios en las tareas de observación, vigilancia y gestión.

- d) Aplicación y uso de contaminantes. No es competencia directa de la Administración hídrica el control de la aplicación y uso de contaminantes que supongan un riesgo a las aguas superficiales y subterráneas, y a los habitats, aunque debería haber un mecanismo para influir y fijar objetivos consensuados. La Comarca de Doñana es una situación singular por el hecho de los grandes valores ecológicos que presenta. Por esta razón la Autoridad hídrica que lleva a cabo la gestión, y la que lo lleve en el futuro

con competencias propias o encomendadas, debería poder incorporar también la capacidad de influir en la gestión, uso y aplicación de posibles contaminantes en el territorio. Eso no sólo sería positivo para Doñana, sino que sería un laboratorio para extender los beneficios de la experiencia a otras áreas, en un contexto “integrado”, que es la línea que se está manifestando como más adecuada a la gestión del agua y del territorio.

- e) Usos del agua en el territorio. El uso del agua en el territorio, en especial para el riego agrícola, es cambiante estacionalmente y de un año a otro, en función de qué se va a cultivar, en qué parcela y en qué momento. Estos cambios son conocidos por los Servicios de Extensión Agraria (u otras denominaciones del momento) y las sociedades agrícolas, pero no siempre es fácil recoger la información regularmente ni asegurar que ésta esté contrastada o sea veraz. La teledetección satelital y aerotransportada ofrece una herramienta de gran poder si se emplea correctamente y se calibra. Ha habido diferentes trabajos en ese sentido, pero no una sistemática. Se tuvo solo una cierta sistemática para el estudio de la evolución de la contaminación minera del valle del Guadiamar tras el accidente de ruptura de la balsa de lodos de las minas de Aznalcóllar, realizado por el IGME con vuelos a poca altura de un sensor especial aeroportado del INTA. El IGME ha trabajado en la aplicación de estas técnicas al seguimiento de cultivos, de áreas de vegetación y de cuerpos de agua superficial, y en ese camino está también el CSIC. Estos estudios deberían sistematizarse una vez que la investigación de calibración de la imagen satelital o desde avión se haya completado. No es una tarea elemental que se pueda realizar de forma rutinaria, pero sí es sistematizable y convertible en usos del agua.

4.5.– Participación de los usuarios y ciudadanos en la gestión del agua

En la gestión de las aguas en la Comarca de Doñana interviene un amplio conjunto de instituciones, con mayor o menor influencia y responsabilidad, si bien la Ley de Aguas encarga la superior competencia a las Confederaciones Hidrográficas del Guadalquivir y del Guadiana en sus correspondientes territorios.

Las actuaciones en el ámbito del Parque Nacional de Doñana y las que le puedan afectar han de ser informadas por el Patronato del Parque Nacional de Doñana, en el que están representadas diversas instituciones locales, autonómicas y estatales.

En lo que se refiere al agua para abastecimiento, agricultura y usos públicos la Junta de Andalucía a través del Instituto Andaluz del Agua y los Municipios afectados tienen también su parcela de actuación.

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.

El patronato del Parque Nacional de Doñana no parece 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.

Los dos organismos de cuenca (Confederaciones Hidrográficas) intervinientes son instituciones no oficialmente coordinadas entre sí directamente sino que lo están a través de la Dirección General de Aguas del Ministerio de Medio Ambiente, que por su ámbito territorial está demasiado lejana a la Comarca de Doñana, además de no tener competencias directas o modo de influir las decisiones de gestión en otros ámbitos territoriales que afecten a las aguas, salvo el lento y tortuoso camino de los recursos por la vía contenciosa administrativa o judicial ordinaria al amparo de la Ley de Aguas y de las disposiciones de la Directiva Marco del Agua que ella misma recoge. La situación está próxima a cambiar al pasar el área de la CHGU a la JA y el camino de coordinación puede complicarse aún más a menos que se tomen las medidas correctoras correspondientes.

De ahí que la Comisión Internacional de Expertos de Doñana aconsejase 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, con medios de financiación, y con representación suficiente de los usuarios y ciudadanos. Todo parece indicar que no se ha trabajado en ese sentido y que no existe ninguna voluntad clara de avanzar por ese camino. Sin embargo, y a falta de argumentos en contra o a favor de otra alternativa, sigue apreciándose como una buena solución, que se debería explorar y tratar de llevar adelante.

En este contexto la participación de los usuarios de agua afectados por las actuaciones en la Comarca de Doñana es muy reducida y se limita a la escasa e insuficiente representación en los órganos de gobierno de las Confederaciones Hidrográficas, en un ámbito más general y no específico del área de Doñana, y a través de comunidades de regantes y municipios.

Los usuarios de agua de la Comarca 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 pueden 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 propiedad legal de las captaciones. Las Confederaciones Hidrográficas encuentran así grandes dificultades para la tramitación de expedientes de concesiones, y esos usuarios no tienen más voz que la que les puedan dar los tribunales en base a derechos que se les pueda reconocer, los que no siempre están claros y que en general se reconocen con retraso.

No ha habido intentos de crear Comunidades de Usuarios de Agua Subterráneas (CUAS) dada la general desunión y falta de relación entre los usuarios, además de los problemas legales que tienen buena parte de las

explotaciones. Con ello, al no existir CUAS esta posible vía de representación no ha sido establecida. En la vecina área del Aljarafe, que es el límite NE de la Comarca de Doñana, se constituyó provisionalmente una CUAS a instancias de la CHGQ, a raíz de la declaración provisional de zona sobreexplotada. Pero su funcionamiento real ha sido más bien pobre al haberse creado de arriba abajo, pero sin una demanda y apoyo social claro.

Sigue pareciendo necesario que se creen una o varias CUAS que sean interlocutores válidos en la discusión de cómo realizar la gestión de las aguas en la Comarca de Doñana, y en concreto de las aguas subterráneas. Pero eso requiere un serio e insistente programa previo de formación e información a los usuarios, de forma que sean ellos mismos los que busquen la asociación al ponerse de manifiesto los intereses comunes y las ventajas mutuas. Esto ya se insinuaba en las recomendaciones del Comité Internacional de Expertos (CIED, 1992), pero poco o nada se ha hecho en ese sentido. Sin embargo el grado de conocimiento de los ciudadanos locales sobre la hidrología comarcal y el interés común que de ello se deriva es ahora mejor, y por lo tanto la situación es más favorable.

4.6.- Evolución de los distintos usos del agua en la Comarca de Doñana

En la Comarca de Doñana toda el agua utilizada es actualmente de origen subterráneo, excepto en las áreas de arrozales próximos al Guadalquivir, donde se utiliza agua superficial tomada del río. Se trata de áreas disjuntas, sin que ahora sea posible cambiar los usos. En las áreas próximas al Guadalquivir las aguas subterráneas son salinas o no existe acuífero desarrollado.

El llenado de la Marisma se realiza actualmente principalmente con aportes de escorrentía de los Arroyos tributarios ya que el Guadiamar está desviado hacia el Guadalquivir por el Caño de la Torre y el Guadalquivir está separado de la Marisma por la Montaña del Río (dique a lo largo del mismo) y las compuertas que existen en los Caños de desagüe.

La razón del desvío del Guadiamar está en su pobre calidad del agua por ocupación humana de su valle y en los vertidos de aguas con contaminantes metálicos del área minera de Aznalcóllar. Esta situación ha cambiado notablemente en los últimos años, tras la ruptura de la gran balsa de lodos mineros de Aznalcóllar. Por un lado se ha paralizado la actividad minera y han cesado los vertidos asociados al tratamiento del mineral, aunque persiste cierta contaminación por fugas de los depósitos de la balsa de lodos y escombreras, que son pequeños pero poco conocidos en detalle. Por otro lado la creación del Corredor Verde del Guadiamar ha supuesto el cese de muchas actividades agrícolas sobre la terraza baja del Guadiamar y de las extracciones locales de agua subterránea para regadío, aunque eso no supone la desaparición de la agricultura y del regadío de su valle, y las consiguientes escorrentías desde terrazas más altas.

En la cuenca del Guadiamar queda el embalse del río Agrio, de propiedad privada y que servía a las necesidades locales mineras. Hay que seguir operándolo y manteniéndolo.

También existen vertidos de población y de su industria agroalimentaria, en proceso de ser tratados y depurados, pero aún a nivel incipiente o insuficiente, más los vertidos de los campos de arroz del tramo bajo. Eso hace que el agua tenga cierta carga orgánica y mineral, y que además haya o se tenga riesgo de contaminación residual de metales pesados del área minera o de residuos no bien retirados del lodo que se extendió tras el accidente minero. El agua del Guadiamar necesita aún mejoras antes de ser apta para pasar a inundar de nuevo la Marisma, pero ese es uno de los objetivos del Proyecto Doñana 2005, y se trabaja para conseguirlo (MIMAN, 2001).

Uno de los puntos más difíciles de resolver es la eliminación del riego con agua subterránea de los arrozales del área de los Hatos, ya que es un fuerte consumo concentrado territorialmente en el ecotono Norte. Una alternativa es substituir este agua por agua del embalse del Agrío. Se trataría de verter agua al río, dejarla circular aguas abajo sin grandes pérdidas al existir ahora el Corredor Verde del Guadiamar (el río es actualmente ganador, en general), y su captación en un área próxima a la de los Hatos para ser utilizada allí. El proyecto aún no está bien definido. La viabilidad hidráulica parece razonable, pero existe un problema de calidad del agua fluvial en el lugar de toma y otro en cuanto a qué se hace con los excedentes de agua y drenajes de los arrozales. Su vertido interior a Doñana es problemático por la calidad, y en todo caso debería devolverse al Guadiamar cuando éste no esté en disposición de verter en la Marisma. En cualquier caso se requiere un análisis detallado de las consecuencias a medio y largo plazo, que incluya en detalle los aspectos de calidad.

Las extracciones de agua subterránea en la cabecera de La Rocina suponen una merma de caudales a la misma ya que en buena parte se traspasan fuera de la cuenca y se utilizan para el riego principalmente de fresas. Su substitución por caudales importantes 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.

El abastecimiento o complemento del abastecimiento de Almonte–Rociana y otras poblaciones del área con agua importada del embalse del Corumbel, en la cuenca del Tinto, no es una afección importante siempre y cuando se trate de agua para población, y la parte que se vierta dentro de la Comarca de Doñana esté suficientemente tratada y depurada. Esta solución no es estrictamente necesaria, pero sí puede ayudar en la mejora de la calidad al substituir aguas subterráneas con riesgo de contaminación de nitratos de origen agrícola. Sin embargo, la escasez de caudales estivales trasvasables hace que la solución de aguas subterráneas locales sea por lo menos un apoyo necesario.

4.7.– Conclusiones

La correcta gestión de las aguas subterráneas en la Comarca de Doñana es una necesidad urgente, tanto para las aguas superficiales como para las aguas

subterráneas, en sus aspectos de cantidad y calidad, y con visión integral del ciclo del agua y de sus relaciones con el territorio y su uso. Desde 1991 se ha avanzado en numerosos aspectos, aunque insuficientemente respecto a lo que hubiera sido deseable, en especial en cuanto a control y regulación de los usos del agua y en cuanto a calidad.

La actual administración del agua, que requiere mejorar sus capacidades humanas, económicas y de actuación, difícilmente llegará a lograr la efectividad requerida sin la corresponsabilización y participación activa de los que tienen derechos reales sobre el agua y de los usuarios, incluidos los que representan a los habitats a proteger y conservar, actuando a través de Comunidades de Usuarios, con la adecuada y suficiente representación en los órganos decisorios sobre la Comarca de Doñana.

La gestión supone una red de observación suficiente, bien operada y mantenida, y una elaboración de datos que los haga utilizables para la toma de decisiones. Eso implica disponer de recursos humanos y económicos, los que se podrían valorar entre el 10 y el 20% del beneficio bruto obtenido. Sigue viéndose interesante la creación de una Entidad o Consejo de Gestión del Agua en la Comarca de Doñana, con la denominación que sea más adecuada, con poderes propios y encomendados.

4.8.– Referencias bibliográficas

Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. BOE nº 189, de 9 de agosto de 1985; corrección de errores en BOE nº 243, de 10 de octubre.

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.

MIMAN (2001). *Proyecto Doñana 2005. Actuaciones nº 5: Recuperación de la funcionalidad del caño del Guadiamar. N º6: Restauración del Caño Travieso y N º 7: Recuperación del caño de la Torre. Estudio de acondicionamiento de la montaña del río*. Proyecto Doñana 2005. (CD).

Capítulo 5

Prospectiva de las aguas en Doñana

5.1.– Introducción

5.2.– Evolución y cambio climático

**5.3.– Sustentabilidad de la conservación y del desarrollo social
en relación con los recursos hídricos**

5.4.– Referencias bibliográficas

Capítulo 5.– Prospectiva de las aguas en Doñana

5.1.– Introducción

Con la prospectiva se trata de deducir los rasgos generales de la 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 área de evolución rápida a la escala del siglo y abocada a una transformación continuada y tendente a la colmatación de sedimentos, y que es climáticamente muy sensible. La presión humana, si bien ha sido pequeña en el pasado, en el presente es grande por la proximidad de la gran aglomeración urbana de Sevilla, la actividad del polo 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 de para ser cruzada por vías rápidas de comunicación, que son en buena manera incompatibles con la existencia de una reserva natural. El que no haya habido penetraciones serias hasta el presente es a causa de lo amplio del territorio y la importancia de las dificultades a resolver, pero las técnicas modernas hacen que esas dificultades de paso a través de un ancho estuario y de una amplia zona inundable sean abordables en la actualidad. Y no es raro que determinados sectores sociales promueven esas penetraciones buscando un progreso regional, dejando de un lado o subvalorando los valores naturales.

Por estas razones la prospectiva de Doñana es difícil al ser lugar de choque de intereses diversos e importantes. Si en un momento determinado los intereses se orientan de una determinada forma, pueden dejar resultados que son poco o nada reversibles cuando el equilibrio entre ellos se orienta 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.

5.2.– Evolución y cambio climático

En la Comarca 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 más notable reciente 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 11000 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 Ibérico (Manzano et al., 2001; Vaikmae et al., 2001; Edmunds et al., 2001). Tampoco está definido como ha variado la precipitación. Parece que ha disminuido la intensidad de la sequía estacional, aunque no está claro cuánto a cambiado la pluviometría media anual. Estos cambios llevan consigo una evolución de la vegetación, que es más lenta que el cambio climático, y que afecta a los balances hídricos

Posteriormente al fin de la época glacial se han sucedido épocas más cálidas (lo fueron la romana y el final de medievo) y épocas más frías (inicio del medievo, siglos XVII y XIX) en los que unas agrupaciones vegetales desplazaron a otras, y cada vez con una mayor intervención humana, forzando la eliminación preferente de unas especies vegetales (por ejemplo las maderables) con respecto a otras.

Todo ello tiene una repercusión en la recarga a los acuíferos y en la humedad del suelo, de modo que puede facilitar la fijación de arena eólica o su movilización, y afectando a la distribución de la vegetación (monte blanco frente a monte negro), de una forma aún pobremente conocida.

A largo plazo, las previsiones del balance hídrico y las relaciones entre los cuerpos de agua en Doñana serán probablemente sensibles al cambio climático futuro, al igual que lo ha sido en el pasado, incluso en un pasado no lejano. Esta información previa de lo que ha sucedido es solo moderadamente conocida y está insuficientemente estudiada. Además de la vertiente natural, tiene la vertiente antrópica, ya que el área ha sufrido cambios territoriales significativos desde hace unos 5000 años, y en especial en los últimos 50 años. Estos cambios incluyen la modificación de la cubierta vegetal seminatural por pinar y eucaliptal, y luego la eliminación parcial del eucaliptal en los últimos 10–12 años, la creación de grandes superficies de regadío e incluso un posible efecto –muy poco conocido– de contaminación atmosférica industrial procedente al área de Huelva.

Esos cambios pueden ser conmensurables en cuanto al impacto hídrico con los que prevé el informe 2001 del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC). Según esos estudios, entre 1860 y la actualidad la temperatura media se ha incrementado en 0,6°C. Entre el periodo 1960–1990 y el año 2100 se espera un calentamiento que podría variar entre 1,4 a 5,8°C, aunque los resultados varían mucho según el tipo de escenario y la posible evolución de fondo, la que podría incluso ir hacia un enfriamiento a muy largo plazo.

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 el último medio siglo de hasta el 10%, pero es algo a confirmar ya que los grandes ciclos globales, como el fenómeno El Niño–La Niña, tienen un gran papel en la secuencia pluviométrica. En la hipótesis de un descenso pluviométrico, que irá probablemente acompañado de un aumento de la evapotranspiración, y quizás de la escorrentía superficial de tormenta, no solo el ciclo de llenado–vaciado de la marisma puede quedar afectado sino también la recarga a los acuíferos. Como consecuencia, la prudencia y precaución apunta a tratar de disminuir el estrés hídrico actual para dejar mayor margen de maniobra en la conservación de la Naturaleza, evitando alcanzar grados de compromiso que puedan obligar a duras y difíciles acciones correctoras futuras.

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 dunares, 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 el bosque si hay un sotobosque suficiente. La deforestación facilita una mayor recarga y por lo tanto un ascenso de 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 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 de incremento del nivel del mar de 0,5 a 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 podría alterarse sensiblemente. Aquí juega 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.

Todo ello debe completarse según la “memoria” hidráulica del acuífero. Los modelos matemáticos transitorios indican que el periodo para que desaparezcan los efectos de una perturbación del acuífero libre es del orden 30 a 50 años, o sea inferior a dos generaciones humanas.

Este valor está de acuerdo con la expresión macroscópica de ese tiempo $\tau = \alpha L^2 S / T$, en el que α es un factor geométrico que puede variar entre 1,5 y 2, L es una magnitud lineal que representa el tamaño del acuífero, T es la transmisividad hidráulica y S al coeficiente de almacenamiento. Se pueden tomar como valores regionales $L=2$ a 4 km, $T=100$ a 250 m²/día y S (a largo plazo) =0,25, con lo que resulta $\tau \approx 25$ a 200 años, que comprende el anterior intervalo modelado. Esto se refiere principalmente a las áreas más permeables, como El Abalarío, Los Cotos, y la franja Norte. Para la parte del acuífero de arenas basales, menos permeables (Rociana, Almonte), los valores más razonables son $L=1$ a 2 km, $T=10$ a 20 m²/día, $S=0,20$, con lo que $\tau \approx 20$ a 130 años. Así pues, el acuífero, en sus diversas partes, no guarda memoria del efecto hidráulico de acontecimientos climáticos de periodo largo pero si de los recientes.

Por otro lado el tiempo de renovación, t , del agua se puede calcular como el cociente entre la altura de agua almacenada (espesor saturado, H , por la

porosidad total, m) y la tasa de recarga R. Para El Abalarío es H=60 m, m=0,35, R≈200 mm/año, con lo que t=105 años, y para el área del Norte de El Rocío–Almonte es H=15 m, m=0,30, R=60 mm/año, con lo que t=75 años. Así, la memoria a los cambios químicos e isotópicos ambientales es similar o solo algo mayor que la hidráulica, y solo se conserva recuerdo de los acontecimientos relativamente recientes.

Esos acontecimientos relativamente recientes son la introducción de las plantaciones arbóreas de pinos y eucaliptos hace entre 50 y 75 años, la ocupación territorial agrícola y humana hace entre 30 y 40 años y la supresión de parte de las superficies de eucaliptos hace 10 a 12 años. Por esto, tanto los niveles piezométricos (residualmente) como las características químicas e isotópicas de las aguas subterráneas están en régimen no estacionario.

Probablemente los cambios territoriales continuarán y, por lo tanto, se seguirán produciendo cambios en la recarga y descarga de los acuíferos que afectarán a las aguas subterráneas, y a su través, a las salidas naturales y lagunas, con largas evoluciones transitorias, de modo que a la variabilidad climática se suman estas evoluciones. Se hace necesaria la modelación matemática para poder cuantificar.

Las predicciones de cambio climático futuro en un plazo de 50 años parecen apuntar con cierta confianza a que se producirá un aumento significativo de temperatura, pero sin que quede claro como evolucionará la precipitación ni su régimen, aunque todo parece indicar que dicho régimen se hará más irregular a causa de la elevación térmica. Muchos escenarios posibles apuntan 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, pero no parece haberse realizado en este área, aunque se ha hecho preliminarmente para el área Norte de Mallorca y la Cordillera Costera Catalana (Younger et al., 2002).

Un intento grosero de evaluación se puede intentar a través de las fórmulas empíricas de evapotranspiración real anual de Coutagne y de Turc (véase Custodio y Llamas, 1976, 1986, Sec. 6), transformadas en recarga cuando se supone que es nula la escorrentía superficial.

a.– Fórmula de Coutagne (para escorrentía nula)

$$R = \frac{P^2}{0,8 + 0,14t} \quad \text{con} \quad \frac{1}{8}(0,8 + 0,14t) \leq P \leq \frac{1}{2}(0,8 + 0,14t); \quad P \text{ y } R \text{ en m/a ; } t \text{ en } ^\circ\text{C}$$

$$\frac{dR}{R} = 2 \frac{dP}{P} - \frac{0,14}{0,8 + 0,14t} dt$$

$$\text{Para } t=15^\circ\text{C} \quad \frac{dR}{R} = 2 \frac{dP}{P} - 0,0483dt$$

b.– Fórmula de Turc (para escorrentía nula)

$$R = P[1 - (0,9 + (P/L)^2)^{-1/2}] \quad ; \quad P \text{ y } R \text{ en mm/a ; } t \text{ en } ^\circ\text{C}$$

$$L = 300 + 25t + 0,05t^2$$

$$\frac{dR}{R} = \left[1 + \frac{[0,9 + (P/L)^2]^{-3/2}}{1 - [0,9 + (P/L)^2]^{-1/2}} (P/L)^2 \right] \frac{dP}{P} - \frac{[0,9 + (P/L)^2]^{-3/2}}{[1 - 0,9 + (P/L)^2]^{-1/2}} (P/L)^2 \frac{25 + 0,1t}{L} dt$$

Para $P = 800 \text{ mm/a}$; $t = 15^\circ\text{C}$ $\Rightarrow L = 686,25$

$$\frac{dR}{R} = 2,1946 \quad ; \quad \frac{dP}{P} = 0,0461 dt$$

En la Figuras 5.1 y 5.2 se representa la variación relativa de la pluviometría $\Delta P/P$ en función de la temperatura, tomando como parámetro la variación relativa de la recarga $\Delta R/R$. Para un incremento esperable de 1°C en la temperatura media –si la vegetación no ha cambiado aún– el valor de $\Delta R/R$ es del orden del 50% del valor $\Delta P/P$ en ambos casos, pudiéndose reducir algo la recarga relativa (del orden del 5%) en caso de que no haya variación en la aportación pluviométrica. Pero un análisis más detallado requiere modelación en escenarios bien seleccionados, por ejemplo utilizando el programa BALAN (Samper et al., 1999).

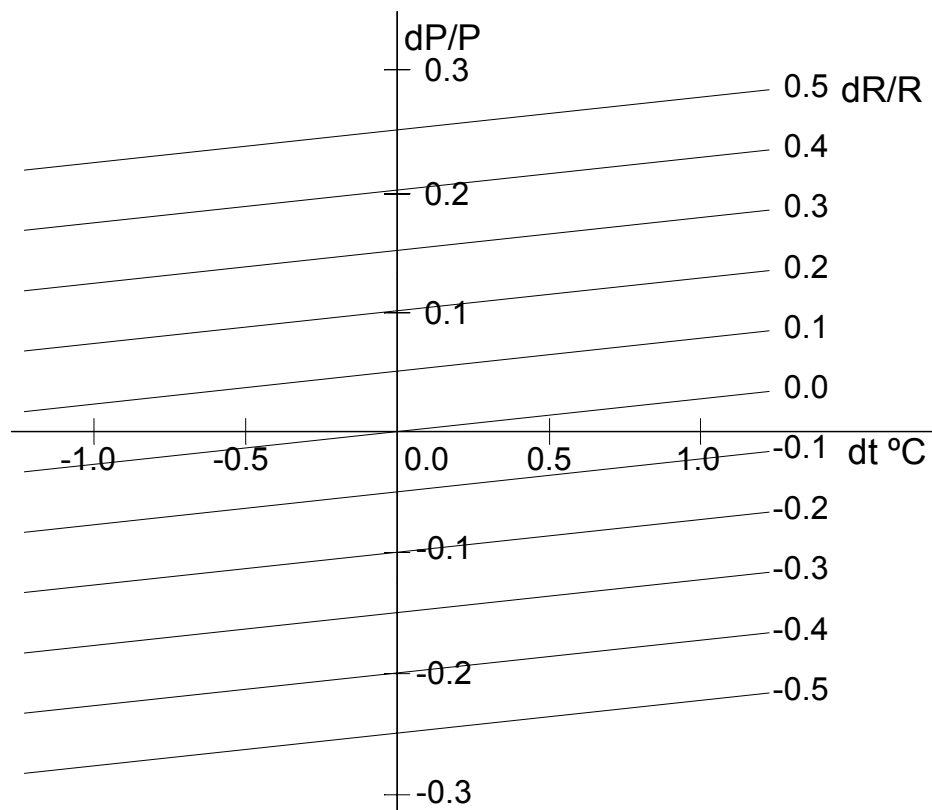


Figura 5.1.– Cambio relativo de la recarga ($\Delta R/R$) para un cierto cambio de temperatura ($\Delta t, ^\circ\text{C}$) y de la precipitación relativa ($\Delta P/P$). Fórmula de Coutagne.

Los resultados se representan en la Figura 5.2.

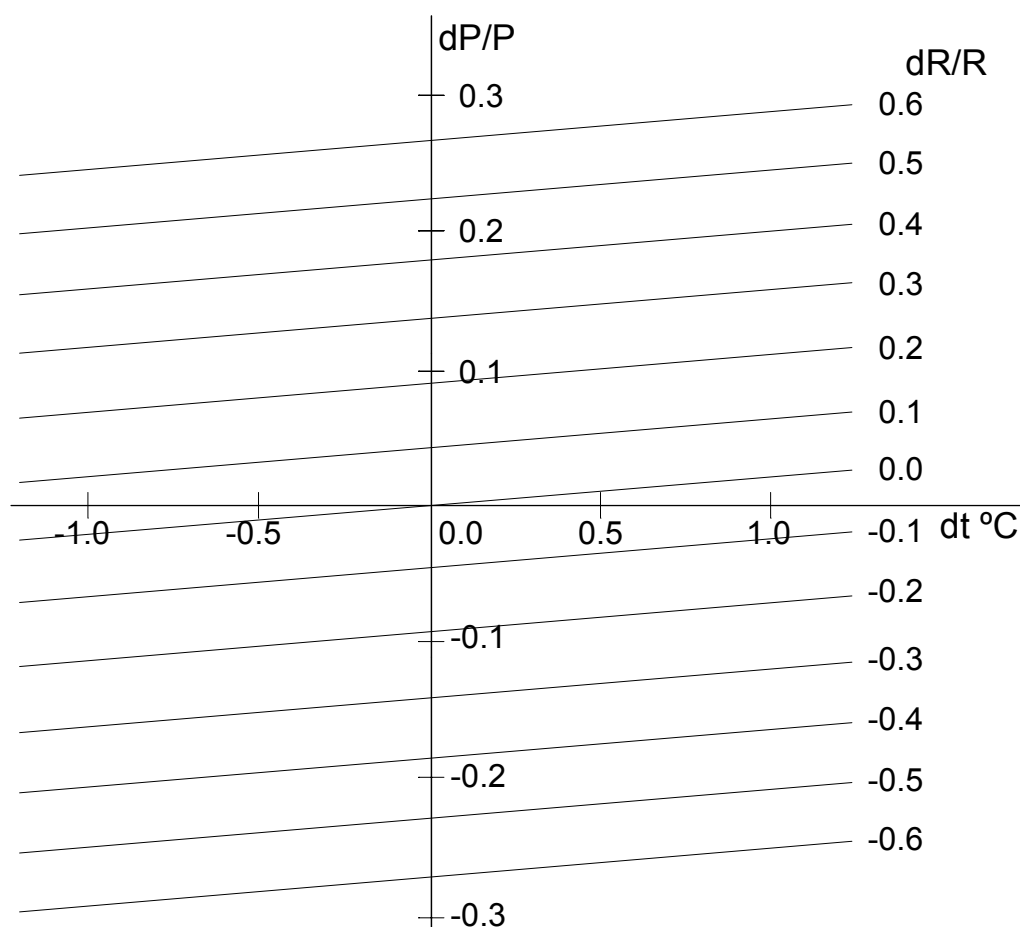


Figura 5.2.– Cambio relativo de la recarga ($\Delta R/R$) para un cierto cambio de temperatura ($\Delta t, ^\circ\text{C}$) y de la precipitación relativa ($\Delta P/P$). Fórmula de Turc.

5.3.– Sustentabilidad de la conservación y el desarrollo social en relación con los recursos hídricos

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 e internacional de conservación. Esto se refiere fundamentalmente a la ocupación arrocera de la Marisma, al plan de regadío de 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 que se puedan calificar de duras en la Marisma, que han modificado de forma importante al régimen hídrico y la distribución de salinidad y composición química, y que ahora se intentan corregir en el Programa Doñana 2005 (MIMAN, 2001).

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

que con frecuencia se ven más las contraposiciones que los intereses comunes.

Así se llega 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 defensa contra los habitantes locales, acercando el Parque Nacional hacia un gran zoológico. Afortunadamente el paso del tiempo ha permitido centrar ideas, buscar acuerdos y sinergias, y actuar más prudentemente, aunque aun queda un 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. Hay pues una competencia por un recurso que, aún no siendo escaso, si se dedica a una actividad no está disponible para otra a medio y largo plazo, y además ello puede comportar cambios notables en la calidad química, también de gran importancia y a lo que en general se le ha prestado menor atención, 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 su contribución permanente a la Marisma; se ha desecado buena parte del ecotono norte, donde ha ido desapareciendo vegetación, que comprende algunas especies tan singulares como el alcornoque, y ha cambiado el régimen y modo de obtener agua de numerosas lagunas.

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, incluyendo la cuenca del Arroyo de La Rocina. Esto hace referencia principalmente a la agricultura de regadío, en especial a la más consumidora de agua, el arroz, en cuanto a cantidad, hasta ahora el aspecto mejor analizado. 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 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.

Los recursos hídricos locales son lo suficientemente importantes como para poder atender sin gran conflicto a las necesidades poblacionales, con tal 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.

La restauración también supone que las aguas residuales de cualquier origen que se encuentren en la Comarca de Doñana, y en especial las que afecten a la Marisma y ecotonos, sean suficientemente depuradas con garantía, y en lo posible con preferencia devueltas al acuífero. En esta línea el progreso ha sido lento.

Existen planes para solucionar parte de los problemas de demanda de agua para riego y poblacional mediante la importación de agua de cuencas exteriores. Tal es la traída de aguas del embalse del Corumbel para abastecimiento de Rociana–Almonte, o la transferencia de agua desde el lado de Huelva (sistema del Chanza–Piedras) o desde el embalse del río Agrío, en la cuenca alta del Guadiamar, para complementar y substituir aguas subterráneas utilizadas en regadío.

La importación de pequeñas cantidades de aguas para solucionar problemas de abastecimiento urbano, cuando la solución local no es razonable bien sea por caudales o por calidad, no es un problema importante, si los vertidos son suficientemente depurados. Otra cosa son los mucho mayores caudales para regadío, que pueden tener un notable impacto no solo por la elevación de niveles y descargas sino por los cambios de calidad del agua que pueden comportar. No se trata solo de cerrar pozos dando agua por otro lado, ya que debe analizarse el problema en su conjunto y evaluar todas las repercusiones. No basta con una simple cirugía hídrica. El problema es más complejo y profundo.

Si no es posible restaurar al completo las descargas por los ecotonos y La Rocina, parece razonable pensar que una meta debería ser que al menos se tenga la mitad de lo que hubiera sido la descarga natural. Esta última afirmación requiere un análisis por parte de los expertos en ecología.

5.4.– Referencias

- [FLUMEN]: web del Grupo de investigación de Hidrología Superficial de la Universidad Politécnica de Catalunya. <http://www.flumen@upc.edu>
- [NAO]: web del Instituto Español de Oceanografía. <http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.html>
- 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.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. Eds (1976; 1983). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 Vols., 1–2350.
- 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.
- Manzano, M., Custodio, E., Loosli, H.H., Cabrera, M.C., Riera, X. y Custodio, J. (2001). Palaeowater in coastal aquifers of Spain. En: *Palaeowaters in Europe: evolution of groundwater since the Pleistocene*. W.M. Edmunds y C. Milne (eds.), Geological Society Special Publication Nº 189: 107–138.
- 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.
- 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.

Younger, P.L., Teutsch, G., Custodio, E., Elliot, T., Manzano, M. y Sauter, M. (2002). Assessments of the sensitivity to climate change of flow and natural water quality in four major carbonate aquifers of Europe. En: *Sustainable groundwater development*. Eds. Hiscock, K.M, Rivett, M.O. y Davison, R.M. Geological Society Special Publication N° 193: 303–323.

Agradecimientos

Para la realización de este informe se ha consultado con diversos organismos y personas, a todos los cuales se agradece su colaboración y disposición. En especial se quiere destacar la contribución de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, con especial agradecimiento a D. Javier Serrano (Comisario de Aguas), a Dra. Marisa Real (Subcomisaria de Aguas, que ha contribuido con unas notas sobre aspectos administrativo–legales), a D. Mariano Palancar y a D. Benigno Bayán. D. Carlos Mediavilla, especialista hidrogeólogo de la Oficina de Proyectos de Sevilla del Instituto Geológico y Minero de España ha sido un importante interlocutor y ha sugerido diversas e importantes observaciones a los borradores de este trabajo. El equipo de trabajo del Dr. Carlos Montes y él mismo, del Departamento de Ecología de la Universidad Autónoma de Madrid, han aportado numerosos datos en elaboración y el apoyo personal. La tarea de mecanografía, montaje y secretaría la ha llevado D. Jordi Sánchez–Vila, del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC. La labor de recolección de datos, preparación de buena parte de la información gráfica y síntesis bibliográfica ha corrido a cargo del Dr. Francisco Alcalá.

Apéndice

Relación de publicaciones y estudios referentes al agua en la Comarca de Doñana o en relación con la misma

A.1.– Introducción

A.2.– Documentos sobre hidrología aplicada en Doñana o en relación con la misma

A.3.– Documentos sobre hidrología aplicada en la cuenca del Guadiamar

A.4.– Cartografía

A.5.– Informes diversos sobre la hidrología de Doñana y su entorno de edición limitada e interna, y sitios web

A.6.– Referencias de leyes y normas

Apéndice.– Relación de publicaciones y estudios referentes al agua en la Comarca de Doñana o en relación con la misma

A.1.– Introducción

A lo largo de más de 25 años de trabajos hidrológicos e hidrogeológicos en Doñana se han ido recopilando documentos publicados de relevancia para el conocimiento científico, técnico y de gestión, que aquí se relacionan. No se trata de un listado exhaustivo, sino de documentos que se consideran de interés directo o indirecto, en especial desde 1991, cuando se elaboró el Dictamen de la Comisión Internacional de Expertos de Doñana (CIED, 1992). Por esta razón muchas publicaciones anteriores a esa fecha no están incluidas, ya que fueron consideradas entonces y están referenciadas en los trabajos que le sirvieron de soporte.

La presentación no es a modo de simple listado alfabético sino que se han clasificado por tipo de contenido en relación a la hidrología de Doñana. Se incluyen en las relaciones algunos sitios de la red (web) que tienen especial importancia como fuentes de información.

A.2.– Documentos sobre hidrología aplicada en Doñana o en relación con la misma

A.2.1.– Tesis doctorales

- 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).
- Coletto, M.C. 2004. *Funciones hidrológicas y biogeoquímicas de las formaciones palustres hidrogénicas de los mantos eólicos de El Abalario-Doñana (Huelva)*. Dep. Interuniversitario de Ecología. Universidad Autónoma de Madrid. Canto Blanco, Madrid. Tesis Doctoral.
- Iglesias, M. 1999. *Caracterización hidrogeoquímica del flujo del agua subterránea en El Abalario, Doñana, Huelva*. Tesis Doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- 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 Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Menanteau, I. 1980. *Les marismas du Guadalquivir. Exemple de transformation d'un paysage alluvial au cours du quaternaire récent*. Tesis Doctoral. Univ. París-Sorbonne. París.
- Muñoz Reinoso, J.C. 1997. *Patrón espacio-temporal del matorral de la reserva biológica de Doñana y sus relaciones con el acuífero Almonte-Marismas*. Dep. de Biología Vegetal y Ecología. Universidad de Sevilla. Tesis Doctoral.
- Olías Álvarez, M. 1995. *Evaluación de la recarga y comportamiento de la zona no saturada en el acuífero Almonte-Marismas (Huelva)*. Tesis Doctoral. Univ. Granada.
- Rodríguez Arévalo, F.J. 1998. *Origen y movimiento del agua intersticial en el acuitardo arcilloso de las marismas del Guadalquivir*. Tesis Doctoral. Facultad CC. Geológicas. UCM. 1-316 + anejos.
- Romero, E. 2000. *Caracterización de las salinidades en el Pre-parque Norte del Parque de Doñana*. Tesis Doctoral. Universidad de Huelva. (edición electrónica, vol 27).
- Sousa Martín, 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.).
- Trick, T. 1998. *Impactos 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.

Vanderlinden, K. 2002. *Análisis de procesos hidrológicos a diferentes escalas espacio-temporales*. Tesis Doctoral. Univ. de Córdoba. 303 pp.

A.2.2.– Tesis de maestría y graduación

- Castro, A. 1999. *Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte–Marismas y su entorno*. Tesis de Máster en Hidrología Subterránea. UPC–FCIHS. 1–134 + anejos.
- 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.
- 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. 177 pp.
- Rodríguez, 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.
- Sacks, L.A. 1989. *Seasonal dynamics of groundwater–lake interactions at Doñana National Park, Spain*. Dep. Environmental Sciences. University of Virginia. M.S. Thesis. 173 pp.
- Sánchez–Juny, M. 1991. *Model de distribució espacial de plujes de disseny: aplicació a l'entorn de Doñana i les seves conques vessants*. E.T.S. Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona. Tesina.
- 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.
- 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. Universidad Complutense de Madrid. 221 pp.

A.2.3.– Artículos en revistas y contribuciones a series

- Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2004. La deposición atmosférica de cloruro al terreno en España. *Bol. Geol. Min.* 115: 319–329.
- Álvarez, A., Elorza, F. J. y Gómez, M. 1992. Cálculo de la evapotranspiración mediante la interpretación de perfiles isotópicos estables. Aplicación en el Parque Nacional de Doñana. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XVII: 367–382.
- Armijo, R., Benkheilil, J., Bousquet, J.C. y Estevez, A. 1977. Les résultats de l'analyse structurale et de la néotectonique de littoraux. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 19(3): 591–605.
- Baldy, P., Boillot, G., Depeuble, P.A., Malod, J., Moita, I., y Mougénot, D. 1977. Carte géologique du plateau continental Sud–Portugais et Sud–Espagnol (Golfe de Cadix). *Bull. Soc. Geol. Fr.* 19(4): 703–724.
- Baluja, G., González, J., Rico, C. y Hernández, L.M. 1985. Sources and transport of organochlorine compounds and heavy metals into waters of the National Park of Doñana. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*. 35: 482–489.
- Bayan, B y Dolz, J. 1995. Las aguas superficiales y la marisma del Parque Nacional. *Revista de Obras Públicas*. Nº 3.340, año 142: 17–29.
- Bonada, N., Prat, N., Munne, A., Rieradevall, M., Alba, J., Álvarez, M., Avilés, J., Casas, J., Jáimez, P., Mellado, A., Moya, G., Pardo, I., Robles, S., Ramón, G., Suárez, M.L., Toro, M., Vidal, M.R. Vivas, S. y Zamora, C. (2004). Criterios para la selección de condiciones de referencia en los ríos mediterráneos. Resultados del proyecto GUADALMED. *Limnetica*. 21(3–4): 99–114.
- Borja, F. y Díaz del Olmo, F. 1987. Complejos húmedos del Abalarío (Entorno de Doñana; Huelva). *Oxyura*. 4 (1): 27–44.
- Borja, F., Zazo, C., Dabrio, C.J., Díaz del Olmo, F., Goy, J.L. y Lario, J. 1999. Holocene aeolian phases and human settlements along the Atlantic coast of southern Spain. *The Holocene*. 9(3): 333–339.
- Cantos, R., Mantecón, R., Tenajas, J. y Palancar, M. 1995. Análisis de la evolución piezométrica en algunos sectores de la Unidad Hidrogeológica Almonte–Marismas: franja costera, zona de La Vera y zona de La Rocina. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. 19: 473–489.

- Cid de Quevedo, V.E. 1983. Regeneración Hídrica del Parque Nacional de Doñana. *Cimbra*. 20 (206): 3–7.
- Corominas, J. 1995. La agricultura en el entorno de Doñana. *Revista de Obras públicas*. Nº 3.340, año 142: 65–74.
- Cota, H., García, F. y Pou, A. 1977. Estudio de las marismas del Parque Nacional de Doñana utilizando imágenes del satélite ERTS–1. *Bol. Est. Centr. Ecol.* 6(12): 29–40.
- Cuevas, J.M. y González, F. 1992. Variación temporal de las superficies cultivadas en regadío en el área del Parque Nacional de Doñana mediante imágenes Landsat MSS. *Investigación Agraria, Producción y Protección Vegetales*. 7(2): 245–252.
- Cuevas, J.M. y González, F. 1993. Análisis mediante una imagen Landsat MSS de la diversidad espacial de los usos del suelo en el Parque Nacional de Doñana (España). *Investigación Agraria, Sistemas y Recursos Forestales*. 2(1): 89–98.
- Cuevas, J.M. y González, F. 1995. Superficie cubierta por el agua en el Parque Nacional de Doñana en un momento de gran inundación, obtenida mediante análisis digital de una imagen Landsat MSS. *Ecología*. 9: 3–8.
- Custodio, E. 1995. Comportamiento y papel de las aguas subterráneas en Doñana: consecuencias de las extracciones. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XX: 281–310.
- Custodio, E. 1995. The impact of vertical water flow in boreholes on monitoring operations. *Hydrogéologie*. 3: 3–12.
- 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 Geológica Hungarica* 43(2): 173–202.
- Custodio, E. 2001. Aguas subterráneas y humedales. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XXIV: 3–30.
- Custodio, E. 2002. Aquifer overexploitation: what does it mean?. *Hydrogeology Journal* 10: 254–277.
- Custodio, E. y Palancar, M. 1995. Las aguas subterráneas en Doñana. *Revista de Obras Públicas*. 142 (3340): 31–53.
- De Castro, F. y Muñoz, J.C. 1997. Model of long–term water–table dynamics at Doñana National Park. *Water Research*. 31(10): 2586–2596.
- De Haro, J.M., Giráldez, J.V., Ordóñez, R., Custodio, E., Iglesias, M., Manzano, M. y López Rodríguez, J.J. 2000. Variación temporal de la recarga al acuífero freático del Parque Natural de Doñana, Huelva. *Bol. Geol. Min.* 111(1): 77–88.
- Fernández Ales, R., Martín, A., Ortega, F. y Ales, E.E. 1992. Recent changes in landscape structure and function in a mediterranean region of SW Spain (1950–1984). *Landscape Ecology*. 7(1): 3–18.
- Fernández, M.A., Hernández, L.M., González, M.J. y Tabera, M.C. 1992. Organochlorinated compounds and selected metals in waters and soils from Doñana National Park. *Water Air and Soil Pollution*. 65: 293–305.
- González Labajo, J., Bolívar, J.P., García Tenorio, R. y Manjón, G. 2001. Radiactividad natural en el acuífero Almonte–Marismas. *Nuclear Española*. 211(b): 94–95.
- González Quesada, R., Cabrera, F., Díaz, E. y Arambarri, P. 1987. La calidad de las aguas del río Guadiamar y de los arroyos de La Rocina y El Partido en las proximidades de Doñana, SW de España. *Limnetica*. 3: 97–102.
- Guimerà, J., Custodio, E. y Candela, L. 1991. Caracterización de la recarga a los acuíferos mediante trazador químico artificial en el Parque Nacional de Doñana (Huelva, España). *Revista de Geofísica*. 47: 135–147.
- Hans, F., Sainz Jiménez, C. y De Leguw, J.W. 1987. Estudio de los sedimentos y la materia particulada de la laguna de Santa Olalla mediante pirólisis analítica. *Limnetica*. 3(2): 291–298.
- Konikow, L.F. y Rodríguez, J. 1993. Advection and diffusion in a variable salinity confining layer. *Water Resources Research*. 29(8): 2747–2761.
- Konikow, L.F. y Tenajas López, J.L., Rodríguez Arevalo, F.J y Llamas, R. 1988. Evolution of groundwater salinity patterns in Doñana National Park, Spain. *Eos*. 69(16): 356–357.
- Konikow, L.F. y Tenajas López, J.L., Rodríguez Arévalo, F.J. y Llamas, R. 1988. Evolution of groundwater salinity pattern in shallow coastal confining aquifer. *Groundwater*. 26(6): 785.
- Llamas, M.R. 1988. Conflicts between wetland conservation and groundwater exploitation: two case histories in Spain. *Environmental Geol Water Science*. 11: 241–251.

- Llamas, M.R. 1989. Consideraciones en relación con el impacto negativo de la extracción de aguas subterráneas en dos importantes ecosistemas españoles. *Tecnología del Agua*. IX(61): 23–34.
- Llamas, M.R. 1990. *Geohydrology of the eolian sands of the Doñana National Park (Spain)*. En: Dunes, European Cost. (Eds. Bakker, Jungerius and Klijn). *Catena Supplement* 18: 145–154.
- López Vilches, L. y Martín, M. 1983. Las aguas subterráneas en el Parque Nacional de Doñana: hidrogeología del sistema acuífero 27: Almonte–Marismas. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. VIII: 575–584.
- López, J.J., y Giráldez, J.V. 1999. Estimación de la recarga mediante un método de balance de agua en un suelo desnudo del parque natural del entorno. *Ingeniería del Agua*. 6(1): 37–48.
- Lucena, C. y García, E. 1978. El modelo matemático del sistema acuífero de Almonte–Marismas. *Bol. Geol. Min.* 89(2): 43–55.
- Mantecón, R., Mediavilla, L., y Martín, M. 1983. Aportación al conocimiento hidrogeológico de la zona de Palos de Moguer (Huelva): sector occidental del sistema acuífero Almonte–Marismas. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. VII: 577–588.
- Manzano, J.S., 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. *Bol. Geol. Min.* 113: 313–330.
- Manzano, M. 2001. Clasificación de los humedales de Doñana atendiendo a su funcionamiento hidrológico. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XXIV: 57–75.
- 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.
- Martín Machuca, M. 1995. Treinta años de investigación hidrogeológica en Doñana. *Revista de Obras Públicas*. nº 3.340. 142: 55–63.
- Martín Machuca, M. y Virgós Soriano, L.I. 1995. Modelo matemático del acuífero de Almonte–Marismas. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XIX: 639–660.
- Mediavilla, C., Martín, M., Cantos, R., Mantecón, R., Coleto, I. y Tenajas, J. 1995. Análisis de la situación hidrodinámica y de la posición de la zona de tránsito agua dulce–agua salada en el extremo oriental de la unidad hidrogeológica Almonte–Marismas. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XIX: 463–471.
- Montes, C., Amat, J.A. y Ramírez Díaz, L. 1982. Ecosistemas acuáticos del Bajo Guadalquivir (S.W. España). II. Variación estacional de los componentes físico–químicos y biológicos de las aguas. *Studia Oecologica*. 3(aparece en 2/1): 159–180.
- Montes, C. y Martín, P. 1989. Los humedales españoles como elementos del paisaje ibérico. *Arbor*. 75–93.
- Moral, F.J., Giráldez, J.V. y Laguna, A.M. 2002. La hidrofobia en los suelos arenosos del Parque Natural de Doñana: caracterización y distribución. *Ingeniería del agua*. 9(1): 37–50.
- Muñoz, J.C. 1995. Influencia del agua freática sobre la vegetación de las áreas de descarga sobre arenas en la Reserva Biológica de Doñana. *Limnetica*. 11(2): 9–16.
- Muñoz, J.C. 1996. Tipología de las descargas sobre arenas de la Reserva Biológica de Doñana. *Limnetica*. 12(2): 53–63.
- Muñoz, J.J., Borrero, A., Goldaracena, J., Gallego, J. B., Garcia, F. y Gómez, G. 2004. Metodología para el diseño hidráulico de la restauración ecológica de la marisma de la Algaída (Sanlúcar de Barrameda, Cádiz). *Ingeniería Civil*. 133: 27–35.
- Nieto, P., Custodio, E. y Manzano, M. 2005. Baseline groundwater quality: a European approach. *Environmental Science and Policy*. Elsevier. 8: 399–409.
- Olías, M., Cruz–San Julián, J., Benavente, A.J. y Almeida, C. 1994. Evolución hidroquímica temporal en algunos puntos de observación en el acuífero Almonte–Marismas. *Bol. Geol. y Min.* 105(4): 362–371.
- Palancar, M. 1995. Doñana algo más que un parque. *Revista de Obras Públicas*. nº 3.340. 142: 7–15.
- Palancar, M., Mantecón, R. y Cantos, R. 1995. Características constructivas de un piezómetro múltiple para control de la contaminación por nitratos en el entorno del Parque Nacional de Doñana. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XIX: 59–67.
- Prieto, I. 1994. La gestión del medio hídrico en el Parque Nacional de Doñana. *Bio*. 2: 4–6.

- Querol, X., Alstuey, A., López-Soler, A. y Plana, F. 2000. Levels and chemistry of atmospheric particulates induced by a spill of heavy metal mining wastes in the Doñana area, Southwest Spain. *Atmospheric Environment*. 34(2): 239–253.
- Rico, M.C., Hernández, L.M., González, M.J., Fernández, M.A. y Montero, M.C. 1987. Organochlorine and metal pollution in aquatic organisms sampled in the Doñana National Park during the period 1983–1986. *Bull. Env. Contamination and Toxicology*. 39(6): 1076–1083.
- Rico, M.C., Hernández, L.M. y González, M.J. 1989. Water contamination by heavy metals (Hg, Cd, Pb, Cu and Zn) in Doñana National Park (Spain). *Bull. Env. Contamination and Toxicology*. 42(4): 582–588.
- Rodríguez, A., Rodríguez, J., Cáceres, L., Clemente, L., Belluomini, G., Manfra, L., Improta, S. y de Andrés, J. R. 1996. Recent coastal evolution of the Doñana National Park (SW Spain). *Quaternary Science Reviews*. 15: 803–809.
- Romero, E., González, A., Reales, R., De la Torre, M. y Grande, J.A. 1995. Modelo predictivo de niveles en el entorno norte de Doñana (Acuífero Almonte–Marismas). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XIX: 729–742.
- Ruiz Celaa, C. 1968. Investigaciones hidrológicas en la cuenca del Guadalquivir. Nota informativa sobre un sondeo en las marismas. *Bol. Geol. Min.* 79(3): 286–289.
- Sacks, L.A., Herman, J.S., Konikow, L.F., Vela, A.L. 1992. Seasonal dynamics of groundwater–lake interactions in 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. y Manzano, M. 2001. Geología del valle del Guadiamar y áreas colindantes. *Bol. Geol. Min.* 112: 57–68.
- Santos, A., Alonso, E., Callejón, M. y Jiménez, J.C. 2002. Heavy metal content and speciation in groundwater of the Guadiamar river basin. *Chemosphere*. 48(3): 279–285.
- Solís, F. y Capilla, M. 2002. Solución aplicada a un problema medioambiental en el entorno de Doñana. Riego de un campo de golf con agua residual regenerada mediante ultrafiltración. *TecnoAmbiente*. 12(123): 13–16.
- Sousa, A. y García, P. 1998. Cambios históricos en el avenamiento superficial y la vegetación del Parque Natural de Doñana (Sector Abalarío), Huelva. *Ería*. 46: 165–182.
- Sousa, A. y García, P. 1999. Historical evolution of the Abalarío lagoon complexes (Doñana National Park, SW Spain). *Limnética*. 16: 85–98.
- Sousa, A. y García Murillo, P. 2002. Méthodologie pour l'étude des effets du petit âge glaciaire dans le parc naturel de Doñana (Huelva, Espagne). Essai de reconstitution des formations palustres et du drainage superficiel. *Publications de l'Association Internationale de Climatologie*. 14: 359–367.
- Sousa, A. y García Murillo, P. 2003. Changes in the wetlands of Andalusia (Doñana National Park, SW Spain) at the end of the little ice age. *Climatic Change*. 58: 193–217.
- 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.
- Trick, T. y Custodio, E. 2004. Hydrodynamic characteristics of the western Doñana Region (area of El Abalarío), Huelva, Spain. *Hidrogeology Journal*. 12:321–335
- Trick, T., Custodio, E. y Manzano, M. 1995. Actualización del modelo hidrogeológico de la zona de El Abalarío (Huelva). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. XIX: 661–677.
- Virgos, L., Martínez Alfaro, P.E., López Vilches, L. y Martín Machuca, M. 1983. Estudio del funcionamiento hidrogeológico del acuífero de Almonte–Marismas (sistema nº 27) mediante un modelo digital bidimensional. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*. IX: 103–124.

A.2.4.– Comunicaciones en reuniones científicas y técnicas, y capítulos de libros

- 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.

- Alcalá, F.J. y Custodio, E. 2005. *Datos preliminares sobre el contenido en cloruro del agua de recarga por la lluvia a los acuíferos españoles*. En: II Seminario Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea: Relación Aguas Superficiales–Aguas Subterráneas (Eds. M. Blarasin, A. Cabrera y E. Matteoda). Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina: 67–75.
- Andreu, E. 2001. *Los humedales en la cuenca mediterránea*. En: 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana–Proyecto Doñana 2005. 27–33
- Baluja, G., Hernández, L.M., González, M.J. y Rico, M.C. 1986. *Dinámica de la contaminación organoclorada (insecticidas y bifenilos policlorados) en el sistema agua/suelo del Parque Nacional de Doñana*. En: Plaguicidas en suelos. Junta de Andalucía. Sevilla. 61–72.
- Bellas, R. y Punter, M. 1986. *Modernos sistemas de riego y su aplicación a la zona regable del Bajo Guadalquivir*. En: II Simposio sobre el Agua en Andalucía. Granada. 1: 79–89.
- Benavente, J., Cruz–San Julián, J., Martínez, J.C., Moral, F. y Olías, M. 1990. *Estudios hidrogeológicos en áreas de protección medioambiental. Algunos ejemplos en espacios naturales de Andalucía*. En: Livro Homenagem a Carlos Romariz, Secção de Geologia Económica e Aplicada. Lisboa: 174–199.
- Borja, C. y Borja, F. 2002 *Contribución a la clasificación genética de humedales de Andalucía: tipos genéticos y complejos palustres*. En: VI Reunión Nacional de Geomorfología. Aportaciones de la Geomorfología de España en el inicio del Tercer Milenio. (Eds. Pérez González, A., Vegas, J. y Machado, M.J.). SEG–IGME. Madrid. Serie Geología. 1: 25–30.
- Borja, F. y Díaz del Olmo, F. 1988. *Propuesta territorial en el entorno de Doñana: los complejos húmedos de El Abalarío (Huelva)*. En: Zonas Húmedas Ibéricas. Diputación Provincial de Valencia. 167–172.
- Borja, F. y Gómez, C. 1993. *Áreas de influencia aluvial en el sector NO de las marismas del Parque Nacional de Doñana 1956–1993*. En: XVI Congreso Geógrafos Españoles. El Territorio y su imagen. 1: 37–45.
- Borja, F. y Díaz del Olmo, F. 1994. *Geomorfología del manto eólico litoral de El Abalarío (Huelva)*. En: Geomorfología en España. Sociedad Española de Geomorfología, Logroño. 327–338.
- Borja, F. y Gómez, C. 2001. *Aluviamientos recientes en el sector NW de las marismas del Parque Nacional de Doñana (1956–1997). Análisis de cuencas vertientes*. En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana–Proyecto Doñana 2005. 215–217.
- Borja, F., Montes del Olmo, C., Morón, M.C. y Barral, A. 1997. *Humedales litorales de la provincia de Huelva. Aportación a su clasificación genética*. En: XV Congreso de Geógrafos Españoles. I: 45–53.
- Bravo, M.A. y Montes, C. (1993). *Inventario de las formaciones palustres del manto eólico del Parque Nacional de Doñana (SW España)*. En: VI Congreso Español de Limnología. Granada. 31–43.
- Casas, J. 2001. *El proyecto Doñana 2005*. En: II Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana. Ponencias y conclusiones. 25–31.
- Clemente, L., Siljestrom, P. y García, L.V. 1988. *Influencia del nivel freático en la evolución de suelos arenosos*. En: International Symposium on Hydrology of Wetlands in Semiarid and Arid Regions. Sevilla. 49–53.
- Coletto Fiaño, I. y Gómez Martos, M. 1992. *El proceso de recarga del acuífero del entorno del Parque Nacional de Doñana. I–Evaporación*. En: V Simposio de Hidrogeología. Alicante. 383–393.
- Coletto Fiaño, I. y Gómez Martos, M. 1992. *El proceso de recarga del acuífero del entorno del Parque Nacional de Doñana. II–Infiltración*. En: V Simposio de Hidrogeología. Alicante. 395–403.
- Corominas, J., Fernández J.A., y López, J.A. 1999. *Experiencia sobre control de las extracciones para uso agrario en el acuífero Almonte–Marismas. Medida y Evaluación de las extracciones de agua subterránea*. En: Jornadas sobre la medida y evaluación de las extracciones de agua subterránea.
- Cruz–San Julián, J. 1991. *Implicaciones ecológicas de la hidrogeología del Parque Natural de Doñana*. En: VI Congreso Español de Limnología. Granada.
- Custodio, E. 1992. *Comportamiento y papel de las aguas subterráneas en Doñana: consecuencias de las extracciones*. En: Cambios sociales y ecológicos en Doñana y su entorno. Univ. Hispanoamericana de La Rábida.

- Custodio, E. 1992. *Hydrogeological functioning of wetlands: current gaps in our knowledge as deduced from Spanish experience*. En: Harvard Workshop: Research agenda for wetlands: a multidisciplinary approach. The Royal Complutense College of Cambridge, Mass. June.
- 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. 1994. *Effect of vertical flows inside monitoring boreholes in coastal areas*. En: 13 Salt–Water Intrusion Meeting. Cagliari. 5–10.
- Custodio, E. 1994. *Posibles procesos de contaminación agrícola de aguas subterráneas en el área de Doñana (Huelva)*. En: Análisis y Evolución de la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Alcalá de Henares. II: 283–308.
- 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. 1996. *Presente y futuro de las técnicas isotópicas ambientales en hidrología subterránea*. En: IV Simposio sobre el Agua en Andalucía. Almería. II: 7–35.
- Custodio, E. 1997. *Evaluación de la recarga por la lluvia mediante métodos ambientales químicos, isotópicos y térmicos*. En: La Evaluación de la recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. AIH–ITGE. 83–109.
- Custodio, E. 1997. *Recarga a los acuíferos: aspectos generales sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre*. En: La evaluación de la recarga a los Acuíferos en la Planificación hidrológica. AIH–ITGE. 19–39.
- Custodio, E. 2001. *Aspectos hidrológicos de los humedales que dependen del agua subterránea*. En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana–Proyecto Doñana 2005. 133–149
- Custodio, E. y Alcalá, F.J. 2003. *El potencial de la relación Cl/Br como indicador el origen de la salinidad de los acuíferos costeros españoles*. En: Tecnología de la intrusión del agua de mar en acuíferos costeros. Países Mediterráneos. I: 401–412.
- Custodio, E., Dolz, J., Guimerà, J., Manzano, M., Poncela, R., Samper, J., Sánchez, M. y Velasco, W. 1992. *Aportaciones al conocimiento hidrológico de los acuíferos del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. En: V Simposio de Hidrogeología. Alicante. 425–438.
- Custodio, E., Iglesias, M., Manzano, M. y Trick, T. 1994. *Saltwater intrusion risk along the western Doñana area coast (southerwestern Spain)*. En: 13 Salt Water Intrusion Meeting. Cagliari. 287–304
- Custodio, E., Oliver, G., Molina, F., y Cobos, J. 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. 43–60.
- Custodio, E., Manzano, M. y Iglesias, M. 1996. *Análisis térmico preliminar de los acuíferos de Doñana*. En: IV Simposio del Agua en Andalucía. Almería. II: 57–87.
- De Haro, J.M., Giráldez, J.V., Ordóñez, R. y del Moral, F. 1996. *Movimiento del agua en el perfil de un suelo de Doñana*. En: XIV Congreso Nacional de Riegos. Aguadulce (Almería). 282–288.
- De la Paz, M., Ortega, T., Gómez Parra, A. y Forja, J.M. 2002. *Variaciones de pCO₂ en aguas superficiales del estuario del río Guadalquivir (SO España)*. En: XI Seminario Ibérico de Química Marina. Libro de resúmenes. Faro. Portugal.
- Delgado, F., Lozano, E., Manzano, M. y Custodio, E. 2001. *Interacción entre las lagunas freáticas de Doñana (SO España) y el acuífero según los iones mayoritarios*. En: Las Caras del Agua Subterránea (Eds. A. Medina y J. Carrera). Serie Hidrogeología y Aguas Subterráneas. I: 111–117.
- Delgado, F., Lozano, E., Manzano, M. y Custodio, E. 2001. *Use of environmental isotopes and chemical tracers to characterise the relationships between phreatic and saline fresh water lakes and the aquifer (Doñana, SW Spain)*. En: III Intern. Conf. Future Groundwater Resources at Risk (Ed. L. Ribeiro), Lisboa: 535–547.
- Díaz del Olmo, F., Márquez, D. y Rubio, J.M. 1981. *Introducción al área litoral y prelitoral del suroeste español (sector Cádiz–Ayamonte)*. En: V Reunión del Grupo Español de Trabajo del Cuaternario. Actas y Guías de Excursiones. 309–343.

- Diz, J., Marquez, F., Fereres, E. y Berengena, J. 1986. *Demanda evapotranspirativa y demanda global de los regadíos*. En: II Simposio sobre el Agua en Andalucía. Granada. I: 103–112.
- Dolz, J. 2001. *Situación y problemática de las cuencas vertientes a Doñana*. En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana–Proyecto Doñana 2005. 219–220.
- Dolz, J. y Sánchez, M. 1999. *Aproximación a la hidrología superficial de las cuencas vertientes a la marisma del Parque Nacional de Doñana. Cuenca del Guadiamar*. En: Seminario internacional sobre corredores ecológicos y restauración de ríos y riberas. Aplicación a la cuenca del río Guadiamar. 42–45.
- Edmunds, W.M., Vaikmae, R., Hinsby, K., Walraevens, K., Appelo, C.A.J., Dever, L., Travi, Y., Custodio, E., Da Silva, M.M. y Loosli, H.H. 1999. *Management of coastal aquifers in Europe*. En: Palaeowaters, natural controls and human influence. EC Fourth Framework Programme (Climatology and natural Hazards). Final Report. BGS Thechnical Report, Hydrogeology Series, WD/99/35/. 1–212.
- Edmunds, W.M., Hinsby, K., Marlin, C., Condesso de Melo, M.T., Manzano, M., Vaikmae, R. y Travi, Y. 2001. *Evolution of groundwater systems at the European coastline*. En: Palaeowaters in coastal Europe: evolution of groundwater since the late pleistocene. Geological Society, London, Special Publications. 189: 289–311.
- Flores, E. y Rodríguez, J. 1994. *Rasgos morfotectónicos del interfluvio costero Guadiana–Guadalquivir (Golfo de Cádiz)*. En: Geomorfología en España. Sociedad Española de Geomorfología. (Eds. J. Arnáez, J.M. García Ruiz y A. Gómez Villar). 13–19.
- Frontana, J. 1986. *Aproximación al estudio de los recursos hídricos procedentes de la precipitación en Andalucía*. En: II Simposio sobre el Agua en Andalucía. Granada. I: 11–22.
- Gili, J.A., Núñez, A., Martín, A., Puig, C., Lantada, N., Buill, F., Lopez, R., Corral, I., González, S. y Ibáñez, S. 2002. *Marco de referencia geodésico para trabajos topográficos e hidrográficos mediante GPS en el Parque Nacional de Doñana (España)*. En: III Asamblea Hispano Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Valencia.
- Gili, J.A., González, J., Puig, C., Lantada, N., Buill, F., Ibáñez, E., Núñez, A. y López, R. 2003. *Perfiles GPS–RTK para el estudio del manto eólico litoral del Parque Nacional de Doñana*. En: V Semana Geomática. Barcelona.
- Giráldez, J.V., Ordóñez, R., de Haro, J. y González, P. 1994. *Estudio sobre la hidrología del Parque Natural del Entorno de Doñana: resultados preliminares*. En: XII Congreso Nacional de Riegos. Pamplona. AERYD: 171–177.
- González, A., Grande J. A., Romero A. M. y Caballero, M. J. 1989. *Características hidrodinámicas e hidroquímicas de la sobreexplotación del acuífero 25 en el sector Lepe–La Antilla–Isla Cristina (Provincia de Huelva)*. En: La sobreexplotación de acuíferos. Almería. 85–101.
- Grande Covián, R. y Bellas Rivera, R. 1960. *The evolution of marshland vegetation in consequence of decreased salinity*. En: VII Int. Cong. Irrigation and Drainage. New Delhi. Questions. 11(2). R. 8: 11741–11754.
- Grande Covián, R. y Losada, A. 1969. *The drainage systems of the Guadalquivir river delta: it's operation maintenance and evolution*. En: VII Int. Cong. Irrigation and Drainage. México. Questions 25(R). 13: 25170–2517.
- Guido, S. 2001. *La participación pública en la gestión de los humedales*. En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana–Proyecto Doñana 2005. 183–199.
- Guimerà, J., Custodio, E. y Candela, L. 1991. *Evaluación de la recarga natural mediante trazador químico artificial en el Parque Nacional de Doñana*. En: III Simposio sobre el Agua en Andalucía. Córdoba. (I): 413–425.
- Gutiérrez, E., Peinado, A., Giraldez, J.V. y Ayuso, J.L. 1986. *La distribución de la lluvia en Andalucía*. En: II Simposio sobre el Agua en Andalucía. Granada. 1: 23–35.
- 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 Abalarío, Doñana, Huelva*. En: 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*. En: 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*. En: I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica. Almería.
- Llamas, M.R. 1984. *Peculiaridades de los sistemas hídricos de las zonas húmedas*. En: Las Zonas húmedas en Andalucía (1984). Monografía de la Dirección General de Medio Ambiente. 189–199.
- Llamas, M.R. 1987. *Conflicts between wetlands conservation and groundwater exploitation*. En: XX International Congress of the International Association of Hydrogeologists. 1: 34.
- Llamas, M.R. 1988. *Deterioration of wetlands caused by groundwater exploitation. Two case histories in Spain*. En: III International Wetlands Conference, Rennes (France) 1: 235.
- Llamas, M.R. 1988. *Difficulties involved in the protection of two Spanish wetlands against the impacts of groundwater exploitation*. En: International Symposium on Hydrology of Wetlands in Semiarids and Arid Regions. 103–106.
- Llamas, M.R. 1988. *The effects of communication barriers in the groundwater resources policy of Spain*. En: International Workshop on Water Awareness in Societal Planning and Decision-Making. 1: 29–31. UNESCO, Skokloster, Sweden.
- Llamas, M.R. 1989. *Consideraciones sobre la relación entre sobreexplotación de acuíferos e impactos ecológicos*. En: Congreso Nacional La Sobreexplotación de Acuíferos. 1: 631–645.
- Llamas, M.R. 1989. *Wetlands and groundwater: new constraints in groundwater management*. En: Groundwater Management. Int. Assoc. Hydrological Sciences, Publ. nº 188: 595–604.
- Llamas, M.R. 1990. *Agua Subterránea y Paisaje: Riesgos de olvidar esta realidad*. En: III Jornadas sobre el Paisaje: Desarrollo y Paisaje. Academia de Historia y Arte de San Quirce. Segovia. 19–32.
- Llamas, M.R. 1991. *Groundwater exploitation and conservation of aquatic ecosystems*. En: IAH–XXIII Congress. Aquifer Overexploitation. Puerto de la Cruz. I: 115–131.
- Llamas, M.R. 1993. *Explotación de aguas subterráneas y conservación de ecosistemas*. En: Las Aguas Subterráneas: Importancia y Perspectivas. 194–213.
- Llamas, M.R. y Yagüe, A. 1984. *Ecological impact of several development projects on the wetlands of the National Park of Doñana*. En: 27 International Geological Congress. Moscow. 7: 454.
- Llamas, M.R., Rodríguez, J., Tenadas, J. y Vela, A. 1987. *El Parque Nacional de Doñana: el medio físico*. En: Seminario sobre Bases Científicas para la Protección de los Humedades de España. Madrid. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 147–172.
- López, J.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*. En: XIII Jornadas Técnicas sobre Riego. Tenerife. 201–208.
- Lozano, E., Delgado, F., Manzano, M. y Custodio, E. 2001. *Interacción entre las lagunas freáticas de Doñana (SO España) y el acuífero según los isótopos ambientales*. En: Las Caras del Agua Subterránea (Eds. A. Medina y J. Carrera). Barcelona. IGME. 379–385.
- Lozano, E., Coletto, C., Manzano, M. y Custodio, E. 2002. *Saline waters in the coastal area of the National Park of Doñana (SW of Spain) in absence of saline water intrusion*. En: 17th Salt Water Intrusion Meeting. Delft. 238–249.
- Lozano, E., Delgado, F., Manzano, M. y Custodio, E. 2002. *Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas y superficiales de La Vera del Parque Nacional de Doñana (SW de España)*. En: Groundwater and Human Development (Eds. Bocanegra, Martínez y Massone). Mar del Plata. 1348–1358.
- Lozano, E., Delgado, F., Manzano, M., Custodio, E. y Coletto, C. 2005. *Hydrochemical characterization of ground and surface water in "the Cotos" area, Doñana National Park, southwestern Spain*. En: Groundwater and Human Development (Eds. E. Bocanegra, M. Hernández, E. Usunoff). International Assoc. Hydrogeologists. Selected Papers no. 6. Balkema. Lisse. 217–231.
- Lucena, C., García, E. 1978. *Modelo matemático de evolución de la calidad de las aguas subterráneas*. SMAGUA. En: III Conferencia Nacional sobre Hidrología General y Aplicada, III Salón Bienal Monográfico del Agua. Zaragoza. 125–131.
- Mantecón, R., Palancar, M., De la Peña, J. y Cantos, R. 1995. *Características de la red de control piezométrica construida por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir en el Parque Nacional de Doñana y su entorno (Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas 05.51)*. En: VI Simposio de Hidrogeología. Sevilla. XXI: 345–358.

- Manzano, M. 2001. *Los humedales de Doñana y su relación con el agua subterránea*. En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana-Proyecto Doñana 2005. 161–167.
- Manzano, M. S. 2002. *El papel de los acuíferos costeros en la gestión del medio natural*. En: Aguas subterráneas y desarrollo humano. XXXII Congreso Internacional de la IAH y VI Congreso de ALHSUD. (Eds. Bocanegra, Martínez, Massone). 403–409.
- Manzano, M. y Custodio, E. 2004. *Groundwater baseline chemistry in the Doñana aquifer (SW Spain) and geochemical controls*. En: IV Assembleia 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. R. García Novo y C. Marín Cabrera). En: Doñana 2005 Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 133–142; 163–164.
- Manzano, M., Custodio, E., Poncela, R. 1991. *Contribución de la hidrogeoquímica al conocimiento de la hidrodinámica de los acuíferos del área de Doñana*. En: III Simposio sobre el Agua en Andalucía. Córdoba. 475–486.
- Manzano, M., Custodio, E., Loosli, H., Cabrera, M.C., Riera, X. y Custodio, J. 2001. *Palaeowater in coastal aquifers of Spain*. En: 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., Custodio, E. y Colomines, M. 2005. *El fondo hidroquímico natural del acuífero de Doñana (SO España)*. En: V Congreso Ibérico de Geoquímica. IX Congreso de Geoquímica de España. Soria. 1–13.
- Manzano, M., Custodio, E., Mediavilla, C. y Montes, C. 2005. *Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands (SW Spain)*. En: Groundwater Intensive Use (Eds. A. Sahuquillo, J. Capilla, L. Martínez-Cortina, X. Sánchez-Vila). IAH. Selected Papers 7. Balkema. Leiden: 209–219.
- Martín Aranda, J. 1972. *Características térmicas e hidrológicas del SW de España en relación al problema de la fertilidad de los suelos*. En: Seminario Internacional de Física de Suelos. Sevilla. 1: 151–176.
- Martín Aranda, J. y Moreno, F. 1984. *Efecto del lavado de sales solubles sobre las propiedades físicas de suelos salinos de las Marismas del Guadalquivir*. En: I Cong. Nac. Cienc. Suelo. Madrid. 1: 1–11.
- Mayoral, E. 1989. *Geología de la depresión inferior del Guadalquivir*. En: El Cuaternario en Andalucía Occidental. (Eds. Díaz del Olmo & J. Rodríguez Vidal). 7–20.
- Mintegui, J.A. 2001. *El futuro de las zonas húmedas: Síntesis de los trabajos de campo realizados en la marisma del Parque Nacional de Doñana (1995–1999), para identificar el estado de sus elementos singulares y analizar la evolución de los mismos: avance de un modelo del terreno*. En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana-Proyecto Doñana 2005. 39–50.
- Mintegui, J.A. y Robredo, J.C. 1999. *Formación del cono de sedimentación de un curso torrencial. Análisis del arroyo del Partido (Huelva)*. En: Libro Homenaje a D. Angel Ramos Fernández. Ed. Real Academia de Ciencias Exactas Físicas y Naturales. Academia de Ingeniería y E.T.S. Ingenieros de Montes. II: 1555–1567.
- Mintegui, J.A. y Robredo, J.C. 2000. *Análisis de la evolución del cono de sedimentación del arroyo del Partido en el entorno del Parque Nacional de Doñana*. En: V Jornadas sobre Encauzamientos Fluviales, sección 4: Acondicionamiento de Torrentes. Flujos hiperconcentrados. CEDEX. Madrid. 12 pp.
- Mintegui, J.A. y Robredo, J.C. 2000. *Sedimentation cone formation in a gentle-slope torrential channel. Analysis of the El Partido stream in the Parque Nacional Doñana area*. En: Quaderni di Idronomia Montana 20, Special Issue Dynamics of Water and Sediments in Mountain Basins (Eds. Lenzi M.A.). Editoriale Bios. 231–245.
- Moral, F. J., Giráldez, J. V. y Laguna, A. 1996. *Movimiento del agua en suelos arenosos: el problema de la repelencia*. En: XIV Congreso Nacional de Riegos. Aguadulce (Almería). 296–303.
- Moral, F.J., Giráldez, J.V., Laguna, A. y Hidalgo, R.E. 1998. *Utilización de la sortividad intrínseca para medir la repelencia al agua de un suelo*. En: I Asamblea Hispano-Portuguesa de Geofísica y Geodesia. Almería.
- Moral, F.J., Hidalgo, R.E., Carvajal, F., Aguilar, F., Agüera, F. y Gutiérrez de Ravé, E. 1998. *Caracterización espacial y temporal del contenido de humedad en un suelo arenoso con*

- distintos métodos de interpolación.* En: Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Málaga.
- Moreira, J.M., Ramos, A., Lobato, A. y Fernández, A. 1989. *Evaluación de superficies cultivadas del fresón mediante imágenes Landsat TM. Su uso en un sistema de pronóstico de cosecha.* En: III Reunión científica de la Asociación española de teledetección. Programa y resúmenes de las comunicaciones. Madrid. 93–103.
- Moreno, L., Pedra, M. y Navarrete, P. 1991. *Redes de control de la calidad química del agua subterránea de Doñana, un caso práctico.* En: III Simposium sobre el Agua en Andalucía. 427–437.
- Moreno, M.T., Antón Pacheco, C. y Gumiel, J.C. 2003. *Evaluación de imágenes DS 1268 ATM y Landsat en el estudio de las variaciones estacionales de las lagunas peridunares de Doñana.* En: X Congreso Nacional de Teledetección. Cáceres 119–122.
- Nieto, J. 2001. *Actividad minera y humedales.* En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana–Proyecto Doñana 2005. 229–230.
- Nieto, P., Custodio, E. y Manzano, M. 2004. *La calidad natural de referencia del agua subterránea en España.* En: Jornadas Luso–Españolas sobre Aguas Subterráneas no Sul da Península Ibérica. Faro. 231–237.
- Olías, M., Cruz–San Julián, J., Benavente, J., Garcia, F. y Muñoz, J.C. 1991. *New data about the Almonte–Marismas aquifer from hydrogeological monitoring (1989–90).* En: XXIII I.A.N. Congress "Aquifer Overexploitation". Puerto de la Cruz. 1:159–162.
- Olías, M., Cruz–San Julián., Benavente, J., Araguás, L. y López, F. 1991. *Investigación isotópica preliminar en la zona no saturada del acuífero Almonte–Marisma.* En: III Simposium sobre agua en Andalucía. 551–562.
- Ordóñez, R, De Haro, J.M. y Giráldez, J.V. 1997. *Estudio de la recarga de los suelos arenosos del entorno de El Abalarío, Parque Natural de Doñana.* En: Procesos en la Investigación en Zona no Saturada. Universidad de Huelva. 117–127.
- Palancar, M. 2000. *Experiencia de instrumentación y control en el acuífero de Doñana.* En: Jornadas técnicas sobre aguas subterráneas y abastecimiento urbano. Madrid. 167–175.
- Palancar, M. 2001. *Aguas subterráneas y humedales.* En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana–Proyecto Doñana 2005. 153–156.
- Palancar, M. y Cantos, R. 1996. *Resultados de la reinterpretación de ensayos de bombeo realizados en sondeos situados en la Unidad Hidrogeológica Almonte–Marismas (05.51).* En: IV Simposio sobre el Agua en Andalucía. Almería. III: 97–114.
- 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).* En: IV Simposio sobre el Agua en Andalucía. Almería. III: 79–85.
- Plata, A., Baonza, E. y Silgado, A. 1983. *Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia.* En: International Symposium on Isotopes in Hidrology in Water resources development. IAEA–SM–270/57. Vienna. 321–340.
- Poncela, R., Manzano, M. y Custodio, E. 1992. *Medidas anómalas de Tritio en el área de Doñana.* En: V Simposio de Hidrogeología. Alicante. 351–365.
- Puig, C., Martínez, J.J., Lantada, N. y Gili, J.A. 2001. *Aplicación de imágenes Lansat a la zona de la marisma de Doñana.* En: IX Congreso Nacional de Teledetección. Medio Ambiente y Cambio Global. 347–351.
- Rodríguez Arévalo, J. y Llamas, M.R. 1986. *Groundwater development and watertable variation in the Doñana National Park (Spain).* En: Memoires Intern. Assoc. Hydrogeologists. 19: 203–211.
- Rodríguez Arévalo, J. y Manzano, M. 1988. *Extracción de la solución intersticial en muestras de terreno poco permeable.* En: Aguas Subterráneas: Instrumentación, medida y toma de muestras. Ed. Prensa Siglo XXI. 357–378.
- Rodríguez, J., Tenajas, J., Vela, A. 1992. *Salinity evolution in the pore waters of the Guadalquivir marsh–lands clayey confining layer.* En: 12Th Salt Water Intrusión Meeting. Barcelona.
- Romero, E. 1994. *Seguimientos de niveles piezométricos en áreas fuertemente explotadas. Piezometría en el Preparque Norte del P. Nacional de Doñana.* En: Impacto sobre el agua de las actividades agrícolas, urbanas e industriales: seguimiento de niveles piezométricos en áreas fuertemente explotadas. Grupo de Hidrogeología y Medio Ambiente, Escuela Politécnica Superior, Univ. de Huelva. 87–110.

- Romero, E. y González, A. 1994. *Estadística aplicada a la predicción de niveles piezométricos en el entorno de Doñana (Acuífero Almonte–Marismas, Huelva)*. En: Congreso Nacional del Agua y Medio Ambiente. Zaragoza. 13.
- Romero, E., Grande, J.A., González, A. y Gil, N. 1994. *Seguimiento piezométrico en áreas fuertemente explotadas. Sectores de riego del entorno de Doñana, Huelva, España*. En: IX Congreso Int. de Minería y Metalurgia. León. 14 pp + figuras y mapa.
- Romero, E., González, A., y Orihuela, D. 1996. *Evolución espacio–temporal de la salinidad de acuíferos en regiones semiáridas. Preparque norte del Parque Nacional de Doñana. Huelva, España*. En: IV Simposio sobre el agua en Andalucía. II: 165–177.
- Romero, E., González, A. y Orihuela, D.L. 2000. *Morfología de la estratificación salina de las aguas subterráneas en dos sectores de riego del plan de transformación agraria Almonte–Marismas (Parque Nacional de Doñana. España)*. En: XVIII Congreso Nacional de Riegos. 54: 55–56. Junta de Andalucía.
- Romero, E., González, A., Garrido, R., Orihuela, D. L., Fidelibus, M. D. y Tulipano, L. 2001. *Procesos de salinización del acuífero Almonte–Marismas en el preparque norte del parque Nacional de Doñana en base al estudio de los iones minoritarios*. En: V Simposio sobre el agua en Andalucía. II: 261–270
- Ruíz Celaá, C. 1971. *Modelo analógico Hele–Shaw para el cálculo de flujo subterráneo de la zona Almonte–Marismas*. En: I Congreso Hispano–Luso Americano de Geología Económica. Tomo I.
- Ruíz, J., Romero, E., y Cerón, J.C. 1998. *El agua y Doñana: perspectivas históricas y futuras*. En: III Encuentro de poetas y escritores de Doñana. Vol. 1.
- Samper, J., Poncela, R., Custodio, E. y García, M.A. 1991. *Estimation of infiltration regange from a combination of meteorological and hydrogeological data*. En: XXIII Congreso A.I.H. "Sobreexplotación de acuíferos". Puerto de la Cruz.
- Sanz, J.J. y Pérez, M.E. 1989. *Clima, aguas y suelos como indicadores del estado de un humedal en el Parque Natural "Entorno de Doñana*. En: Geografía y espacios protegidos: (Coord. B. Valle Buenestado). Federación de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía. 349–377.
- Saura, J. 2001. *Situación y problemática de las cuencas vertientes a Doñana*. En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana–Proyecto Doñana 2005. 207–210.
- Sousa, A., García, P., González, M. y García, L. 2004. *La desaparición de las lagunas del Entorno de Doñana (Huelva, España) y su relación con los cambios climáticos recientes*. En: El Clima entre el Mar y la Montaña Universidad de Cantabria. (Eds. García Codrón et al.). Santander. 715–724.
- Suso, J.M. y Llamas, R. 1989. *Impact of groundwater extraction of wetlands: Doñana National Park (Spain) case*. En: XXVIII International Geological Congress. 3: 198–199.
- Tejedor, L., Tejedor, B., Mañanes, R., Álvarez, O., Reyes, J., Fraguera, B., Aboitiz, A. y Vidal, J.M. 2003. *Características hidrodinámicas y de transporte de sedimento en el estuario del Guadalquivir*. En: Contaminación por metales pesados del estuario del Guadalquivir: efectos del accidente minero de Aznalcóllar sobre el medio físico y los organismos marinos. Servicio de publicaciones de la Universidad de Cádiz.
- Tenajas, J. y Llamas, M.R. 1986. *Aplicación de la teledetección espacial (imágenes Landsat) al estudio de la hidrología superficial de las marismas del Parque Nacional de Doñana (Huelva)*. En: II Simposio sobre el Agua en Andalucía. Granada. II: 555–566.
- Tenajas López, J.L., Herraiz, I. y Vela, A. 1987. *Variaciones observadas en los isótopos ambientales en la Marisma del Parque Nacional de Doñana*. En: II Congreso de Geoquímica. Esp. Soria. 1: 75–78.
- Toja, J. 1985. *Pasado, presente y futuro de la calidad del agua del río Guadalquivir y su dársena*. En: El Río. El Bajo Guadalquivir. Excmo. Ayuntamiento de Sevilla, Delegación de Cultura. Consejería de Obras Públicas y Urbanismo y Consejería de Política Territorial, Junta de Andalucía, Madrid. 161–167.
- Trick, T. y Custodio, E. 1996. *Resultados de una serie de ensayos de bombeo comparado con los resultados de un modelo de flujo en el sector occidental del área de Doñana*. En: IV Simposio sobre el Agua en Andalucía. Almería. I: 329–345.
- Trick, T. y Custodio, E. 1997. *Evaluación de la recarga en El Abalarío (Doñana, Huelva) por modelación estacionaria del flujo del agua subterránea*. En: La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica. IAH–ITGE. 347–355.

- Vaikmäe, R., Edmunds, W.M. y Manzano, M. 2001. *Weichselian palaeoclimate and palaeoenvironment in Europe: background for palaeogroundwater formation*. En: *Palaeowaters in coastal Europe: evolution of groundwater since the late pleistocene*. Geological Society, London, Special Publications, 189: 163–191.
- Vanderlinden, K. y Giráldez, J.V. 1998. *La distribución de la evapotranspiración de referencia en Andalucía*. En: I Asamblea Hispano–Portuguesa de Geofísica. Aguadulce (Almería).
- Vázquez Mora, J., Antón, C., Luque, L.A. y Martín Machuca, M. 2002. *Gestión ambiental de las aguas subterráneas: impacto de la sequía en los acuíferos vinculados a espacios naturales protegidos de Andalucía*. En: XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia.
- Vela, A. y Llamas, M.R. 1986. *Análisis preliminar del flujo de agua subterránea en el sistema de dunas móviles del Parque Nacional de Doñana*. En: II Simposio sobre el Agua en Andalucía. Granada. 447–458.
- Vela, A. y Llamas, M.R. 1986. *Estudio preliminar de la hidrogeología e hidrogeoquímica del sistema de dunas móviles y flecha litoral del Parque Nacional de Doñana*. En: II Simposio sobre el agua en Andalucía. II: 447–458.
- Vela, A., Herraiz, I. y Tenajas, J.L. 1987. *Relaciones isotópicas entre las aguas superficiales y subterráneas en el área peridunar del Parque Nacional de Doñana*. En: II Congreso de Geoquímica Esp. Soria. 1: 79–82.
- Vela, A., Rodríguez, J. y Tenajas, J.L. 1991. *Análisis de los efectos de la explotación del acuífero costero en las proximidades del Parque Nacional de Doñana*. En: XXIII Congreso Int. de la A.I.H. Canarias. I: 179–183.
- Velasco, E., Sánchez, M. y Dolz, J. 1991. *Análisis de la hidrología superficial de las cuencas vertientes a la marisma del coto de Doñana*. En: III Simposio sobre el Agua en Andalucía (SIAGA). Córdoba. I: 243–256.
- Villa, A. 2001. *Agricultura, humedales y conciliación de intereses*. En: I Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana–Proyecto Doñana 2005. 171–172.
- Yagüe, A. y Llamas, M.R. 1984. *Simulación del flujo subterráneo del sistema acuífero del estuario del Guadalquivir en un perfil vertical*. En: I Congreso Esp. Geol. Segovia. IV: 435–451.
- Zazo, C. 1999. *Efectos del cambio climático en áreas del litoral*. En: Efectos del cambio climático en la Región Mediterránea durante los últimos 3000 años. (Eds. B. Ruiz, M. Dorado, M.J. Gil, A. Valeolmillos). Fundación Ramón Areces. Madrid. 76–85.
- Zazo, C., Goy, J.L., Dabrio, J.C., Cavis, J. y Baena, J. 1985. *Paleografía de la desembocadura del Guadalquivir al comienzo del Cuaternario (Provincia de Cádiz, España)*. En: I Reunión del Cuaternario Ibérico. Lisboa. I: 461–472.

A.3.– Documentos sobre hidrología aplicada en la cuenca del Guadiamar

A.3.1.– Artículos en revistas

- Achterberg, E.P., Braungardt, C., Morley, N.H., Elbaz Poulichet, F. y Leblanc, M. 1999. Impact of Los Frailes mine spill on riverine, estuarine and coastal waters in southern Spain. *Water Research*. 33(16): 3387–3394.
- Alcolea, A., Ayora, C., Bernet, O., Bolzicco, J., Carrera, J., Cortina, J.L., Coscera, G., de Pablo, J., Doménech, C., Galache, J., Gibert, O., Knudby, C., Mantecón, R., Manzano, M., Saaltink, M. y Silgado, A. 2001. Barrera geoquímica. *Bol. Geol. Min.* 112: 229–256.
- Aliaga, R., Sahuquillo, A. y Custodio, E. 2004. Estimación de parámetros hidrogeológicos en una formación de baja permeabilidad empleando datos de estación de aforos fluviales. *Bol. Geol. Min.* 115: 331–340.
- Alonso, E., Santos, A., Callejón, M. y Jiménez, J.C. 2004. Speciation as a screening tool for the determination of heavy metal surface water pollution in the Guadiamar river basin. *Chemosphere*. 56: 561–570.
- Alzaga, R., Mesas, A., Ortiz, L. y Bayona, J.M. 1999. Characterization of organic compounds in soil and water affected by pyrite tailing spillage. *The Science of the Total Environment*. 242(1–3): 167–178.
- Anónimo 1997. *Planes hidrológicos y medioambientales con el objetivo de salvar Doñana*. *Medio Ambiente*. 49: 4–5.
- Anónimo 2000. Regulación hídrica de Doñana. *Cauce* nº 50: 77.

- Antón, C., Gumiel, J.C., de Miguel, E., Gómez, J.A., Gutiérrez, O., Rejas, J.G., Arranz, J., López, J.E., Baretino, D., y Giménez, M. 1999. Cartografía del vertido de lodos de minas de Aznalcóllar mediante imágenes Daedalus ATM. *Revista de Teledetección*. 12: 13–19.
- Antón, C., Arranz, J.C., Baretino, D., Carrero, G., Giménez, M., Gómez, J.A., Gumiel, J.C., López Pamo, E., Martín Rubí, J.A., Martínez Pledel, B., de Miguel, E., Moreno, J., Ortiz, G., Rejas, J.G., Silgado, A. y Vázquez, E.M. 2001. Actuaciones para el reconocimiento y retirada de los lodos depositados sobre el terreno, y su restauración edáfica y morfológica. *Bol. Geol. Min.* 112: 93–122.
- Arambarri, P., Cabrera, F. y González Quesada, R. 1996. Quality evaluation of the surface waters entering the Doñana National Park (SW Spain). *The Science of the Total Environment*. 191: 185–196.
- Ayora, C., Bernet, O., Bolzzico, J., Carrera, J., Doménech, C., Cerón, J.C., Fernández, I., Gómez, P., Jaén, M., Mantecón, R., Manzano, M., Martín, M., Mediavilla, C., Moreno, L., Navarrete, P. y Salvany, J.M. 2001. Hidrobiología del Valle del Guadiamar y zonas colindantes. Funcionamiento del sistema acuífero. *Bol. Geol. Min.* 112: 69–92.
- Ayora, C., Guijarro, A., Doménech, C., Fernández, I., Gómez, P., Manzano, M., Mora, A., Moreno, L., Navarrete, P., Sánchez, M. y Serrano, J. 2001. Actuaciones para la corrección y el seguimiento de la contaminación hídrica. *Bol. Geol. Min.* 112: 123–136.
- Ayora, C., Baretino, D., Doménech, C., Fernández, M., López, E., Olivella, S., de Pablo, J. y Saaltink, M.W. 2001. Meteorización de los lodos piríticos de Aznalcóllar. *Bol. Geol. Min.* 112: 137–162.
- Benito, G., Benito, A., Gallart, F., Martín Vide, J.P., Regues, D. y Blade, E. 2001. Hydrological and geomorphological criteria to evaluate the dispersion risk of waste sludge generated by the Aznalcollar mine spill (SW Spain). *Environmental Geology*. 40(4–5): 417–428.
- Bernet, O., Bolzicco, J., Carrera, J., Castro, A., Jaén, M., Padilla, F., Salvany, J.M., Vázquez Suñé, E., y Vázquez, M. 2001. Modelación numérica de los acuíferos potencialmente afectados por la rotura de la balsa de Aznalcóllar. *Bol. Geol. Min.* 112: 199–228.
- Blasco, J., Arias, A.M. y Sáenz, V. 1999. Heavy metals in organisms of the River Guadalquivir estuary: possible incidence of the Aznalcóllar disaster. *The Science of the Total Environment*. 242(1–3): 249–259.
- Borja, F., López Geta, M., Martín, M., Mantecón, R., Mediavilla, C., Palancar, M. y Vives, R. 2001. Marco geográfico, geológico e hidrológico regional de la cuenca del Guadiamar. *Bol. Geol. Min.* 112: 13–34.
- Cabrera, F., Toca, C.G., Díaz, E. y Arambarri, P. 1984. Acid mine–water and agricultural pollution in a river skirting the Doñana National Park (Guadiamar river, South–west Spain). *Water Reseach*. 18(12): 1469–1482.
- Cabrera, F., Soldevilla, M., Cordon, R. y Arambarri, P. 1987. Heavy metal pollution in the Guadimar river and the Guadalquivir estuary. *Chemosphere*. 16: 463–468.
- Cerón, J.C. y Olias, M., 2005. *Contribución al conocimiento hidrogeoquímico del acuífero del Guadiamar (SW de España)*. Libro Homenaje al Profesor D. Rafael Fernández Rubio, IGME, Madrid: 281–293.
- Clemente, L., García, L–V., Espinar, J.L., Cara, J.S. y Moreno, A. 2004. Las marismas del Parque Nacional de Doñana. *Investigación y Ciencia*, mayo 2004: 72–83.
- Dabrio, C.J., Borja, F., Zazo, C., Boersma, J.R., Lario, J., Goy, J.L. y Pol, M.D. 1996. Dunas eólicas y facies asociadas pleistocenas y holocenas en el acantilado del Asperillo (Huelva). *Geogaceta*, 20(5): 1089–1092.
- García Murillo, P. y Sousa Martín, A. 1999. El paisaje vegetal de la zona Oeste del Parque Natural de Doñana (Huelva). *Lagascalia* (1): 111–132.
- Gómez de las Heras, J., López Geta, J.A., Mediavilla, C., Sahuquillo, A. y Custodio, E. 2001. Comportamiento hidráulico y modelación hidrogeológica de las formaciones paleozoicas y miocenas de la cuenca del río Guadiamar. Las Aguas y los Suelos tras el Accidente de Aznalcóllar. *Bol. Geol. Min.* 112: 257–282.
- Gómez de las Heras, J., Gumiel, P., Grima, J. y Custodio, E. 2001. Contribuciones al estudio de la rotura de la basa de lodos de Aznalcóllar. Las Aguas y los Suelos tras el Accidente de Aznalcóllar. *Bol. Geol. Min.* 112: 283–294.
- Gonzalo, Y. y Tarín, J. 1878. Reseña geológica de la provincia de Huelva. *Bol. Com. Map. Geol. Esp.* 5: 1–138.
- Gonzalo, Y. y Tarín, J. 1886. Descripción física, geológica y minera de la provincia de Huelva. I: Descripción física. *Memorias de la Comisión del Mapa Geológico de España*, 1(1): 1–274. IGME, Ministerio de Industria y Energía. Madrid.

- Llamas, M.R. 1990. La importancia de Doñana. *Cauce* 2000. Madrid. 43 pp.
- Lobo, F.J., Hernández-Molina, F.J., Somoza, L. y Díaz del Río, V. 2001. The sedimentary second of the post-glacial transgression on the Gulf of Cadiz continental shelf (South West Spain). *Marine Geology*, 178: 171–195.
- Maldonado, A., Somoza, L. y Pallarés, L. 1999. The Betic origin and the Iberian–African boundary in the Gulf of Cadiz: geological evolution (Central North Atlantic). *Marine Geology*, 155: 9–43.
- Mantecon, R., Palancar, M., de la Peña, J. y Cantos, R. 1995. Características de la red de control piezométrica construida por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir en el Parque Nacional de Doñana y su Entorno (Universidad Hidrogeológica Almonte–Marismas 09.51). *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XXI Madrid: 345–358.
- Manzano, M., Ayora, C., Doménech, C., Navarrete, P., Garralón, A. y Turrero, M.J. 1999. The impact of the Aznalcóllar mine tailing spill on groundwater. *The Science of the Total Environment*. 242(1–3): 189–209.
- Manzano, M., Custodio, E., Ayora, C. y Navarrete, P. 2000. Contamination of the Guadiamar river aquifer after the Aznalcóllar mine accident, SW Spain. *Bol. Geol. y Min.* 111(6): 93–106.
- Manzano, M., Custodio, E., Ayora, C. y Navarrete, P. 2001. Contaminantion of the Guadiamar river aquifer after the Aznalcóllar mine accident, SW Spain. *Bol. Geol. y Min.* Madrid. 111(6): 93–106.
- 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 Universidad de Murcia*. XXXVIII (1–4): 209–304.
- Muñoz Reinoso, J.C. 2001. Sequential pattern in the stabilized dunes of Doñana Biological Reserve (SW Spain). *J. Coastal Research*, 17(1): 80–84.
- Muñoz Reinoso, J.C. 2001 Vegetation changes and groundwater abstraction in SW Doñana, Spain. *J. Hydrology*. 242: 197–209.
- Plans, M. y Prat, N. 2002. Ecotoxicidad del agua de los ríos afectados por el vertido minero de Aznalcóllar evaluada mediante los macroinvertebrados *Chironomus riparius* y *Ephoron virgo*. *Alquibla*. 35: 6–7.
- Querol, X., Alastuey, A., López Soler, A., Plana, F., Mesas, A., Ortiz, L., Alzaga, R., Bayona, J.M. y De la Rosa, J. 1999. Physico-chemical characterisation of atmospheric aerosols in a rural area affected by the Aznalcóllar toxic spill, south-west Spain, during the soil reclamation activities. *The Science of the Total Environment*. 242(1–3): 89–104.
- Rodríguez-Ramírez, A., Rodríguez-Vidal, J., Cáceres, L., Clemente, L., Cantano, M., Bellouomini, G., Manfra, L. y Improta, S. 1997. Evolución de la costa atlántica onubense (SO España) desde el máximo frandiense a la actualidad. *Bol. Geol. Minero*. Madrid, 108(4–5): 137–147.
- Romero Macias, E. y González Martínez, A. 1994. Estadística aplicada a la predicción de niveles piezométricos en el entorno de Doñana (acuífero Almonte–Marisma, Huelva). *Agua y Medio Ambiente*, Zaragoza: 206–212.
- Salvany, J.M. 2004. Tilting neotectonics of the Guadiamar drainage basin, SW Spain. *Earth Surface Processes and Landforms* 29: 145–160.
- Salvany, J.M., Carrera, J., Bolzicco, J., Mediavilla, C. 2004. Pitfalls in the geological characterization of alluvial deposits: site investigation for reactive barrier installation at Aznalcóllar, Spain. *Quarterly J. of Engineering Geology and Hydrogeology*. London. 37: 141–154.
- Santos, A., Alonso, E., Callejón, M. y Jiménez, J.C. 2002. Distribution of Zn, Cd, Pb and Cu metals in groundwater of the Guadiamar River Basin. *Water Air and Soil Pollution*. 134(1–4): 275–286.
- San Miguel de la Cámara, M. 1913. Las costas de la provincia de Huelva y sus variaciones en el período histórico. *Bol. Real Soc. Esp. Hist. Nat.*, XIII: 434–468.
- Sousa, A. y García Murillo. P. 2001. Can place names be used as indicators of landscape changes?. Application to the Doñana Natural Park (Spain). *Landscape Ecology* 16: 391–406.
- Zazo, C. 1999. Interglacial sea levels. *Quaternary Internacional*, 55: 101–113.
- Zazo, C.; Goy, J.L. y Silva, P.G. 1996. Litoral zone and rapid climatic changes during the last 20,000 years. The Iberia study case. *Z. Geomorph. N.F.*, Suppl. –Bd. 10(2): 119–134.

- 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, J. 1999. The record of the latter glacial and interglacial periods in the Guadalquivir marshlands (Mari López drilling, SW Spain). *Geogaceta* 26: 119–122.
- Zazo, C.; Mercier, M.; Silva, P.G.; Dabrio, C.J.; Goy, J.L.; Roquero, E.; Soler, V.; Borja, F.; Lario, J.; Polo, D. y de Luque, L. 2005. Landscape evolution and geodynamic controls in the Gulf of Cadiz (Huelva coast, SW Spain) during the late Quaternary. *Geomorphology* 68(2005): 269–290.

A.3.2.– Comunicaciones en reuniones científicas y técnicas, y capítulos de libros

- Aliaga, R., Sahuquillo, A. y Custodio, E. 2005. *Análisis de las oscilaciones piezométricas producidas por la recarga de un río efímero*. En: II Seminario Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea: Relación Aguas Superficiales–Aguas Subterráneas (Eds. M. Blarasin, A. Cabrera y E. Matteoda). Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina: 213–221.
- Alzaga, R. y Bayona, J.M. 1998. *Análisis de mercurio (Hg²⁺) y metilmercurio (CH₃Hg⁺) posterior al tratamiento fisicoquímico de las aguas superficiales contaminadas por las aguas residuales de las minas de Aznalcóllar*. Dpto. de Química Ambiental. Centro de Investigación y desarrollo–CSIC. Segundo informe técnico. No publicado.
- Arambarri, P., Cabrera, F., Toca, C.G., Díaz, E. y Almorza, J. 1981. *La contaminación en la zona minera y en la zona agrícola del río Guadiamar*. En: I Simposio sobre el Agua en Andalucía. 2: 817–832.
- Arambarri, P., Cabrera, F., Toca, C.G. y Almorza, G. 1983. *Estudio de la contaminación del río Guadiamar por métodos de ordenación*. En: V Congreso Nacional de Química. Química y Tecnología del Agua. (Ed. Alfonso C.). Ciencia del Agua y el Agua como Recurso Natural. Puerto de la Cruz. Tenerife. III: 275–284.
- Arambarri, P., Cabrera, F. y Toca, C.G. 1984. *Estudio de la contaminación del río Guadiamar y su zona de influencia (Marismas del Guadalquivir y Coto Doñana) por residuos de industrias mineras y agrícolas*. CSIC. Madrid. 174 pp.
- Baonza, E., Plata, A. y Silgado, A. 1982. *Hidrología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional de Doñana y zona de influencia*. Cuadernos de Investigaciones, C7, CEDEX. Madrid. 139 pp.
- Borja, F. y Díaz del Olmo, F. 1996. *Manto eólico litoral (MEL) de El Abalarío (Huelva, España): episodios morfogenéticos posteriores al 22.000 BP*. En Dinámica y Evolución de Medios Cuaternarios (A. Pérez Alberti et al. eds.): 375–390.
- Borja, F. y Gómez-Ponce, C. 1999. *Aluvionamientos recientes en el sector NW de las marismas del Parque Nacional de Doñana (1956–1997). Análisis de cuencas vertientes*. 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana. Huelva. MIMAM, Madrid: 215–217.
- Borja Barrera, F. y Gómez Ponce, C. 2000. *Áreas de influencia aluvial en el sector noroeste de las marismas de Parque Nacional de Doñana (1956–1993)*. Actas del XVI Congreso de Geógrafos Españoles: El territorio y su Imagen, Vol 1. Málaga: 37–45.
- Cabrera, F., Toca, C.G., Díaz, E. y Arambarri, P. 1983. *Influencia de los alpechines en la calidad del agua del río Guadiamar*. En: V Congreso Nacional de Química. Tenerife. III: 535–543.
- Carrera, J., Manzano, M., Custodio, E. y Ayora, C. 1999. *El acuífero aluvial del río Guadiamar: estado actual y perspectivas de evolución*. En: Seminario internacional sobre corredores ecológicos y restauración de ríos y riberas. Aplicación a la cuenca del Guadiamar. Programas. Resúmenes de ponencias.
- Casas, J. y Urdiales, C. 1997. *Introducción a la gestión hidráulica de las Marismas del Parque Nacional de Doñana (SO de España)*. Bases Ecológicas para la Restauración de Humedales en la Cuenca Mediterránea, Huelva. MIMAM, Madrid: 165–189.
- Castro, A., Vázquez Suñé, E., Carrera, J., Jaén, M. y Salvany, J.M. 1999. *Calibración del modelo regional de flujo subterráneo en la zona de Aznalcóllar (España): Ajuste de las extracciones*. En: Hidrología Subterránea. Serie Correlación Ecológica nº 13. Instituto Superior de Correlación Geológica CONICET. Fac. de Cs. Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán. A. Tineo (Ed.): 21–29.

- Custodio, E. y Llamas, M.R. Eds. 1976; 1983. *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 Vols., 1–2350.
- Dolz J., Bladé E. y Gili J. 2005. *Modelo numérico de la hidrodinámica de la Marisma*. Publicado en "Doñana, Agua y Biosfera", pp.149–150. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.
- Doménech, C. y Ayora, C. 2001. *The weathering of the sulphide sludge and the natural attenuation of metals in the soil of the Aznalcóllar area SW Spain*. En: III Congreso Ibérico de Geoquímica, VIII congreso de Geoquímica de España. (Eds. Lago, M., Arranz, E., y Galé, C). 71–82.
- García Murillo, P. 1999. *Restauración del complejo palustre del Abalarío: la reconstrucción del paisaje*. 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana, Huelva. MIMAM, Madrid: 117–130.
- García–Novo, F.; Zunzunegui, M.; Muñoz Reinoso, J.C.; Gallego Fernández, J.D. y Díaz Barradas, M.C. 1996. *Surface and groundwater control on ecosystem development: the case of Doñana National Park (SW Spain)*. In *wetlands: A Multiapproach Perspective* (J. Cruz–Sanjulián and J. Benavente, Ed.). Granada: 81–101.
- González Labajo, J. 2000. *Radionúclidos Naturales en el río Guadiamar*. Departamento de Física Aplicada, Universidad de Sevilla. Informe sin publicar. 136 pp.
- Granados, M.D., Galindo, M.D. y García Vargas, M. 2003. *Evaluación de la especiación química de metales pesados en aguas del estuario del Guadalquivir y el brazo de la Torre afectadas por el desastre de Aznalcóllar*. En: Contaminación por metales pesados del estuario del Guadalquivir: efectos del accidente minero de Aznalcóllar sobre el medio físico y los organismos marinos. Serv. Pub. de la Universidad de Cádiz. 53–69.
- Jaén, M., Vázquez, E., Carrera, J., Castro, A. y Salvany, J.M. 1999. *Modelo tridimensional de flujo y transporte de contaminantes en el enlace del río Guadiamar con las Marismas del Guadalquivir (Aznalcóllar, España)*. En: *Hidrología Subterránea. Serie Correlación Geológica nº 13*. Instituto Superior de Correlación Geológica CONICET. Fac. de CC. Naturales e Instituto Miguel Lillo, Univ. Nacional de Tucumán. (Ed. A. Tineo). 11–20.
- Manzano, M. 1999. *Los humedales de Doñana y su relación con el agua subterránea*. Ponencia de la 1ª Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana (Doñana 2005). Huelva, octubre de 1999. MMA, Madrid.
- Manzano, M., Soler, A., Carrera, J. y Custodio, E. 2001. *Composición isotópica ($\delta^{18}O$, δ^2H y $\delta^{34}S$) de las aguas del área afectada por el vertido minero de Aznalcóllar (SO España)*. En: *Las caras del agua subterránea* (Eds. A. Medina y J. Carrera). IGME. I: 477–487.
- Manzano, M.; Borja, F. y Montes, C. 2002a. 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.; Mediavilla, C. y Montes, C. 2002b. *Effects of localised intensive aquifer exploitation on the Doñana wetlands (SW Spain)*. *Symposium on Intensive Use of Groundwater. Challenges and Opportunities*, SINEX. Instituto Geológico y Minero de España, Generalitat Valenciana y Fundación Marcelino Botín. Abstracts.
- Manzano, M., Soler, A., Carrera, J. y Custodio, E. 2004. *Estudio isotópico del origen del sulfato del agua subterránea en la zona afectada por el vertido minero de Aznalcóllar (SO España)*. En: *Seminarios de la Sociedad Española de Mineralogía. I: Geoquímica Isotópica Aplicada al Medio Ambiente* (Ed. L. Barbero y M. P. Mata). Cádiz. 71–88.
- Manzano, M., Soler, A. y Custodio, E. 2005. Origen del sulfato disuelto en el acuífero aluvial afectado por la ruptura de la basa de lodos piríticos del área minera de Aznalcóllar (Sevilla, España). En: *II Seminario Hispano Latinoamericano sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea: Relación Aguas Superficiales–Aguas Subterráneas* (Eds. M. Blarasin, A. Cabrera y E. Matteoda). Universidad Nacional de Río Cuarto, Córdoba, Argentina: 137–145.
- Muñoz Reinoso, J.C. y García Novo, F. 2000. Vegetation patterns on the stabilized sands of Doñana Biological Reserve. IAVS Symposium, Opulus Press, Uppsala: 162–165.
- Olias, M.; Cruz–Sanjulián, J. y Benavente, J. 1996. *Estimation of transpiration from water table oscillation in sand dunes (Corral Largo, Doñana National Park, Spain)*. In *wetlands: A Multiapproach Perspective* (J. Cruz–Sanjulián and J. Benavente, Ed.). Water Resources Institute, Granada: 103–110.
- Palancar, M., Galache, J. y Mantecon, R. 2001. Contribución al conocimiento del acuífero del aluvial y terrazas del río Guadiamar. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. XXIV*: 265–273.

- Rodríguez, A., Cáceres, L.M. y Rodríguez, J. 2000. *Dinámica y evolución de flechas litorales: el litoral Onubense (SO España)*. En Geomorfología Litoral, Procesos Activos (J.R. de Andrés y F.J. García, Eds.). ITGE, Madrid: 101–113.
- Younger, P.L., Teutsch, G., Custodio, E., Elliot, T., Manzano, M. y Sauter, M. 2002. Assessments of the sensitivity to climate change of flow and natural water quality in four major carbonate aquifers of Europe. En: *Sustainable groundwater development*. Eds. Hiscock, K.M., Rivett, M.O. y Davison, R.M. Geological Society Special Publication N° 193: 303–323.
- 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". Int. Geological Correlation.
- Zazo, C., Silva, P.G., Roquero, E., Mercier, N., Goy, J.L., Dabrio, C.J., Borja, F., Lario, J., Soler, V. y Polo D. 1999. *Tectónica y sedimentación reciente en el Golfo de Cádiz (El Abalario – Huelva)*. 4º Simposio sobre el Margen Ibérico Atlántico.
- Zazo, C. y Goy, L. 2000. *Cambios eutáticos y climáticos durante el cuaternario. Una síntesis sobre su registro en los litorales del Sur y Sureste Peninsular, Islas Canarias y Baleares (España)*. En Geomorfología Litoral y Procesos Activos (J.R. de Andrés y F.J. García, Ed.). ITGE, Madrid: 187–206.

A.4.– Cartografía e inventarios

- CARTOGESA 1984. *Realización de un plano topográfico fotogramétrico del Parque Nacional de Doñana. I. Red básica altimétrica, II. Red de apoyo, III. Red básica planimétrica: 3 volúmenes*. Madrid.
- Castroviejo, J. 1993. *Mapa del Parque Nacional de Doñana. Memoria*. CSIC. Agencia de Medio Ambiente. Junta de Andalucía.
- De Torres, T. 1977. *Memoria del mapa geológico de España. Escala 1/50.000. Almonte*. Hoja 1001. IGME, Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- Gavala, J. y Laborde, J. 1931–1952. Memoria explicativa de la hoja nº 1002 (Dos Hermanas), 1017 (El Asperillo), 1018 (El Rocío), 1033 (Palacio de Doñana–Las Marismillas) del Mapa Geológico de España 1:50.000. IGME. Madrid. 1–23; 1–48; 1–68.
- 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 Abalario), 1018 (El Rocío), 1019 (Los Palacios y Villafranca), 1033 (Palacio de Doñana) y 1034 (Lebrija). IGME, Madrid.
- IGME 1987. *Mapas de normas de explotación de acuíferos*. Escala 1:50.000. 982 (La Palma del Condado), 983 (Sanlúcar la Mayor), 999 (Huelva), 1000 (Moguer), 1001 (Almonte), 1017 (Abalario), 1018 (El Rocío), 1033 (Palacio de Doñana), 1047 (Sanlúcar de Barrameda). Informe técnico. IGME.
- IGME 1998. *Atlas Hidrogeológico de Andalucía*. IGME y Junta de Andalucía.
- Pardo, L. 1948. *Catálogo de los lagos de España*. Instituto Forestal de Investigaciones y Experiencias. Ministerio de Agricultura. Año XIX, nº 41.

A.5.– Informes diversos sobre la hidrología de Doñana y su entorno de edición limitada e interna, y sitios web

A.5.1.– De organismos oficiales y empresas

- CAP–JA–a. web de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/estacionesAgroclimaticas/estaciones.js>
- CAP–JA–b. web de la Consejería de Agricultura y Pesca de la Junta de Andalucía. http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/opencms/portal/DGPAgraria/Sanidad_Vegetal/RAIF
- CEDEX. web del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. <http://www.hercules.cedex.es>
- CEOTMA 1981. *Proyecto del Plan Director Territorial de Coordinación de la Comarca de Doñana*. MOPU, Madrid.

- CEOTMA 1984 *Optimización de depuradoras municipales que inciden en zonas húmedas de interés ecológico. Informe final del área del entorno del Coto de Doñana (Huelva)*. CEOTMA, MOPU. Madrid.
- CGS-CHG 1993. *La Gestión Hidráulica del Parque Nacional de Doñana*. Ed. Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y Medio Ambiente: 69 pp.
- CGS-CHG 2005. *Situación hidrodinámica actual de la Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas. Año hidrológico 2003-2004*. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. 67 pp + 9 Ap + 10 planos.
- CHG-ITGE 1996. *Red de control de acuíferos. Unidad Hidrogeológica 05.51 Almonte-Marismas. Evolución piezométrica. Noviembre 1995 a Noviembre 1996*. Informe sin publicar de la CHG e ITGE.
- CHG 1993. *La gestión hidráulica del Parque Nacional de Doñana. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir*. Secretaría de Estado para las Políticas del Agua y del Medio Ambiente. Madrid. 1-69.
- CHG 2004. *Situación hidrodinámica actual de la Unidad Hidrogeológica Almonte-Marismas: año hidrológico 2003-2004*. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Sevilla.
- CHG 2005. *Análisis de los expedientes de concesión de aguas subterráneas solicitadas en 2004 en el ámbito territorial de la Comarca del Condado (Huelva)*. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Sevilla. 19 pp.
- CHGN. web de la Confederación Hidrográfica del Guadiana. <http://www.chguadiana.es>
- CHGQ. web de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. <http://www.chguadalquivir.es>
- 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 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.
- CIE 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.
- CMA-JA-a. web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/>
- CMA-JA-b. web de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/clima_atmosfera/infgen/SICA/sica2.html
- Comité RAMSAR 1990. *Directorio sobre zonas húmedas del mundo* (parte que corresponde al Parque Nacional de Doñana, La Tablas de Daimiel y Laguna de Fuente de Piedra). 323-327.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir 1982. *Hidrogeología isotópica de las aguas subterráneas del Parque Nacional y zona de influencia*. Comisaría de Aguas.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir 1982. *Datos calidad aguas superficiales*. Varios años. Inédito. Comisaría de Aguas.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir-ITGE 1993. *Informe sobre el estado de la unidad hidrogeológica 05.51 Almonte-Marismas*. Informe sin publicar de CHG e ITGE.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir 1990. *Crecidas de noviembre y diciembre de 1989. Aportaciones al Parque Nacional Doñana*. Servicio de Hidrología. Comisaría de Aguas.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir 2001. *Evolución piezométrica, año 2001: red de control de la CHG piezómetros localizados en el interior del Parque Nacional de Doñana*. Ministerio de Medio Ambiente, Dir. Gen. de Obras Hidráulicas y Calidad de Aguas.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir 2002. *Estudio hidráulico y modelo de la intrusión salina en el Brazo de la Torre. Proyecto Doñana 2005*. Ministerio de Medio Ambiente, Dir. Gen. de Obras Hidráulicas y Calidad de Aguas. Informe sin publicar.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir 2004. *Explotación de la Red de Calidad de Aguas. Informe Anual 2003*.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir 2005. *Análisis de las extracciones de agua subterránea en la cabecera de la cuenca del Arroyo de la Rocina*. Informe sin publicar.
- Confederación Hidrográfica del Guadalquivir 2005. *Red básica de control piezométrico de la unidad hidrogeológica Almonte-Marismas (05.51)*. Lecturas piezométricas octubre 2003-septiembre 2004.
- Consejería de Agricultura y Pesca 1995. *Incidencia hidrogeológica del riego con aguas subterráneas del Plan Almonte-Marismas (1976-1994)*. Sevilla. 40 pp.

- Consejería de Medio Ambiente 1996. *Proyecto de memoria descriptiva del Plan de Ordenación de los Recursos Naturales y del Plan Rector de Uso y Gestión: Parque Natural de Doñana*. Sevilla. Junta de Andalucía 54 pp. Inédito.
- Consejería de Medio Ambiente 1997. *Plan de Ordenación de los Recursos Naturales y Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Natural de Doñana*. 133 pp + 8 mapas cartográficos. Junta de Andalucía.
- Consejería de Medio Ambiente 1998. *Balance de actuaciones para la corrección de los efectos del vertido minero de Aznalcóllar. Corredor Verde del Guadiamar*. Oficina Técnica para la recuperación de Guadiamar. Junta de Andalucía.
- Consejería de Medio Ambiente 2001. *Red de Información Ambiental de Andalucía*. Compendio de Cartografía y Estadísticas.
- Consejería de Medio Ambiente 2002. *Plan Andaluz de Humedales*. Junta de Andalucía.
- Consejería de Medio Ambiente 2003. *Plan Director de Riberas de Andalucía*. Junta de Andalucía.
- 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].
- EBD. web de la Estación Biológica de Doñana. (<http://www.ebd.csic.es>).
- ENDESA 2004. *Datos para la diagnosis ambiental de los aprovechamientos hidroeléctricos de ENDESA en la cuenca del río Guadalquivir*. Informe Técnico.
- EPTISA 1988–1989. *Inventario de puntos de agua en la cuenca baja del Guadiana*. Conf. Hidrog. Guadiana (inédito). Madrid.
- EPTISA 1991. *Plan de Ordenación de los Recursos Naturales del Parque Natural de Doñana*. Sevilla. Consejería de Cultura y Medio Ambiente 180 pp. Sin publicar
- FAO 1966. *Informe hidrogeológico sobre la región del Bajo Guadalquivir y la región de Huelva*. Informe técnico. Madrid.
- FAO 1968. *Project SPA 9: rapport de mission du groupe d'experts FAO sur les investigations hydrogéologiques dans le Bassin du Guadalquivir*. Informe interno. 20 pp
- FAO 1969. *Project SPA 9: étude hydrogéologique du Bassin du Guadalquivir*. Informe interno. 148 pp
- FAO 1969. *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 1969. *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 1970. *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalquivir*. Informe técnico FAO. 1. AGL: SF/SPA 9. Roma: 115 pp.
- FAO 1973. *Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir: finca piloto "Las Marismillas"*. Informe técnico 6. AGL: SF/SPA 16, Roma. 137 pp.
- FAO 1975. *Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir: proyecto de transformación de la zona regable Almonte Marismas*. Informe técnico 7. AGL: SF/SPA 16. 157 pp.
- 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.
- FLUMEN. web del Grupo de investigación de Hidrología Superficial de la Universidad Politécnica de Catalunya. <http://www.flumen@upc.edu>
- IARA 1987. *Evolución de la superficie de riego en la zona regable de Almonte–Marismas y entorno*. IARA. Informe. Sevilla. 2 pp.
- ICONA 1994. *Desarrollo sectorial del Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional de Doñana en materia de manejo de los recursos hídricos*. Parque Nacional de Doñana, ICONA, Ministerio de Agricultura, Peca y Alimentación. El Acebuche. Almonte. 1–67.
- IGME. web del Instituto Geológico y Minero de España. <http://www.igme.es>
- IGME 1971. *Programa Nacional de Investigación Minera*. Mapa Hidrogeológico Nacional y programa previo de investigación de aguas subterráneas.
- IGME 1972. *Proyecto piloto de utilización de aguas subterráneas para el desarrollo agrícola de la cuenca del Guadalquivir. Anteproyecto de transformación en regadío de la zona*

- Almonte Marismas (Margen derecha)*. Informe técnico ITGE–Madrid 2vol, 528 tablas, 78 análisis.
- IGME 1975. *Plan Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PIAS)*: 1) Primer informe sobre el modelo matemático del acuífero Almonte–Marismas, 2) Informe hidrogeológico de Mazagón, 3) Informe hidrogeológico abastecimiento a la Palma del Condado. ITGE. Madrid, Informe.
- IGME 1975. *Plan Nacional de investigación de Aguas Subterráneas (PIAS)*.
- IGME 1975. *Proyecto de transformación de la zona regable Almonte–Marismas*. Informe Técnico. ITGE. Madrid.
- IGME 1976. *Evolución de niveles piezométricos en los sistemas acuíferos. Cuenca del Guadalquivir*. 1) Informe preliminar sobre la realización y resultados del modelo matemático de Almonte–Marismas, 2) Modelo matemático del sistema acuífero de Almonte–Marismas, 3) Aforos sondeos finca Las Marismillas T.M. La Puebla del Río, 4) Manto acuífero Almonte–Marismas. ITGE. Madrid. 4 vol.
- IGME 1976. *Evolución de niveles piezométricos en los sistemas acuíferos. Cuenca del Guadalquivir*. Anuario 1976. ICONA. Serv. Publ. del Ministerio de Industria y Energía.
- IGME 1977. *Estudio hidrogeológico de Mazagón (Huelva)*.
- IGME 1978. *Informes técnicos sondeos de explotación Huelva I, II y III*. Informe Interno Sevilla.
- IGME 1978. *Contaminación de las aguas subterráneas en la región andaluza. Aspectos generales*.
- IGME 1978. *Informe técnico sondeo abastecimiento de Mazagón V (Huelva)*.
- IGME 1979. *Informe técnico sondeo abastecimiento a Pilas (Sevilla)*.
- IGME 1980. *Calidad de las aguas subterráneas en la cuenca del Sur de España*. Programa Nacional de Gestión y Conservación de los Acuíferos. Colección Informe. Ser. Publ. Min. Ind. Energ. Madrid.
- IGME 1980. *Estudio gráfico del grado de cobertura por estudios hidrogeológicos en la cuenca del Guadalquivir*. Colección Informe. IGME, Ministerio de Industria y Energía. Madrid.
- IGME 1981. *Informes sobre calidad de las aguas subterráneas de la cuenca del Guadalquivir. Redes de calidad y de intrusión*. Informe Interno Madrid.
- IGME 1982. *Calidad de las aguas subterráneas en la cuenca baja del Guadalquivir. Evolución piezométrica de los acuíferos de la cuenca baja del Guadalquivir hasta 1980–81*. Ser. Publ. Min. Ind. Energ. Madrid.
- IGME 1982. *Estudio hidrogeológico del acuífero de Palos–Moguer (Huelva)*. IGME, Madrid.
- IGME 1982. *Mapa hidrogeológico de España, 1:200.000*. Hoja nº 80/81 (Ayamonte–Huelva). Madrid.
- IGME 1982. *Actualización de datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte–Marismas y Mioceno de base. Modelo matemático bidimensional del sistema acuífero nº 27, Unidad Almonte–Marismas*. IGME. Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 50 pp.
- IGME 1982. *Estudio hidrogeológico actualizado del sistema acuífero nº27: Unidad Almonte–Marismas*.
- IGME 1982. *Evolución piezométrica de los acuíferos de la cuenca baja del Guadalquivir hasta 1980–81*.
- IGME 1982. *Informe actualización de la zona de control Nº 1 año 1982. Almonte Marismas. Sistema Acuífero 27*. Informe sin publicar del IGME. 8 pp.
- IGME 1983. *Calidad de las aguas subterráneas en Andalucía: Situación actual y focos potenciales de contaminación*. Colección Informe 89 pp, 11 planos.
- IGME 1983. *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Colección informe. Instituto Geológico y Minero de España. Servicio de Publicaciones. Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 1–120 + mapa.
- IGME 1983. *Mapa hidrogeológico del sistema Almonte–Marismas*. Informe sin publicar.
- IGME 1983. *Síntesis hidrogeológica de la cuenca del Guadalquivir*. Colección Informe. IGME. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.
- IGME 1983. *Estudio hidrogeológico del acuífero Almonte–Marismas. Estudio geofísico de la interfase agua dulce–agua salada*. Informe técnico sin publicar del IGME. Madrid. 18 pp.
- IGME 1984. *Calidad de las aguas subterráneas en la cuenca del Bajo Guadalquivir*. Colección Informe. IGME, Ministerio de Industria y Energía, Madrid.
- IGME 1984. *Calidad de aguas subterráneas en Andalucía: Situación actual y focos potenciales de contaminación*.
- IGME 1984. *Estudio hidrogeológico del acuífero Palos–Moguer (Huelva)*.
- IGME 1984. *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Colección informe.

- IGME 1984. *Hoja hidrogeológica de Huelva*. Escala. 1:200.000.
- IGME 1984. *Hoja hidrogeológica de Sevilla*. Escala 1:200.000.
- IGME 1984. *Síntesis hidrogeológica del Guadalquivir*.
- IGME 1985. *Calidad de las aguas subterráneas en la cuenca baja del Guadalquivir*.
- IGME 1986. *Calidad y contaminación de las aguas subterráneas en las comunidades autónomas: reestructuración y síntesis cartográfica de datos de análisis químicos: Andalucía*. IGME. Ministerio de Industria y Energía. 274 pp.
- IGME 1986. *Actualización de datos hidrogeológicos de Almonte–Marismas: aplicación del modelo matemático bidimensional del Sistema Acuífero nº 27: procesamiento de datos de ordenador*. Informe técnico. IGME. Memoria, planos y anexos, Madrid. 50 pp + 3 anexos.
- IGME 1987. *Simulación de la evolución piezométrica del acuífero Almonte–Marismas. Horizonte año 2010*. Memoria, planos y anejos. Informe técnico. IGME. Ministerio de Industria y Energía. Madrid. 1–32 + 2 anexos.
- IGME 1988. *Contenido en nitratos de las aguas subterráneas en España: distribución espacial y evolución temporal: cuenca del Guadalquivir*. Madrid. 70 pp.
- IGME 1989. *Las Aguas Subterráneas en España*. Estudio de síntesis. Madrid.
- IGME 1989. *Piezometría del acuífero Almonte Marismas (abril, mayo 1989)*. Informe técnico IGME. Madrid. 17 pp.
- IGME 1989. *Realización de una campaña flash de medidas piezométricas en el acuífero Almonte–Marismas*. H–935. Informe interno.
- IGME 1990. *Informe sobre la repercusión de las lluvias de otoño de 1989 en la piezometría del sistema acuífero Almonte–Marismas, 37/90*. IGME. Sevilla. 50 pp.
- IGME 1990. *Realización de una campaña flash de medidas piezométricas en el acuífero Almonte–Marismas*. Octubre–Noviembre 1989. Informe sin publicar.
- IGME 1991. *Estudio de la incidencia de la contaminación atmosférica en la calidad de las aguas subterráneas: Inventario, evaluación y metodología*. Informe monográfico. 3vol.
- IGME 1991. *Evaluación de los procesos de evaporación e infiltración a partir del estudio de la zona no saturada*. Parque Nacional de Doñana. IGME.
- IGME 1992. *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Colección Informes Aguas Subterráneas y Geotecnia. Ed. IGME. 64 pp + 2 mapas.
- IGME 1993. *Red de control de acuíferos. Unidad Hidrogeológica 05.51 Almonte–Marismas. Evolución piezométrica. Año 1991–92*. IGME.
- IGME 1998. *Proyecto Doñana 2005. Actuación nº 8: proyecto de control y permeabilización de la marisma de Doñana frente al río Guadalquivir, al Brazo de la Torre y a Entremuros*. Sevilla. Confederación Hidrográfica de Guadalquivir. 1vol.
- IGME 1999. *Informe sobre la evolución piezométrica del acuífero Almonte–Marismas. Período diciembre–98/junio–99*. IGME.
- IGME 1999. *Informe sobre la evolución piezométrica del acuífero Almonte–Marismas. Período noviembre 98/septiembre 99*. IGME.
- IGME 2000. *Informe sobre la evolución piezométrica del acuífero Almonte–Marismas. Periodo mayo 1999/mayo 2000*. IGME.
- IGME 2000. *Informe sobre la evolución piezométrica del acuífero Almonte–Marismas. Periodo octubre 1999/octubre 2000*. IGME. Madrid.
- IGME 2000–2001. *Revisión y actualización de las Normas de Explotación de las Unidades Hidrogeológicas. Cuencas del Guadalquivir y Guadalete–Barbate. Delimitación de Masas de Agua y para cumplimiento de la Directiva Marco*. Ministerio de Medio Ambiente. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Varios volúmenes. Madrid.
- IGME 2001. *Informe sobre la evolución piezométrica del acuífero Almonte–Marismas. Periodo abril 2000/mayo 2001*. IGME. Madrid.
- IGME 2002. *Informe sobre la evolución piezométrica del acuífero Almonte–Marismas. Periodo octubre 2000/noviembre 2001*. Informe sin publicar del IGME. 52 pp y 4 planos anexos.
- IGME–CGS 1995. *Estudio sobre la evaluación de la calidad físico química de las aguas subterráneas en el sector oriental de la unidad hidrogeológica Almonte–Marismas*. Secretaría Gral. de la Energía y Recursos Minerales. Ministerio de Industria y Energía: 1–2 y 46–48 + mapa + fig 5.
- IGME–FAO 1967. *Proyecto del Guadalquivir: informe hidrogeológico sobre la región del bajo Guadalquivir y la región de Huelva*. Informe técnico. Madrid.
- IGME–FAO 1975. *Proyecto de transformación de la zona regable Almonte–Marismas*. Informe Técnico. J. PNUD–FAO. Roma.

- 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.
- INM. web del Instituto Nacional de Meteorología. <http://www.inm.es>
- IRYDA 1975. *Las Marismas del Guadalquivir*. IRYDA, Monografía nº 17. Ministerio de Agricultura, Madrid.
- IRYDA 1976. *Informe final de los sondeos en el Caserío de Mazagón (zona regabón Almonte–Marisma)*. Memoria, anejos y planos. IRYDA. Informe interno
- IRYDA 1976. *Informe final de los sondeos en La Mediana (zona regable Almonte–Marismas)*. Memoria, anejos y planos. IRYDA. Informe interno.
- IRYDA 1976. *Informe final de sondeos de la zona regable de Almonte–Marismas y síntesis hidrogeológica*. Memoria, anejos y planos. IRYDA. Madrid. 110 pp.
- IRYDA 1976. *Segundo informe sobre el modelo matemático de los acuíferos de Almonte–Marismas (Huelva–Sevilla)*. Memoria, anejos y planos. INTECSA. Madrid.
- IRYDA 1977. *Informe final de los sondeos en El Abalarío (zona regable Almonte–Marismas)*. Memoria, anejos y planos. IRYDA. Informe interno.
- IRYDA 1978. *El Estuario del Guadalquivir y su problemática agro–social*. IRYDA información. Número extraordinario 8. Madrid.
- IRYDA 1978. *Informe final de los sondeos en El Acebuche (zona regable Almonte–Marismas)*. Memoria., anejos y planos. IRYDA. Informe interno.
- IRYDA 1978. *Informe sobre el control y vigilancia del acuífero Almonte–Marismas durante los años 1975 a 1977*. Memoria, anejos y planos. IRYDA. 10 pp.
- IRYDA 1991.
- ITGE 1992. *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Informes Aguas Subterráneas y Geotécnia. Madrid: 1–69 + mapas.
- JA 1982. *Publicaciones de las Jornadas Andaluzas para el estudio de la problemática de las zonas húmedas*. Junta de Andalucía. Sevilla.
- JA 1987. *Plan Director territorial de coordinación de Doñana y su entorno*. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía. Sevilla: 1–457.
- JA 1989. *Plan director territorial de coordinación de Doñana y su entorno*. Consejería de Obras Públicas y Transportes. Junta de Andalucía. Sevilla. 1–297 + tablas + mapas.
- JA 1992. *Inventario y caracterización de los regadíos de Andalucía*. Consejería de Agricultura y Pesca. Junta de Andalucía. Sevilla.
- JA 1997. *Plan de Ordenación de los recursos naturales y plan director de uso y gestión del Parque Natural de Doñana*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.
- JA 1999. *Comisión de coordinación para la recuperación de la cuenca del Guadiamar*. Memoria de actuaciones. Junta de Andalucía. Sevilla.
- JA 1999. *La estrategia del Corredor Verde del Guadiamar: fundamentos de la estrategia*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla.
- JA 2002. *Plan Andaluz de humedales*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Sevilla: 1–253.
- JA 2002. *Plan Andaluz de Humedales*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía. Sevilla.
- MAPA 1973–1976. *Análisis químicos del IARA: manuscrito. Estudio teórico de la salinidad de los sondeos de marismas y corrección de la misma*. Anejo 10. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- MIMAM 1999. *1ª reunión internacional de expertos sobre la regeneración hídrica de Doñana*. Huelva. Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid: 1–204.
- 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 1999. *Documento marco para el desarrollo de las actuaciones del Proyecto Doñana 2005: regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 2 vol: (texto y cartografía).
- MIMAM 1999. *Síntesis del Proyecto Doñana 2005. Regeneración hídrica de las cuencas y cauces vertientes a las marismas del Parque Nacional de Doñana*. Doñana 2005.

- Reunión Internacional de Expertos sobre la Regeneración Hídrica de Doñana. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MIMAM 2000. El libro del Agua en España. Secretaría de Estado de Aguas y Costas. Dirección General de Obras Hidráulicas y Calidad de las Aguas. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid: 637 pp.
- MIMAM 2001. *Ponencias y conclusiones. Doñana 2005*. I Reunión internacional de expertos sobre la regeneración hídrica de Doñana. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid: 264 pp.
- MIMAM 2001. *Actuación nº 9. Seguimiento de las actuaciones. Doñana 2005*. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid: Informe sin publicar.
- MIMAM 2001. *II Reunión Internacional de expertos sobre la regeneración hídrica de Doñana*. Ponencias y conclusiones. Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid: 155 pp.
- MIMAM 2001. *Conclusiones Doñana 2005*. II Reunión Internacional de expertos sobre la regeneración hídrica de Doñana. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MIMAM 2001. *El agua de El Rocío. Depuración de aguas residuales de El Rocío*. Doñana 2005. CD y revista. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MIMAM 2001. *La diálisis de los arroyos. Restauración de los arroyos de Soto Chico, Soto Grande y el Arroyo de la laguna de los Reyes*. Doñana 2005, CD y revista. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MIMAM 2001. *La marisma al natural: Restauración de la Marisma Gallega*. Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. (CD y Folleto Divulgativo).
- MIMAM 2001. *Proyecto Doñana 2005. Actuaciones nº 5: Recuperación de la funcionalidad del caño del Guadiamar. Nº 6: Restauración del Caño Travieso y Nº 7: Recuperación del caño de la Torre. Estudio de acondicionamiento de la montaña del río*. Proyecto Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. (CD).
- MIMAM 2001. *Proyecto Doñana 2005. Actuaciones Nº 1: Proyecto de restauración de los arroyos de Soto Grande y Soto Chico y del arroyo de la Laguna de los Reyes. Nº 2: Depuradora de aguas residuales en el Rocío. Nº 4: Proyecto de restauración de la Marisma Gallega y Nº 8: Control y permeabilización de la marisma de Doñana frente al río Guadalquivir, al Brazo de la Torre y a Entremuros*. Resumen de las actuaciones ejecutadas y de los estudios desarrollados para su definición. Proyecto Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. (CD).
- MIMAM 2001. *Proyecto Doñana 2005. Actuaciones nº 5: Recuperación de la funcionalidad del caño del Guadiamar. Nº 6: Restauración del Caño Travieso y Nº 7: Recuperación del caño de la Torre. Estudio de acondicionamiento de la montaña del río*. Proyecto Doñana 2005. (CD).
- MIMAM 2002. *Proyecto Doñana 2005. Actuaciones Nº 3: Informe resumen restauración del arroyo del partido. Fase I. Nº 5: Recuperación de la funcionalidad del caño del Guadiamar. Nº 6: Restauración del Caño Travieso y Nº 7: Recuperación del caño de la Torre. Estudio de acondicionamiento de la montaña del río*. Proyecto Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. (CD).
- MIMAM 2002. *Revista del proyecto para la regeneración hídrica del Parque Nacional de Doñana*. Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. nº 2.
- MIMAM 2003. Doñana 2005. Aula al aire libre. Revista del proyecto para la regeneración hídrica del Parque Nacional de Doñana. Doñana 2005. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 4: 24–25.
- MIMAM 2005. *Propuesta de valoración de la presión e impacto generados por la regulación, extracción e incorporaciones de flujo de agua*. Versión Final. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- MOPU 1979. *Informe hidrogeológico y de recursos hidráulicos desagües y vertidos, y posibles incidencias de los mismos en el Parque Nacional de Doñana*. Informe de la Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Obras Públicas Y Urbanismo.
- MOPU 1983. Propuesta de regeneración hídrica del Parque Nacional de Doñana. Informe no publicado. Ministerio de Obras Públicas Y Urbanismo. Comisión Interministerial de Medio Ambiente.
- MOPU 1979. *Informe hidrogeológico y de recursos hidráulicos, desagües y vertidos y posibles incidencias de los mismos en el Parque Nacional de Doñana*. Direc.Gral. de Obras Hidráulicas. Madrid.
- MOPU 1984. *Las zonas húmedas en Andalucía*. Monografías de la Dirección General de Medio Ambiente.

- Mujeriego, R., García, J., Knobelksdorf, J., Bourrouet, A., Querol, X., Alastuey, A., y Cabanes, M. (1998) *Tratamiento físico-químico de las aguas superficiales contaminadas por las aguas residuales de las minas de Aznalcóllar*. Informe técnico previo realizado a petición del Departamento de Química Ambiental de CID-CSIC de Barcelona. 19 pp.
- NAO. web del Instituto Español de Oceanografía. <http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.html>
- OMICRON, S.A. 1998. *Informe sobre el agua en Doñana: marco conceptual y planes existentes*. Trabajo encargado por la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente (Dirección General de Planificación) de la Junta de Andalucía.
- OMICRON, S.A. 1999. *Caracterización del área de Doñana en materia de agua*. Trabajo encargado por la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente (Dirección General de Planificación) de la Junta de Andalucía.
- OMICRON, S.A. 1999. *Criterios ambientales para la gestión del agua en Doñana*. Trabajo encargado por la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente (Dirección General de Planificación) de la Junta de Andalucía.
- OMICRON, S.A. 1999. *Modelo de gestión ambiental del agua en Doñana*. Trabajo encargado por la Dirección General de Planificación de la Consejería de Medio Ambiente (Dirección General de Planificación) de la Junta de Andalucía.
- OAPN 1986. *Parque Nacional de Doñana*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid. Dirección General de Medio Ambiente. Mapa escala 1: 50.000.
- OAPN 2000. *Informe del estado actual de las actuaciones del proyecto "Doñana 2005"*. Madrid. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. 24 pp.
- PND 1994. *Desarrollo sectorial del Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional de Doñana en materia de recursos hídricos*. ICONA. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. El Acebuche. 36 pp.
- RBD. web de la Reserva Biológica de Doñana. <http://www-rbd.ebd.csic.es>
- Saaltink, M., Ayora, C. y Carrera, J. 1999. Pyrite oxidation within the soil after a mine accident in southern Spain. Cost Action 67. *Chemodynamics & Water Quality Protection in Natural Porous Media*. ECDG XII.
- Sousa Martin, A. y García Murillo, P. 2001. *Los topónimos como indicadores de cambios territoriales y la percepción del paisaje: el caso del Abalarío (Parque Natural de Doñana, Huelva)*. Proyecto CICYT HID97-0321-C02-01.
- TECNOMA 2005. *Informe resumen de los artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua*. Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Dirección General del Agua. Ministerio de Medio Ambiente. 99 pp + 7 Ap.
- UPC-ITGE 1999. *Modelo hidrogeológico regional Almonte-Marismas*. Realizado por la UPC para el ITGE.
- UPM 1998. *Informe sobre la situación actual del arroyo del Partido en relación con el régimen hidráulico en su tramo final (Entorno de Doñana)*. Informe específico del Dpto. de Ingeniería forestal E.T.S.I. de Montes, Universidad Politécnica de Madrid 38 pp + 17 fot.
- WFD-CIS 2003. Guidance Document No. 2: *Identification of water body*. Published by the Directorate General Environment of the European Commission, Brussels.
- WFD-CIS 2003. Guidance Document No. 10: *Rivers and Lakes-Typology, Reference Conditions and Classification Systems*. Published by the Directorate General Environment of the European Commission, Brussels.
- WWF 2001. *Depuración de aguas en la comarca de Doñana*. Word Wild Fund/Adena. Madrid/Hinojos. 16 pp.
- WWF 2001. *Efectos ambientales del PDR Andalucía en Doñana*. Word Wild Fund/Adena. Madrid/Hinojos. 8 pp.
- WWF 2001. *La regeneración de las marismas*. Word Wild Fund/Adena. Madrid/Hinojos. 7 pp.
- WWF 2001. *Ríos y riberas en torno a Doñana*. Word Wild Fund/Adena. Madrid/Hinojos. 20 pp.
- WWF 2002. *Doñana y el cambio climático*. Word Wild Fund/Adena. Madrid/Hinojos. 15 pp.
- WWF-ADENA 2001. *Depuración de aguas en la comarca de Doñana. Análisis y propuestas de actuación de WWF-Adena*. 16 pp.

A.5.2.- Con autores

- BaSeLiNe 2003. *Niveles de referencia de calidad natural de las aguas subterráneas en los acuíferos europeos (Baseline Quality in European Aquifers)*. E. Custodio y M. Manzano. UE (Programa "Energy, Environment and Sustainable Development"). 2000-2003. Project 17/2001.

- Bayán, B. 2002. *Claves de la actuación nº 2: depuración de las aguas residuales de El Rocío. El agua de El Rocío*. Revista del proyecto para la regeneración hídrica del Parque Nacional de Doñana. Doñana 2005. 2: 6–7.
- Bayán, B. 2003. *Claves de la actuación nº 3: restauración del arroyo del Partido, Fase I. Frenar las arenas*. Revista del proyecto para la regeneración hídrica del Parque Nacional de Doñana. Doñana 2005. 4: 16–19.
- Bayán, B. 2003. *Claves de la actuación nº 6: restauración del caño Travieso. Fase I. Manual de buenas formas*. Revista del proyecto para la regeneración hídrica del Parque Nacional de Doñana. Doñana 2005. 5: 20–23.
- Bayán, B., Casas, J., Ruiz, A. y Urdiales, C. 2001. *Un proyecto para la regeneración de Doñana*. Ministerio de Medio Ambiente. (Dirección y Coordinación: Félix Pérez Miyares).
- Beyerle, L., Aeschbach–Hertig, W. y Ripfer, H. 1998. Noble gas analyses of groundwater from Spanish coastal aquifer in Doñana. EAWAG, Swiss Federal Institute for Environmental Science and Technology, 5 pp.
- Carmona, J. y Schmidt, G. 2001. *Agenda 21 Local en Doñana. Participativa y Sostenible*. Informe Adena/WWF España. Madrid. 16 pp.
- Castells, M., Cruz–San Julián, J., Custodio, E., García Novo, F., Gaudemar, J.P., González Vallvé, J. L., Granados, V., Magraner, A., Roman, C., Smart, M. y Van der Maarel, E. 1992. *Dictamen sobre estrategias para el desarrollo socioeconómico sostenible del entorno de Doñana*. Comisión Internacional de Expertos de Doñana. Junta de Andalucía. 1–131 + Ap.
- Castro, A., Vázquez Suñé, E., Jaén Dupond, M., Carrera, J., Manzano, M., Salvany, J.M. y Vázquez, M. 1999. *Modelo regional del flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte Marismas y su entorno*. Dpto. de Ingeniería del Terreno y Cartográfica, ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña. Preparado para ITGE.
- Castroviejo, J. 1982. *Hidrología, agricultura y conservación en Doñana*. Rev. de Inf. Comis. Nac. Española de Cooperación con la UNESCO. 29: 33–43.
- Chapond, G. y Astier, J.L. 1968. *Prospección geofísica por método eléctrico en las Marismas del Guadalquivir*. Seminario de Hidrología. IGME–FAO. Madrid, 1: 189–192.
- Corominas, J. 1986. *El acuífero Almonte–Marismas (Sevilla–Huelva). Dinámica de flujos y su condicionamiento de la calidad de las aguas*. Instituto Andaluz de Reforma Agraria, IARA. Informe Técnico. 9 pp y 4 tablas.
- Corominas, J., Sacristán, M., Garrido, J., Portillo, D., Campuzano, G. 1976. *Informe final de sondeos de la zona regable de Almonte–Marismas (Huelva–Sevilla)*. IARA.
- Cota, H. 1977. *Descripción de las características climatológicas del área de Doñana*. Centro Internacional de Formación en las Ciencias Ambientales, Universidad de Sevilla. Dpto. de Ecología. 5 pp.
- Custodio, E. 1987. *Peculiaridades de la hidrología en los complejos palustres españoles*. Bases científicas para la Protección de las Humedades en España. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Madrid. 43–63.
- Custodio, E. 1999. *Procesos hidrogeológicos en los acuíferos del área de Doñana (Huelva–Sevilla)*. Dpto. Ingeniería del Terreno y Cartografía. ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña. Informe final del proyecto.
- Custodio, E. 2001. *Aguas subterráneas y humedales*. Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas, Serie C, Aguas Subterráneas y Medio Ambiente. Fundación Marcelino Botín. Madrid. 33–72.
- Díaz de León, P., y Sáez Royuela, R. 1900. *Características de las aguas del Parque Nacional de Doñana en años de sequía*. Instituto Nacional de Investigaciones Agrarias. Departamento de Ecología. Informe.
- DITC–UPC 1999. *Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte–Marismas y su entorno*. Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartografía. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. (informe interno para el ITGE).
- Doblas, G. 1991. *Actualización y revisión de la hidrogeología del Sistema Acuífero 27, Unidad Almonte Marismas*. Informe interno ITGE.
- Dolz, J. y Velasco, C. 1990. *Análisis cualitativo de la hidrología superficial de las cuencas vertientes a la marisma del Parque Nacional de Doñana*. Dpto. de Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental. Dpto. Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental. UPC. 173 pp (informe fotográfico).

- Domínguez Nevado, L. 1997. La ordenación del territorio en sistemas fluctuantes. El caso de Doñana. Universidad Internacional Menéndez y Pelayo. 7021/7. Parque Nacional de Doñana: 151–171.
- Duque, A. 1977. *El mito de Doñana*. Servicio de Publicaciones del Ministerio de Educación. Madrid: 1–212.
- Fuente, F.J. 2004. *Plan de ordenación del territorio del ámbito de Doñana*. Consejería de Obras públicas y Transportes. Secretaría General de Ordenación del Territorio y Urbanismo. Sevilla. 171 pp.
- Gea, R. et al. 1965. *Exploración de aguas subterráneas en la provincia de Huelva. Zona número 1*. Plan Gen. Explor. Aguas Subt. INC. AERO SERVICE Ltd. Madrid (inédito).
- 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.
- Giráldez, J.V., Roldán, J. y López Rodríguez, J.J. 1992. *Informe de las extracciones de agua para uso agrícola del acuífero Almonte–Marismas*. Informes solicitados por la Comisión de Expertos de Doñana para el Dictamen sobre Estrategias para el Desarrollo Sostenible del Entorno de Doñana (Coord. E. Custodio). 59 pp.
- Grande Covián, R. 1956. *Los suelos salinos: su rescate y aplicación a las Marismas del Guadalquivir*. Monografías del Ministerio de Agricultura, 7. Madrid.
- Grande Covián, R. 1967. *Las Marismas del Guadalquivir y su rescate*. Est. Inst. Nac. Col., 29.
- Grande Covián, R. 1973. *Las Marismas del Guadalquivir: drenaje subterráneo como medio de saneamiento de suelos salinos y alcalinos*. IRYDA, Ministerio de Agricultura. Madrid.
- Grande Covián, R. 1978. *El estuario del Guadalquivir y su problemática agro social*. IRYDA. Ministerio de Agricultura. 45 pp.
- Guimerà, J. 1990. *Informe sobre las arenas que componen el acuífero de Almonte–Marismas en el entorno del Parque Nacional de Doñana. Determinación de parámetros hidrogeológicos*. Informe interno. DIT–ETSECCPB. UPC. Barcelona.
- Hollis, T., Herteaux, P. y Mercer, J. 1989. *The implications of groundwater extraction for the long term future of the Doñana National Park*. Report WWF/IUCN/ADENA mission to the Doñana National Park. November 1988. 51 pp + 3 Ap.
- Hollis, T., Herteaux, P., Mercer, J. 1989. *Las consecuencias de la extracción de aguas subterráneas para el futuro a largo plazo del Parque Nacional de Doñana*. Misión WWF/IUCN/ADENA para el Parque Nacional de Doñana. Primera parte.
- Lleó de la Viña, J., y Paredes, J. 1978. *Informe sobre consecuencias de las obras de encauzamiento del Arroyo del Partido en las proximidades del Parque Nacional de Doñana*. Madrid. 1 Vol.
- López Rodríguez, J.J. 1995. Modelo de flujo en la zona no saturada. Aplicación al Parque del Entorno de Doñana. En La Zona no Saturada y la Contaminación de las Aguas Subterráneas. Vulnerabilidad de Acuíferos. CIHEAM. Zaragoza. 14 pp.
- Martín Machuca, M. 1989. *Informe sobre la situación actual del acuífero Almonte–Marismas y su evolución histórica*. Grupo de Trabajo de Aguas del Patronato del Parque Nacional de Doñana. IGME.
- Martín Machuca, M. y López Geta, J.A. 1992. *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Colección Informes Aguas Subterráneas y Geotecnia.
- Mintegui, J.A. 2001. *Informe sobre el comportamiento del arroyo del Partido., actuaciones previstas para recuperar su régimen hidráulico en el entorno del Parque Nacional de Doñana*. Informe. Ministerio de Medio Ambiente. Proyecto Doñana 2005.
- Mintegui, J.A. y Robredo, J.C. 1997. *Dinámica sedimentaria de las marismas del Parque Nacional de Doñana. Evolución, prospectiva y alternativas de gestión futura. Informe año 1997. Vol I, Vol. II, Vol. III*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Dpto. de Ingeniería Forestal, Unidad de Hidráulica e Hidrología.
- Mintegui, J.A. y Robredo, J.C. 1999. *Dinámica sedimentaria de las marismas del Parque Nacional de Doñana. Evolución, prospectiva y alternativas de gestión futura. Informe Final. Nivelaciones Topográficas I, II, III y IV*. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Dpto. de Ingeniería Forestal, Unidad de Hidráulica e Hidrología.

- Mintegui, J.A. y Robredo, J.C. 1999. *Bases para la elaboración de un modelo del terreno de la marisma del Parque Nacional de Doñana*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. 255 pp.
- Mintegui, J.A. y Robredo, J.C. 2001. *Bases para la elaboración de un modelo del terreno de la Marisma del Parque Nacional de Doñana*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. 244 pp.
- Mintegui, J.A., Tobredo, J.C. y Sedra, P.J. 2003. *Avenidas torrenciales en el Arroyo del Partido y su incidencia en la Marisma del Parque Nacional de Doñana*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Madrid. 373 pp.
- Mintegui, J.A., Robredo, J.C. y García, J.I. 2004. La importancia de los trabajos de campo en la confección del modelo del terreno para aplicaciones en ecología. *Invest Agrar. Sist. Recur. For.* Fuera de serie. 164–175.
- Molino, V. 1989. Les eaux souterraines en Andalousie. Hydrogéologie du Park national de Doñana et de la région de Cadix. Publicaciones de la Casa de Velásquez.
- Montes, C.; Borja, F., Manzano, M. y otros (En prensa). *Inventario y tipificación de los humedales del Manto Eólico Litoral de Doñana*. Consejería de Medio Ambiente, Junta de Andalucía.
- Muriel, J. L., Llanos, I., Ruíz, J.C. 1991. *El riego en la zona de Almonte–Marismas. Situación y consideraciones sobre su optimización*. Informe Técnico. Junta de Andalucía. Sevilla.
- Ojeda Rivera, J. F. 1987. *Organización del territorio en Doñana y su entorno próximo (Almonte). Siglos XVIII–XX*. Universidad de Sevilla. Facultad de Geografía e Historia. Departamento de Geografía. ICONA–Monografías 49. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
- Orihuela Calvo, D.L. 1992. *Salinización de las aguas de uso agrícola en el sector III del Plan Almonte–Marismas*. E.U.P. La Rábida. Univ. Sevilla. Ed. AIQB–VCUH.
- Palancar, M. 1998. *Informe preliminar de los efectos del vertido tóxico de la mina de Aznalcóllar sobre el sistema hidráulico*. Informe sin publicar de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. 23 pp.
- Palancar, M. 2004. *Informe de la evolución piezométrica de la unidad hidrogeológica 05.51 en el periodo octubre 2003–octubre 2004*. Informe sin publicar de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir.
- Plataforma del Guadalquivir 1999. *Plataforma del Guadalquivir: Agua, empleo y riqueza en la Cuenca del Guadalquivir*. Sevilla: Junta de Andalucía, Consejería de Obras Públicas y Transporte. 143 pp.
- Porras Martín, J. 1983. *Estudio de la calidad de las aguas subterráneas de Andalucía. Situación actual y focos potenciales de contaminación*. Colección Informe. IGME. Madrid.
- Pozo, R., Polo, L., Jodral, M., Jordano, R., Zurera, G. y Rincón, F. 1985. *Estudio conjunto de la contaminación del sistema hidrográfico del Guadalquivir. Pesticidas organoclorados, mercurio, plomo y cadmio*. Proyecto de investigación del CSIC nº 33.121. Facultad de Veterinaria, Universidad de Córdoba.
- Prieto, I. 1943. *Informe hidrográfico de la zona SE de la provincia de Huelva*. Not. Com. IGME. 13: 291–322.
- Río, R., Montes, C., Guerrero, M.C., López, A., Coletto, C., Alcorlo, P., Álvarez, S., Barajas, F., Jiménez, R.E. y Tadeo, A. 2000. *Seguimiento y control de los efectos generados por los sistemas de depuración del Palacio de Doñana (Reserva Biológica de Doñana)*. Informe sin publicar. 101 pp.
- Rodríguez Ramírez, A. 1998. *Geomorfología del Parque Nacional de Doñana y su Entorno*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales, Ministerio de Medio Ambiente. Madrid: 1–146 + mapas.
- Romero, E., y Ruíz, F. 1992. *El agua subterránea en el término municipal de Rociana del Condado*. Cuaderno de Investigación, creación literaria y opinión, Vol. 1.
- Sahuquillo, A., Carrera, J. y Samper, J. 1992. *Revisión crítica de los trabajos existentes de modelación del flujo subterráneo en el acuífero circundante al Parque Nacional de Doñana*. Informes solicitados por la Comisión de Expertos de Doñana para el Dictamen sobre Estrategias para el Desarrollo Sostenible del Entorno de Doñana. 111 pp.
- Sahuquillo, A., Carrera, J., Samper, J. y Custodio, E. 1991. *Revisión crítica de los trabajos existentes de modelación del flujo subterráneo en el acuífero circundante al Parque Nacional de Doñana*. Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Barcelona.
- Salvany, J.M. 1991. *Análisis de la estratigrafía y sedimentología de muestras de sondeos representativos en relación con el Parque Nacional de Doñana, con vistas a la evaluación crítica de los modelos de simulación del flujo subterráneo en el acuífero*. Curso

- Internacional de Hidrología Subterránea. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. Texto + mapas + planos.
- Salvany, J.M. 1992. *Análisis de la estratigrafía y sedimentología de muestras de sondeos representativos en relación con el Parque Nacional de Doñana: con vistas a la evaluación crítica de los modelos de simulación del flujo subterráneo en el acuífero*. Informes solicitados por la Comisión de Expertos de Doñana para el Dictamen sobre Estrategias para el Desarrollo Sostenible del Entorno de Doñana. 20 pp + 5 planos.
- Samper, J. y Guimerà, J. 1991. *Interpretación numérica de un ensayo de trazado químico en la zona no saturada del Parque Nacional de Doñana*. Curso sobre la Zona no Saturada y la Contaminación de las Aguas Subterráneas. E.T.S. Ingenieros de C.C.P. Barcelona. Centro Internacional de Altos Estudios Agronómicos Mediterráneos. 21 pp.
- 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.
- Santos, R. 1997. *Planes de mejora hidrológica y ambiental en Doñana: conjurar el peligro*. Madrid. Ministerios de Fomento y Medio Ambiente 452: 11–16.
- Saura, J., Bayán, B., Casas, J., Ruiz de Larramendi, A. y Urdiales, C. 2001. *Documento marco para el desarrollo del proyecto Doñana 2005*. Ministerio de Medio Ambiente. 201 pp.
- Schmidt, G., Ferrero, L.M. y Jiménez, J. 2001. *Depuración de aguas en la comarca de Doñana*. Análisis y Propuestas de Actuación de WWF–ADENA. WWF/ADENA. 16 pp.
- Scope 1987. *La cantidad y calidad del agua disponible en el Coto de Doñana*. Scientific Committee on Problems of the Environment (Grupo Español). Informe final, Reunión de Sevilla. 25 pp.
- Sousa Martín, A. y García Murillo, P. 2005. *Historia ecológica y evolución de las lagunas peridunales del Parque Nacional de Doñana*. Organismo Autónomo de Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid. 1–169.
- Toja, J., García Sánchez, J.A., y López Peral, T. 1992. *Control de la calidad de las aguas del entorno del Parque Nacional de Doñana: Evaluación de vertidos, cálculos del poder autodepurador y diseño de medidas correctoras*. Informes solicitados por la Comisión de Expertos de Doñana para el Dictamen sobre Estrategias para el Desarrollo Sostenible del Entorno de Doñana.
- Trick, T. 1994. *Reinterpretación y síntesis de la hidrogeología de El Abalarío (Huelva)*. XXVIII Curso Internacional de Hidrología Subterránea. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. 47 pp + anexos.
- Trick, T. 1995. *Resultados de la interpretación de los ensayos de bombeo realizados en los sondeos: P2 de abastecimiento de Mazagón; P3 y P10 de abastecimiento de Matalascañas*. Dpto. Ing. Terreno de la E.T.S. Ing. Caminos, C. y P. Univ. Politécnica de Catalunya.
- 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 Geominero 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.
- Van de Bund, W. 2004. *Assigning water body types: an analysis of the REFCOND questionnaire results*. Typology (WFD–REFCOND).
- Vaney, J.R. 1970. *L'hydrologie du Bas Guadalquivir*. Madrid. Public. Depart. Geogr. Aplic. CSIC. 176 pp.
- Varela, M. 1991. *Situación de la contaminación por nitratos en las aguas subterráneas del territorio peninsular y balear*. Servicio Geológico del MOPT. Informaciones y Estudios 53: 1–71.
- Varni, M. y Iglesias, M. 1993. *Técnicas isotópicas ambientales en hidrología subterránea: 1) Evaluación del modelo dispersivo para la determinación del tiempo de renovación, 2) Reinterpretación de los datos de ^{13}C y ^{14}C en el Parque Nacional de Doñana, 3) Distribución del ^{18}O i D a la zona de Doñana*. Trabajos realizados para Doctorado/Maestría: 1) Varni, 2) Varni, 3) Iglesias. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Velasco Cabré, F. 1990. *Análisis cualitativo de la hidrología superficial de las cuencas vertientes a la marisma del Parque Nacional de Doñana*. Dep. Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona. 1–172 + mapas.

A.6.– Referencias de leyes y normas

- Decreto 2412–1969, de 16 de Octubre de creación del Parque Nacional de Doñana. BOE N. 257, 27–10–69.*
- Decreto 735/1971, de 3 de abril (presidencia), por el que se dan normas de carácter técnico y administrativo a la explotación de aguas subterráneas en determinadas zonas de Andalucía.*
- Decreto 1194/1971, de 6 de mayo, por el que se declaraba de Interés Nacional la Zona Regable Almonte–Marismas (Sevilla y Huelva).*
- Decreto 2101/1971, de 9 de noviembre.*
- Decreto 2148/1972, de 8 de julio, por el que se aprueba la primera parte del Plan General de Transformación de la Zona Regable Almonte–Marismas (Sevilla y Huelva).*
- Decreto 2244/1974, de 20 de julio, por el que se aprueba la segunda parte del Plan General de Transformación de la Zona Regable Regable Almonte–Marismas (Sevilla y Huelva).*
- Ley 91/1978, de 28 de diciembre, del Parque Nacional de Doñana, BOE nº 11, de 12 de enero de 1979.*
- Real Decreto 2421/1984, de 12 de diciembre, por el que se aprueba el Plan Rector de Uso y Gestión del Parque Nacional de Doñana. BOE N. 35, 9–2–1985.*
- Real Decreto 357/1984, de 8 de febrero, por el que se modifica el Plan General de Transformación de la zona regable de Almonte–Marisma para hacerlo compatible con la conservación del Parque Nacional de Doñana. BOE N. 47, 24–2–1984*
- Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas. BOE nº 189, de 9 de agosto de 1985; corrección de errores en BOE nº 243, de 10 de octubre.*
- Real Decreto–Ley 7/1999, de 23 de abril, por el que se aprueban y declaran de interés general las obras de regeneración hídrica incluidas en el conjunto de actuaciones Doñana 2005. BOE N. 98, 24–4–99.*
- Ley 8/1999, de 27 de octubre, del Espacio Natural de Doñana. BOE N.295, 10–12–99. BOJA N. 137, 25–11–99.*
- Orden de 10 de abril de 1987, por la que se acuerda la aprobación inicial del Plan Director Territorial de Coordinación de Doñana y su Entorno. BOJA N. 36, 28–04–87.*
- Decreto 18/1988, de 3 de mayo de 1988, por el que se aprueba definitivamente el Plan director Territorial de Coordinación de Doñana y su entorno y se crea la Comisión de Seguimiento y Gestión para el desarrollo del Plan. BOJA. N. 37, 13–05–88.*
- Ley 2/1989, de 18 de julio de 1989, por la que se aprueba el Inventario de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía, y se establecen medidas adicionales para su protección. BOJA N. 60, 27–7–89.*
- Ley por la que se aprueba el inventario de Espacios Naturales Protegidos de Andalucía y se establecen medidas adicionales para su protección. BOJA de 25–7–89.*
- Decreto 102/1990, de 20 de marzo, por el que se crea la Junta Rectora del Parque Natural de Doñana. BOJA N. 29, 6–4–90.*
- Orden de 13 de agosto de 1999 por la que se dispone la publicación de las determinaciones de contenido normativo del Plan Hidrológico de Cuenca del Guadalquivir, aprobado por el Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio.*
- Ley 8/1999 de 27 de octubre, del Espacio Natural de Doñana. BOE 295 de 10–12–99.*
- 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. DOCE L327 22 2000.*
- Resolución de 6 de febrero de 2004, de ampliación del Parque Nacional de Doñana (BOE núm. 47, de 24 de febrero de 2004).*

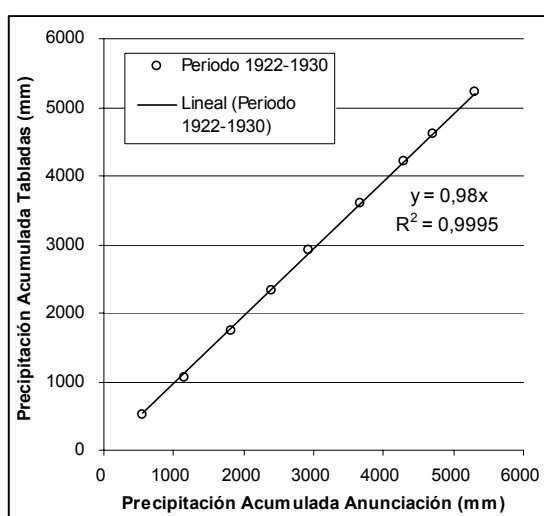
Apéndice

Serie extendida pluviométrica

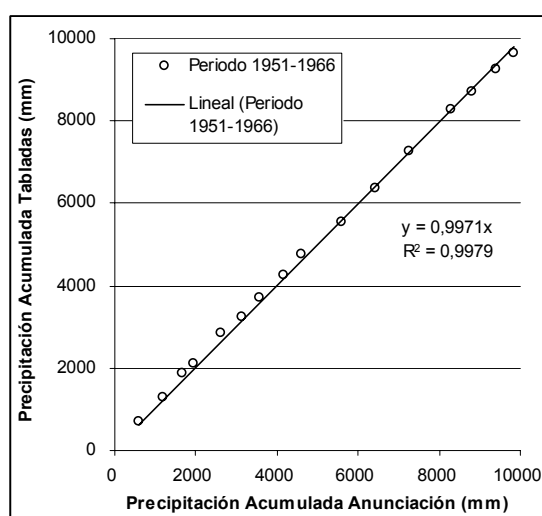
La serie de valores de la precipitación mensual del Bajo Guadalquivir disponible es el conjunto Iglesia de la Anunciación (Sevilla)–Sevilla/Tablada, desde 1886. Se recogen estos datos en:

- Tabla Ap.A1.– Datos de la estación Iglesia de la Anunciación
- Tabla Ap.A2.– Datos de la estación Sevilla–Tablada
- Tabla Ap.A3.– Datos de la estación Palacio de Doñana

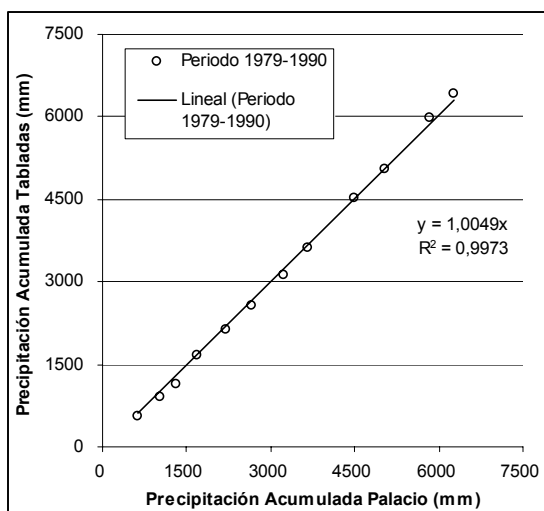
En los periodos en que los datos se superponen hay una muy buena correlación. En la Figura Ap.1 se dan las curvas dobles masas (pluviometría acumulada) para esos periodos comunes, de las que se deducen los coeficientes de correlación en ella indicados. Con esos coeficientes se puede establecer una serie larga de pluviometría reconstituida para la estación Sevilla–Tablada (Tabla Ap.A.4), que es la que se usa en el informe para obtener el gráfico de desviaciones acumuladas (Figura 1.6).



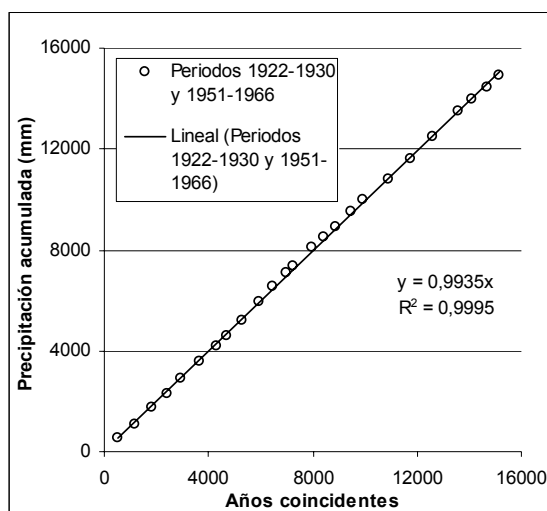
Tablada–Anunciación 1922–1930



Tablada–Anunciación 1951–1966



Tablada–Palacio de Doñana
1979–1990



Tablada–Anunciación
1922–1930 y 1951–1966

Figura Ap.1.– Curvas de dobles masas (pluviometría anuales acumuladas) para los periodos comunes de las estaciones pluviométricas Sevilla–Tablada, Iglesia de la Anunciación y Palacio de Doñana.

Tabla Ap.A1.– Registro pluviométrico de la estación de Palacio de Doñana.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	P (mm)
1979	213,5	116,7	51,8	25,3	0,0	0,0	0,0	0,0	6,8	135,2	6,1	0,0	555,4
1980	27,7	22,9	28,1	13,6	59,2	0,0	0,0	1,7	2,4	56,3	125,3	3,0	340,2
1981	1,0	12,8	21,1	40,1	12,3	0,0	0,0	0,0	0,0	4,3	0,0	155,5	247,1
1982	147,5	37,5	70,3	36,3	0,0	0,5	4,0	20,8	13,0	3,5	146,0	27,7	507,1
1983	0,0	10,9	3,9	62,9	6,0	2,3	0,0	0,0	2,0	24,6	264,6	99,2	476,4
1984	24,3	16,0	69,6	16,4	31,9	14,4	0,0	0,0	9,5	21,3	231,5	13,9	448,8
1985	153,3	71,6	2,5	77,2	18,0	39,5	0,0	0,0	0,0	0,0	104,5	95,3	561,9
1986	29,4	112,4	43,6	84,7	48,8	0,0	0,0	0,0	9,5	52,5	89,6	9,2	479,7
1987	sd	132,8	16,5	41,5	0,0	0,0	0,0	90,0	20,0	180,5	29,0	391,5	901,8
1988	135,5	25,0	5,0	9,5	53,0	52,0	45,3	0,0	sd	81,5	125,0	8,0	539,8
1989	70,0	88,0	12,0	69,0	5,5	0,0	0,0	sd	29,0	78,0	277,0	288,0	916,5
1990	99,0	0,0	33,5	148,0	11,0	0,0	0,0	0,0	3,0	61,5	39,0	60,0	455,0
1991	4,0	175,0	104,0	33,0	0,0	0,0	0,0	sd	45,6	165,6	21,0	62,1	610,3
1992	1,3	49,9	24,8	60,7	27,6	34,7	0,0	0,0	27,9	60,0	9,0	45,3	341,2
1993	43,3	20,1	37,9	60,5	69,5	0,0	0,0	0,0	10,8	119,1	73,8	2,3	437,3
1994	50,9	58,0	2,3	35,2	61,2	0,0	0,0	0,0	0,0	30,5	79,7	12,8	330,6
1995	16,0	90,3	0,2	12,2	0,0	11,7	0,0	0,0	0,0	2,7	121,8	312,1	567,0
1996	313,0	39,6	52,3	55,5	129,2	0,0	0,0	1,6	60,4	16,5	87,5	425,9	1181,5
1997	154,7	0,0	0,0	37,8	67,8	33,7	0,0	1,0	0,3	61,7	179,9	215,5	752,4
1998	90,1	90,4	11,5	23,3	40,6	8,5	0,0	0,0	52,2	1,0	23,5	22,2	363,3
1999	80,7	3,4	39,0	18,0	8,3	4,4	0,0	0,0	19,3	205,1	10,2	21,8	410,2
2000	56,2	0,0	22,8	63,7	114,8	0,0	0,0	0,0	14,4	28,9	58,8	261,0	620,6
2001	153,3	23,2	111,7	0,0	27,6	0,0	1,6	0,0	101,1	100,2	76,1	82,1	676,9
2002	34,8	6,2	96,0	63,7	0,4	0,0	0,0	0,0	59,5	28,4	110,3	128,2	527,5
2003	72,4	42,2	44,2	63,9	0,4	0,0	0,0	0,0	20,0	215,9	73,5	184,1	716,6
2004	11,0	105,1	59,4	41,0	64,9	0,0	0,0	0,0	0,5	67,1	18,0	19,7	386,7
2005	0,0	39,2	25,7	0,0	2,8	0,0	0,0	0,0	0,0	98,8	41,6	8,9	217,0
2006	135,5	69,6											
Valor medio anual													539,6
Desviación típica interanual													215,9
Coefficiente de variación													0,40
sd: sin dato													

Tabla Ap.A2.– Registro pluviométrico de la estación de Tablada–Sevilla.

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	P (mm)
1922	67	19	120	8	6	23	0	8	3	192	9	89	544
1923	6	62	7	199	11	47	6	1	12	40	214	9	614
1924	49	123	183	57	16	0	0	0	16	48	123	52	667
1925	0	62	17	11	55	129	3	0	1	22	120	157	577
1926	26	148	37	40	65	0	0	0	1	127	89	1	534
1927	32	61	47	16	61	33	0	0	0	118	124	235	727
1928	6	57	127	106	42	13	0	0	120	21	73	66	631
1929	6	54	44	65	24	6	33	0	45	21	62	51	410
1930	85	39	45	129	19	157	6	0	4	5	54	57	599
1931	49	6	189	27	13	0	0	0	17	130	70	6	507
1932	52	54	119	42	9	13	0	0	79	31	155	146	700
1933	130	46	93	11	22	21	4	0	0	114	105	88	634
1934	3	14	52	110	2	0	0	0	0	0	116	83	380
1935	0	23	25	23	72	7	0	0	0	57	53	11	271
1936	170	175	252	95	121	6	0	0	0	37	51	23	930
1937	203	18	93	48	1	0	0	0	1	147	59	34	604
1938	2	5	12	37	43	0	0	0	49	9	33	119	309
1939	102	41	30	25	2	48	0	0	67	251	80	120	766
1940	140	30	82	7	31	17	0	17	22	85	56	21	508
1941	216	122	44	89	10	7	0	6	49	18	146	23	730
1942	37	29	124	129	8	0	4	0	14	129	34	56	564
1943	21	4	96	31	8	0	0	0	28	32	12	96	328
1944	2	83	46	81	18	4	6	47	20	32	36	18	393
1945	69	0	51	0	10	31	4	0	0	44	135	135	479
1946	56	40	118	67	142	1	0	0	4	35	37	30	530
1947	124	262	163	9	8	0	0	0	60	66	86	46	824
1948	168	89	12	74	96	1	0	3	0	23	1	108	575
1949	5	1	56	69	7	15	7	0	121	0	57	85	423
1950	49	31	67	7	77	0	2	0	67	12	52	118	482
1951	57	96	127	40	20	4	0	0	16	17	195	41	613
1952	45	21	148	33	87	46	0	18	18	78	29	44	567
1953	43	49	63	170	2	6	0	0	5	39	12	99	488
1954	28	30	75	40	8	1	0	0	0	12	35	63	292
1955	147	95	79	3	27	0	1	0	10	152	93	65	672
1956	54	48	159	81	0	0	0	25	15	19	47	42	490
1957	16	43	32	100	28	28	1	0	41	52	79	33	453
1958	46	10	92	24	10	1	0	14	1	35	34	319	586
1959	34	41	58	20	108	0	0	0	12	54	78	42	447
1960	95	255	120	29	51	15	0	0	11	286	100	42	1004
1961	21	0	94	50	82	2	14	0	30	30	364	140	827
1962	136	37	166	84	43	45	0	0	19	126	26	160	842
1963	240	120	41	82	18	38	0	0	20	7	178	257	1001
1964	22	178	78	47	24	5	0	0	16	0	79	96	545
1965	57	76	56	0	2	7	0	0	78	158	101	35	570
1966	76	105	0	66	3	18	0	1	30	88	61	4	452
1967	60	71	48	31	34	10	0	3	4	105	115	13	494
1968	0	193	71	51	27	14	0	0	3	31	144	54	588
1969	226	201	177	23	38	38	0	0	34	82	142	26	987
1970	330	36	26	31	19	86	0	0	0	33	47	98	706
1971	95	0	38	177	128	22	0	52	1	15	3	31	562
1972	157	130	104	19	17	3	1	0	38	162	28	103	762
1973	51	9	39	5	77	11	0	5	0	16	44	88	345
1974	28	41	65	95	4	25	0	0	0	8	29	29	324
1975	77	98	109	38	41	4	0	0	4	0	9	126	506

Tabla Ap.A2.– Registro pluviométrico de la estación de Tablada–Sevilla (continuación).

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	P (mm)
1976	23	61	91	107	40	2	0	8	75	72	63	218	760
1977	115	95	10	0	0	19	0	2	0	86	145	122	594
1978	9	120	27	110	46	45	0	0	3	49	25	117	551
1979	165	179	73	22	0	1	5	0	3	154	2	16	620
1980	37	32	37	32	62	0	0	2	40	61	103	0	406
1981	0	7	31	66	20	5	0	0	32	6	0	133	300
1982	92	27	50	29	0	0	5	17	10	3	119	24	376
1983	0	18	7	72	6	0	0	2	0	10	279	99	493
1984	20	27	60	44	35	61	0	0	0	17	180	12	456
1985	170	74	6	91	26	25	0	0	0	0	56	123	571
1986	32	67	74	63	10	1	0	0	15	77	61	28	428
1987	156	91	18	50	0	0	29	53	21	114	63	254	849
1988	126	23	2	13	117	44	1	0	0	85	120	0	531
1989	33	1	13	78	12	0	0	10	24	106	280	252	809
1990	93	1	12	126	0	0	0	0	1	108	61	26	428
1991	19,8	115,7	126,3	36,2	12,2	9,6	6,8	0,1	29,4	128,1	24,8	44	553
1992	2,2	50,4	24,4	52,3	23,1	50,8	0	1,5	26,7	91,7	22	19,1	364
1993	19,9	24,7	42,2	91,2	73,4	2,9	0	0,4	8,2	94,7	58,6	0,8	417
1994	67,3	46,2	1,1	30,6	47,1	0,2	0	0	1,5	50,9	90,6	18,3	354
1995	40,7	53,1	6,2	20,7	5,7	13,9	0,4	0	21,7	16,8	129	328,8	637
1996	381	28,3	33,9	34	95	0	0,1	0	44,1	23,9	91	395,2	1127
1997	163,8	0	0	53,7	20,1	22,5	1	3,9	48,1	56,9	243,9	197,6	812
1998	73,2	93,9	33,4	34,8	74,6	14,8	0	0	69,8	2,5	9,6	34,9	442
1999	23,9	12,9	17,6	27,2	22,5	0	0,7	1,4	62,9	323,9	3,7	38	535
2000	30,4	0	31,8	127,7	46,7	0,2	0	0	6,2	33,2	76,3	217,1	570
2001	216	28,2	212,9	3	24,5	0,6	0,1	0	98,8	82,5	105,2	76,9	849
2002	58	5,9	80,1	63,9	14,6	1	0	0	108	25,8	170,9	124,7	653
2003	63,5	62,1	61,7	82,1	1,4	1,2	0	0	23,6	296,9	107,8	173	873
2004	7,4	96,8	75,1	54,6	54,8	0	0	7,1	0,1	115,4	15	17,6	444
2005	0,6	53	22,1	6,2	29,1	0,3	0	0	0	108,6	23,3	33,2	276
Valor medio anual													576,7
Desviación típica interanual													183,9
Coficiente de variación													0,32

Tabla Ap.A3.– Registro pluviométrico de la estación de Sevilla–Iglesia de la Anunciación (Clave 5787 D).

Año	P(mm)	Año	P(mm)
1866	341,0	1915	596,0
1869	431,6	1916	807,1
1870	285,9	1917	543,8
1871	317,0	1918	521,2
1872	368,7	1919	725,6
1873	255,9	1920	559,4
1874	158,6	1921	406,0
1875	294,5	1922	506,9
1876	668,0	1923	548,8
1877	454,5	1924	694,9
1878	550,1	1925	568,6
1879	680,0	1926	587,5
1880	386,0	1927	688,8
1881	880,0	1928	619,8
1882	252,0	1929	389,7
1883	603,0	1930	621,4
1884	336,0	1951	696,7
1885	817,0	1952	607,7
1886	408,0	1953	571,9
1887	618,0	1954	251,0
1888	728,0	1955	720,4
1889	473,0	1956	404,7
1890	503,0	1957	441,5
1891	662,0	1958	568,7
1892	804,0	1959	515,2
1893	648,0	1960	775,9
1894	746,0	1961	804,1
1895	1063,0	1962	904,8
1896	405,0	1963	1025,1
1897	616,0	1964	434,8
1898	343,0	1965	531,3
1899	528,0	1966	408,2
1900	657,0	Valor medio anual	524,7
1901	504,0	Desviación típica interanual	191,1
1902	880,0	Coefficiente de variación	0,4
1903	356,7		
1904	499,9		
1905	400,3		
1906	370,0		
1907	438,0		
1908	471,0		
1909	705,0		
1910	517,0		
1911	623,0		
1912	441,0		
1913	627,2		
1914	544,6		

Tabla Ap.A4.– Serie pluviométrica anual reconstituida de la estación Sevilla–
 Tablada para el periodo 1866–2005. Datos en mm/año.

Año	P (mm)	Año	P (mm)	Año	P (mm)
1866	343	1921	409	1974	324
1869	434	1922	544	1975	506
1870	288	1923	614	1976	760
1871	319	1924	667	1977	594
1872	371	1925	577	1978	551
1873	258	1926	534	1979	620
1874	160	1927	727	1980	406
1875	296	1928	631	1981	300
1876	672	1929	410	1982	376
1877	457	1930	599	1983	493
1878	554	1931	507	1984	456
1879	684	1932	700	1985	571
1880	389	1933	634	1986	428
1881	886	1934	380	1987	849
1882	254	1935	271	1988	531
1883	607	1936	930	1989	809
1884	338	1937	604	1990	428
1885	822	1938	309	1991	553
1886	411	1939	766	1992	364
1887	622	1940	508	1993	417
1888	733	1941	730	1994	354
1889	476	1942	564	1995	637
1890	506	1943	328	1996	1127
1891	666	1944	393	1997	812
1892	809	1945	479	1998	442
1893	652	1946	530	1999	535
1894	751	1947	824	2000	570
1895	1070	1948	575	2001	849
1896	408	1949	423	2002	653
1897	620	1950	482	2003	873
1898	345	1951	613	2004	444
1899	531	1952	567	2005	276
1900	661	1953	488		
1901	507	1954	292		
1902	886	1955	672		
1903	359	1956	490		
1904	503	1957	453		
1905	403	1958	586		
1906	372	1959	447		
1907	441	1960	1004		
1908	474	1961	827		
1909	710	1962	842		
1910	520	1963	1001		
1911	627	1964	545		
1912	444	1965	570		
1913	631	1966	452		
1914	548	1967	494		
1915	600	1968	588		
1916	812	1969	987		
1917	547	1970	706		
1918	525	1971	562		
1919	730	1972	762		
1920	563	1973	345		