

# Gestión de los recursos hídricos subterráneos en el entorno de Doñana con el apoyo del modelo matemático del acuífero Almonte-Marismas

C. Guardiola-Albert<sup>(1)</sup>, N. García Bravo<sup>(1)</sup>, C. Mediavilla<sup>(2)</sup> y M. Martín Machuca<sup>(2)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España. C/ Ríos Rosas, 23. 28003. Madrid  
c.guardiola@igme.es, natalia.garcia@cedex.es

(2) Oficina de Proyecto del Instituto Geológico y Minero de España en Sevilla. Plaza de España – Torre Norte. 41013. Sevilla.  
mediavilla@igme.es, m.martin@igme.es

## RESUMEN

El IGME ha desarrollado desde los años 70 numerosas investigaciones de índole hidrogeológica en el acuífero Almonte-Marismas, dentro del cual se enmarca el Espacio Natural de Doñana. El modelo matemático del acuífero Almonte-Marismas es la herramienta que aúna los resultados obtenidos a raíz de ese enorme trabajo investigador. El presente artículo quiere mostrar algunas de las principales características de los estudios relacionados con el modelo matemático, tanto en lo que respecta al estado actual de conocimiento del sistema acuífero a través del modelo, como a los resultados de algunas de las simulaciones realizadas con fines de gestión hídrica. En concreto, se muestran y analizan los resultados de la comparación de distintas hipótesis climáticas a las que se puede ver sometida la zona, así como de la evaluación de actuaciones que implican la modificación de las extracciones del acuífero.

Palabras clave: Doñana, gestión hídrica, humedal, modelo matemático

## ***Management of groundwater resources in the Doñana area with the support of the Almonte-Marismas aquifer mathematical model***

### ABSTRACT

*Numerous investigation of hydrogeological nature has been developed by the IGME since the seventies at the Almonte-Marismas aquifer, which hosts the Doñana National Park. The Doñana wetlands are important because of their ecological biodiversity. The mathematical model of Almonte-Marismas aquifer is the tool that integrates the results obtained from such long record of investigations. This paper summarizes the main characteristics of the studies related to the mathematical model, with regard to the present state of understanding of the groundwater system through the model and the results of some simulations performed with aims of water management.*

*Key words: Doñana, hydrological management, mathematical model, wetland*

## Introducción

Doñana es bien conocido por el gran interés ecológico asociado a sus ecosistemas de las marismas y la continua presión de las actividades agrícolas, industriales y turísticas que permiten a los habitantes de la zona desarrollarse económicamente. En las áreas lagunares el descenso del nivel freático se traduce en el cambio progresivo de la superficie y comportamiento de las propias lagunas (Hollis *et al.*, 1989, Suso y Llamas, 1993), de su vegetación asociada (Muñoz Reinoso, 1995), así como de la vegetación de raíces penetrantes de tipo freatófitico (Sousa Martín, 2004). Esta alteración de los humedales presentes en Doñana por actividades naturales o antropogénicas

es una de las grandes preocupaciones de los gestores, los investigadores y de la sociedad en general. Para entender estos cambios es necesario poseer un conocimiento de cómo los humedales se relacionan con los niveles freáticos (Manzano, 1999, Custodio, 2000, Lozano, 2004).

Aunque es muy difícil medir de forma precisa la naturaleza y extensión de cualquier interacción entre las aguas subterráneas y los humedales, hay una serie de técnicas con las que se puede abordar esta interacción. Una de las técnicas que se ha caracterizado por ser una gran ayuda para comprobar la importancia del acuífero sobre el humedal es la utilización de los modelos matemáticos (Boswell *et al.*, 2007, Krasnostein y Oldham, 2004). Un modelo es

una herramienta muy poderosa para integrar todos los datos disponibles, confirmar el modelo conceptual del sistema del acuífero y predecir los niveles freáticos y la transferencia de flujos entorno a las áreas húmedas de interés.

Cuando la FAO en los años 70 (Mortier *et al.*, 1970), a través del Plan de Transformación Agraria Almonte-Marismas, quiso introducir grandes superficies de regadío en la zona, empezó a trabajar con modelos para estimar la situación óptima de los sondeos de explotación y cómo iba a verse afectado el acuífero con esas extracciones. Ese primer modelo (IGME, 1976, Lucena y García, 1978) se ha ido mejorando con el conocimiento adquirido en estas cuatro décadas y se ha ido adaptando a las nuevas tecnologías y a códigos mucho más amigables que han ido surgiendo en el mercado (IGME, 1982, Virgós *et al.*, 1983, Virgós y Martín Machuca, 1995, UPC, 1999, Ledesma *et al.*, 1999, Guardiola *et al.*, 2004, 2005). A pesar de la gran utilidad demostrada por el modelo, de la repetida reclamación por expertos conocedores de la zona del uso de los modelos matemáticos de aguas subterráneas en la gestión de Doñana (Manzano, 1999, Sahuquillo, 2002, Custodio *et al.*, 2008) y la amplia utilización de los modelos en zonas de interés ecológico similares (Caldwell *et al.*, 2007, Krause *et al.*, 2007, Baird *et al.*, 2005), hoy en día el uso del modelo matemático como herramienta de gestión sigue siendo escaso.

El IGME, desde los primeros modelos del acuífero Almonte-Marismas, ha sido el encargado o colaborador de las actualizaciones y aplicaciones del mismo. En este artículo se quiere mostrar el modelo que actualmente mantiene operativo el IGME, haciendo hincapié sobre sus aportes a la mejora en la gestión de los recursos hídricos de Doñana, ya que puede responder a la preocupación de las autoridades sobre el estrés hídrico que sufre el acuífero Almonte-Marismas y el impacto que tiene este estrés sobre el nivel freático y la salud del ecosistema autóctono.

En este trabajo se presentan las características más relevantes del modelo matemático del acuífero Almonte-Marismas actualizado, centrándose en las mejoras y modificaciones con respecto a versiones anteriores del modelo. Así mismo, se incluyen dos estudios sobre las aplicaciones del modelo: análisis de impacto bajo distintos escenarios climáticos y evaluación de los efectos causados por una actuación concreta para mejorar el abastecimiento urbano.

## Marco físico

El área de Doñana se localiza en el sur-suroeste de la Península Ibérica (Figura 1). La zona de estudio se

encuentra situada dentro de las provincias de Huelva y Sevilla. El relieve presenta elevaciones que superan los 150 m en el sector norte, con una pendiente regional hacia el sur, alcanzándose en la marisma cotas menores de 1 m. Hacia el sur aparecen los terrenos elevados correspondientes al manto eólico, que conforman un cordón costero de tipo acantilado.

Desde el punto de vista hidrográfico, los ríos y arroyos discurren desde las regiones elevadas del norte hacia la marisma. Así lo hace el río Guadiamar, eje drenante de una compleja y extensa cuenca de recepción, al cual confluyen los arroyos que bajan desde las elevaciones del Aljarafe por el este y los arroyos del Gato y Alcarayón (entre otros menores) por el oeste. Por su parte, los arroyos que bajan desde las elevaciones de Almonte, al noroeste, son tributarios del arroyo de La Rocina, de curso aproximado oeste-este, también en dirección a la marisma. Tanto las aguas provenientes del complejo sistema hidrográfico del Guadiamar, como las aportaciones provenientes de los arroyos de La Rocina y Del Partido, además de las precipitaciones, originan la inundación de la marisma.

En este contexto se encuentra situado el Espacio Natural de Doñana que comprende tres grandes ecosistemas: arenas estabilizadas o cotos, cordón litoral de dunas móviles y la marisma. La zona de contacto entre las arenas y la marisma constituye el ecotono de La Vera-Retuerta, de gran importancia ecológica e hidrogeológica.

Gran parte de la zona de estudio está cubierta por pinos recientes, aunque a mediados del siglo XX se introdujo una gran cantidad de eucaliptos para su aprovechamiento económico. Junto con esta actuación el aumento de las extracciones para abastecimiento urbano y agrícola tuvieron como consecuencia una disminución del nivel piezométrico de la zona. Para conseguir una recuperación de los niveles piezométricos, a mediados de los años 90 se empezaron a talar las zonas de eucaliptos, actividad que hoy en día está prácticamente concluida en las áreas protegidas.

A parte de la transformación ecológica de la zona, también hay que tener en cuenta que la marisma ha sufrido desde finales del siglo XIX otra serie de acciones de la mano del hombre que cambiaron significativamente el medio natural. La extensión de la marisma ha pasado de 140.000 ha a finales del siglo XIX a las 30.000 ha que hoy en día permanecen en estado semivirgen (Rodríguez Ramírez, *et al.*, 2005).

Los primeros estudios realizados a nivel regional para el conocimiento del modelo geológico del Bajo Guadalquivir se basaron en los sondeos profundos de prospección de hidrocarburos (Perconig, 1960-62 y Viguier, 1974). En el entorno de Doñana, esta infor-

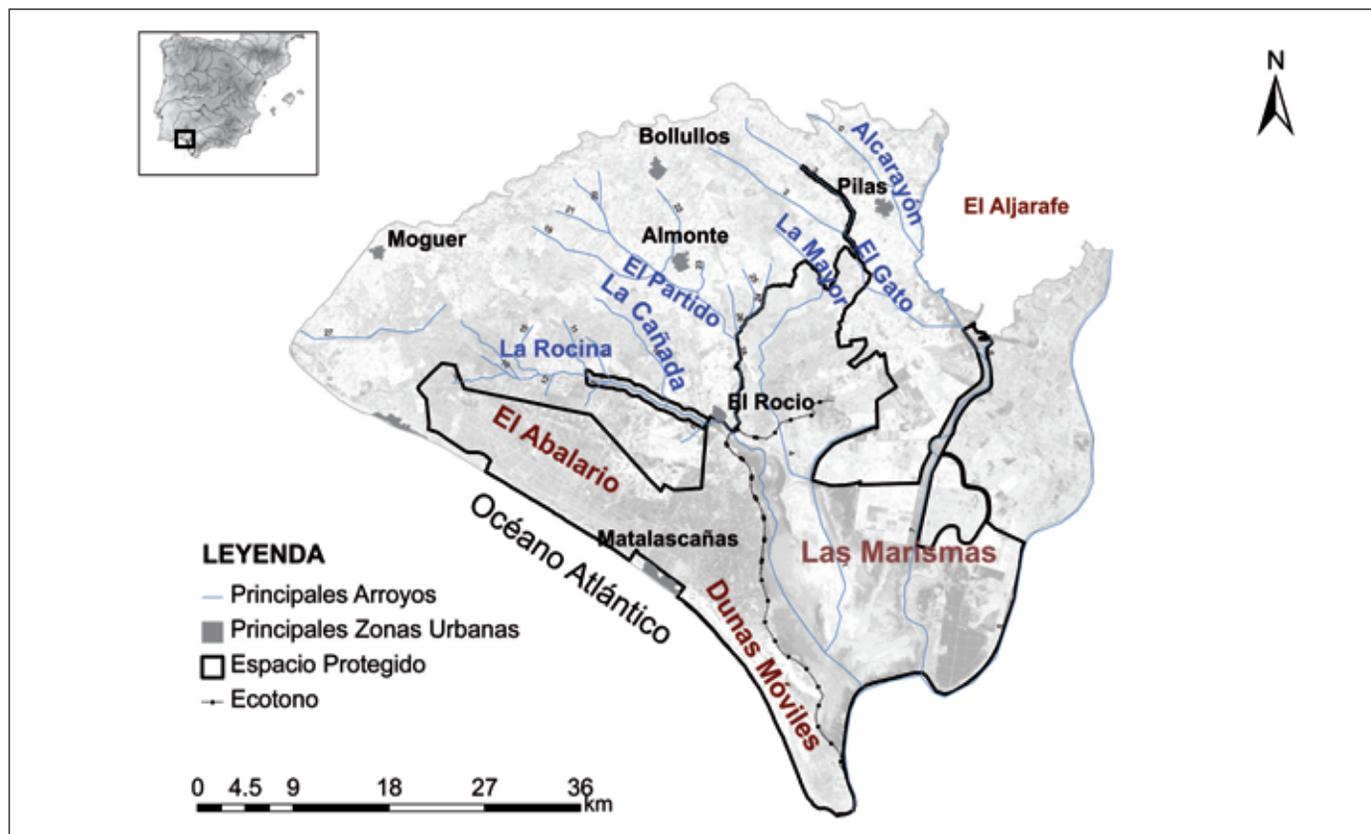


Figura 1. Mapa de localización del sistema acuífero Almonte-Marismas. Límites de la zona de estudio y situación de los diferentes tipos de paisaje: marismas, arenas estabilizadas, dunas móviles y ecotono entre el manto eólico y las marismas  
 Figure 1. Location map of the Almonte-Marismas aquifer. Limits of the study area and location of different landscapes: marshland, stabilized sands, moving dunes and ecotone between sands and marshes

mación básica se vio complementada por el desarrollo del Proyecto hidrogeológico FAO-Guadalquivir, iniciado en la década de los 60 con una intensa participación del IGME, y con los posteriores trabajos de ejecución de sondeos contemplados en el Proyecto Plan Transformación de la zona Regable Almonte-Marismas, desarrollado por el IRYDA en la década de años 70. Como resultado de esa primera fase de investigación se estableció un primer esquema geológico del subsuelo, con una concepción eminentemente hidrogeológica, donde ya se puso de manifiesto la complejidad geológica de la zona. Posteriores trabajos descriptivos del medio geológico a partir de la muestra destructiva de los sondeos realizados hasta entonces, donde se incluyen los financiados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir en la década de los 90 para completar las redes de control hidrogeológico en el acuífero de Doñana, han puesto de manifiesto un modelo litoestratigráfico conceptual de cuatro unidades detríticas plio-cuaternarias: Deltáica, Aluvial, Eólica y Marismas (Salvany y Custodio, 1995).

### Modelo hidrogeológico conceptual

El sistema acuífero Almonte-Marismas está situado en la cuenca del Bajo Guadalquivir, que constituye la parte sur occidental de la cuenca terciaria del Guadalquivir, alargada de suroeste a noreste y limitada por la Cordillera Bética al sur y el Macizo Ibérico al norte. El sistema acuífero Almonte-Marismas está constituido por las series detríticas miopliocenas y cuaternarias: limos, arenas basales y gravas, y arenas eólicas (Figura 2). Estos materiales afloran al oeste y norte de la marisma pero bajo ésta se hunden progresivamente en dirección sureste, quedando cubiertos por las arcillas de estuario y marisma.

A grandes rasgos, este sistema acuífero está formado por un acuífero detrítico libre, donde los materiales permeables afloran, y otro bajo la marisma, confinado bajo los materiales de baja conductividad hidráulica. Esta parte confinada del acuífero contiene agua salina atrapada durante la deposición de los sedimentos holocenos, que se desplaza por flujos verticales (Rodríguez Arévalo, 1988). Ambos acuífe-

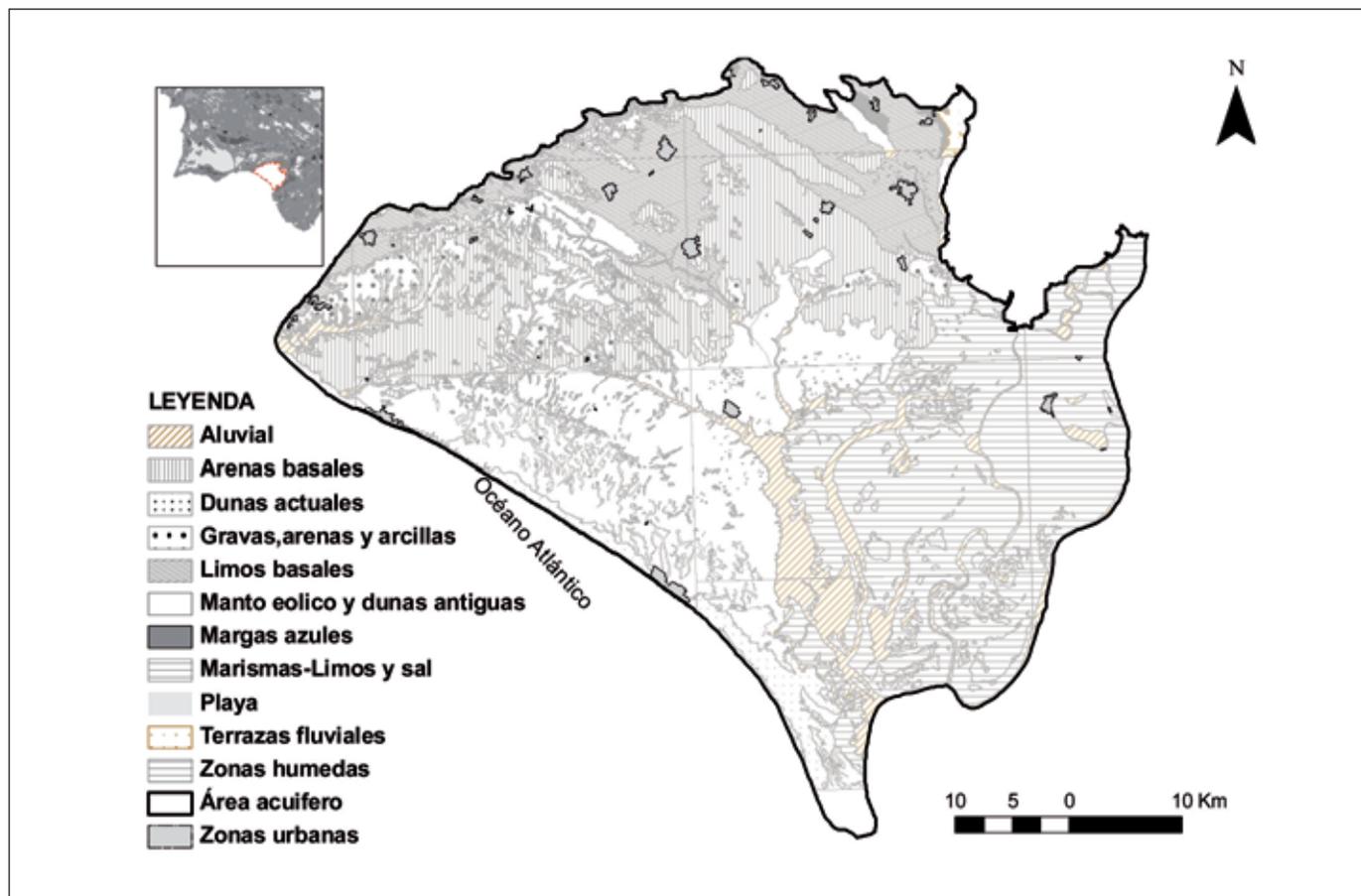


Figura 2. Distribución espacial de los dominios hidrogeológicos definidos en la zona  
 Figure 2. Spatial distribution of hydrogeological domains defined in the study area

ros están en continuidad lateral y la transición entre uno y otro tiene un comportamiento semiconfinado por las arenas medias y finas menos permeables que la parte profunda, con materiales más groseros y permeables (Custodio, 1995). El espesor del acuífero libre varía de norte a sur, desde unos 15 m hasta superar los 150 m en la zona de Matalascañas. El acuífero confinado, en su contacto septentrional con las arenas, tiene un espesor de 50 m, llegando a superar los 200 m en sus límites meridionales. En el acuífero libre, la piezometría del estado estacionario se adapta a la topografía del terreno y en general la profundidad hasta el agua es inferior a 10 m. El sistema acuífero tiene como sustrato general, de baja permeabilidad, las margas azules del Mioceno Superior. Sus límites hidrogeológicos vienen definidos, al norte por el río Tinto y los afloramientos de margas impermeables que discurren próximas y paralelas a la autovía de Sevilla-Huelva, al este y sureste por el río Guadalquivir, y al sur y suroeste por el océano Atlántico.

Según IGME (1992) la transmisividad del acuífero aumenta de norte a sur, con valores medios entre 100 m<sup>2</sup>/d (Almonte) y 3000 m<sup>2</sup>/d (bajo la marisma). En el acuífero libre la porosidad eficaz varía entre 2% y 5%, y en el confinado el coeficiente de almacenamiento está comprendido entre 10<sup>-3</sup> y 10<sup>-4</sup>.

La mayor parte de la recarga natural se produce por infiltración directa de la lluvia caída en las zonas en que el acuífero presenta un carácter libre, según IGME (1992) se estima en 200 hm<sup>3</sup>/a. En menor medida se recarga por los excedentes de riego, considerándose una gran parte de dichos excedentes proceden del propio acuífero, no suponiendo, por tanto, un incremento de recursos sino una reutilización. En la franja litoral la recarga es muy importante, y los flujos subterráneos se dirigen en parte al océano Atlántico, y en parte hacia el Arroyo de La Rocina y las marismas. El acuífero bajo la marisma se alimenta por transferencia lateral de agua subterránea desde los afloramientos arenosos. El agua subterránea circula en dirección noroeste-sur-este.

La descarga del acuífero tiene lugar a través de los siguientes procesos:

- La salida al mar se realiza a través de un frente de longitud definida por el límite del acuífero con el mar y de espesor igual al del propio acuífero por debajo del nivel del mar o algo mayor. La salida al mar desde la marisma podría darse a través de una estrecha franja alrededor de la desembocadura del Guadalquivir (IGME, 1992).
- Drenaje a los ríos y arroyos principales, tales como Alcarayón, El Gato, y La Rocina, y sus afluentes hacia el sur, a los ríos como Guadiamar al norte o el Tinto al suroeste.
- Pérdidas por evapotranspiración, principalmente, en aquellas zonas donde la profundidad del nivel freático es inferior a 2 ó 3 m.
- Extracción por bombeo a través de pozos.
- En el contacto de las dunas con las marismas hay numerosos puntos de descarga. Se trata aquí de dunas vivas que están cabalgando parcialmente sobre la capa de arcilla (ecotono La Vera-Retuerta) (Rodríguez Arévalo y Llamas, 1986).
- La descarga de aguas subterráneas es uno de los aportes de agua que inundan la marisma durante el invierno. Una parte del agua subterránea que llega al borde de la marisma no descarga a través de los ecotonos sino que sigue fluyendo bajo la marisma. Buena parte de esta agua descarga hacia la superficie de la marisma por flujos ascendentes a través de las arcillas. Sin embargo, esta situación se ha modificado ligeramente en el sector noreste de la marisma debido a las fuertes extracciones de agua subterránea de los últimos años.

En su sector más nororiental el acuífero entra en contacto con el aluvial del río Guadiamar, entre el Vado de la Quema y el entorno del Arroyo de la Cigüeña. En condiciones naturales de flujo, a lo largo de esta franja el río está encajado y drena al acuífero de Almonte-Marismas por su margen derecha y al de Aljarafe por su izquierda (IGME, 1982), ambos formados por los mismos materiales, arenas carbonatadas del Cuaternario inferior. En cambio, la situación habitual en los últimos años es que los niveles freáticos y piezométricos en ambas márgenes del río en el entorno de la finca La Tiesa estén por debajo del cauce del Guadiamar, debido a los bombeos agrícolas en la zona. Esto ocasiona que el flujo del agua subterránea se invierta y sea el río el que recargue al acuífero (UPC, 1999).

En la zona de El Abalarío la superficie freática aún refleja bastante bien la topografía de la zona y forma un domo piezométrico cuyo eje pasa por El Abalarío

y se sitúa paralelo a la costa. En torno al río Tinto, el eje cambia de orientación hacia la desembocadura del mismo. Las bajas conductividades hidráulicas de las arenas eólicas (Trick, 1998) juegan un importante papel en la existencia del citado domo. En esta zona existen evidencias medidas de gradientes verticales (Trick, 1998), con diferencias de nivel entre el acuífero superficial y el profundo de varios metros.

Los límites del modelo propiamente dicho se han definido teniendo en cuenta los rasgos de relevancia hidrogeológica descritos. El límite norte es el afloramiento de las margas azules, que coincide prácticamente con la carretera que une Huelva con Sevilla. Por el suroeste el dominio tiene como límite el océano Atlántico mientras que el límite sureste está marcado por Las Béticas y el este por el río Guadalquivir. Al noreste los límites vienen definidos por el río Guadiamar y el contacto con el acuífero del Aljarafe.

#### **Simulación numérica del flujo subterráneo en el acuífero Almonte-Marismas**

El modelo con el que se ha trabajado en los resultados descritos en este artículo comprende todo el acuífero Almonte-Marismas, excluyendo el acuífero del Aljarafe. El código numérico utilizado ha sido el Modflow, que es un código matemático de diferencias finitas tridimensional que fue desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (McDonald y Harbaugh, 1988). En concreto se ha empleado la versión de Visual Modflow 4.3 actualmente comercializada por Schlumberger. El área modelada está discretizada en dos capas, 174 filas y 154 columnas con un tamaño uniforme de celda de 500 x 500 m. La definición de dos capas horizontales se ha utilizado para representar los distintos comportamientos hidrogeológicos del acuífero. Los valores de permeabilidad varían entre 0,001 y 50 m/d. Las condiciones de contorno fueron establecidas coincidentes con los bordes del acuífero. Al norte se sitúa un borde a caudal de salida constante correspondiente al drenaje norte de los relieves. Al noreste existe por un lado el contacto con el acuífero conocido como El Aljarafe, del cual no se dispone de información suficiente sobre su geometría ni sobre las captaciones existentes. Esto ha motivado que el contacto con este acuífero se considere como caudal constante de entrada, que se ha calculado en función de los niveles piezométricos históricos. El contacto con el río Guadiamar, situado al noreste se ha aproximado con celdas tipo río. En la parte oeste del acuífero se encuentra el río Guadalquivir, cuyo contacto con el acuífero se considera inapreciable, por lo que se aproxima este borde

como condición de contorno impermeable. Todo el contacto al sur con el océano Atlántico se ha aproximado como celdas de altura piezométrica constante sin tener en cuenta el efecto de las mareas, situando además celdas tipo dren en las zonas donde se produce salida por manantiales en la zona costera. En el borde noroeste el contacto con el río Tinto se ha discretizado como celdas de tipo río. Toda el área de la marisma ha sido simulada con celdas de tipo dren. Los cursos fluviales de tipo efímero se han representado con celdas de tipo arroyo.

La actualización del modelo con respecto a versiones anteriores ha incluido, entre otras mejoras: disminución del tamaño de celda, mejora en la definición de la topografía a partir de datos de modelos digitales del terreno, aproximación de los arroyos y ríos efímeros con el paquete de Modflow denominado STREAM (Prudic, 1989), replanteamiento de los límites con el acuífero El Aljarafe, redefinición de las extracciones hasta fin del 2007 (elaboradas por la empresa NINPSA para la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir), cálculo de la recarga distribuida con el software ZOODRM (Mansour and Hughes, 2004), y recalibración del modelo hasta finales de 2007.

Inicialmente se utilizó un modelo estacionario para predefinir las condiciones iniciales, desarrollándose posteriormente un modelo transitorio en dos periodos: 1975-1997 y 1998-2007. A modo ilustrativo se presentan tres mapas de altura de nivel piezométrico resultantes de ejecutar el modelo para los meses de enero de 1975 y diciembre de 1997 y 2007 (Figura 5). Del análisis de estos tres mapas se puede concluir que incluso comparando épocas en las que no existen riegos importantes (diciembre o enero), se observa un claro descenso de los niveles a mediados de los años 90, sobretodo en la zona de la marisma. Estos niveles se ven algo recuperados en la actualidad, aunque siguen sin alcanzar los valores que se daban antes de que existiera una agricultura de regadío intensivo en la zona. El modelo se ha calibrado con los datos de niveles piezométricos desde 1975 hasta 2007. En el proceso de calibración, las sucesivas ejecuciones del modelo hicieron evidente la necesidad de modificar levemente los valores de permeabilidad y los límites y condiciones de contorno en algunas zonas, para perfeccionar el esquema original, pero sin alterarlo sustancialmente.

Para evaluar la bondad de la calibración del modelo se han utilizado los siguientes parámetros: error medio (EM), error medio absoluto (EMA) y raíz media del error cuadrático (RMC), o esta última normalizada. Anderson y Woessner (1992) consideran que los errores son aceptables y se ha logrado una buena calibración si los valores de EM y RMC normalizada

son inferiores a 0,5 m y 10% respectivamente. En las simulaciones realizadas (estado estacionario y los dos periodos del transitorio) se han obtenido respectivamente los siguientes valores: EM de -0,04, -0,01 y 0,23 m, EMA de 3,33, 2,38 y 4,45 m y RMC normalizada de 2,88, 2,061 y 4,05 %. Estos valores indican que la calibración es más que aceptable. Otro parámetro indicativo de los errores de la simulación es el error del balance de masas, considerándose admisible cuando está entorno al 1 % (De Marsily, 1986). Los valores máximos de las diferencias entre las entradas y salidas obtenidos en las tres simulaciones (estacionario y los dos periodos del transitorio) son, respectivamente, 0,02, 0,15 y -3,52 %. En la simulación de 1998 a 2007 este error está algo por encima de lo deseado, pero aquí se considera aceptable dadas las dimensiones y complejidad del sistema modelado.

Tras la calibración del modelo se realizó un análisis de sensibilidad para evaluar la robustez del mismo, en cuanto a la consistencia con que se calibraron sus parámetros. El principal propósito es la identificación de aquellos parámetros que son más importantes en la determinación del comportamiento del acuífero. Para un acuífero tan complejo como el de Almonte-Marismas realizar un análisis de sensibilidad mediante la perturbación de cada uno de los parámetros es una tarea que requiere de excesiva demanda computacional, por lo que el análisis de sensibilidad se ha realizado con la ayuda del código de simulación inversa WinPest (WHI, 2002), que calcula la sensibilidad de cada parámetro con respecto a los puntos de observación. El análisis de sensibilidad se ha realizado para cada una de las zonas de conductividad del modelo (Figura 3) para el estado estacionario y transitorio. Las sensibilidades relativas obtenidas con WinPest (Figura 4) resultan de multiplicar los valores de sensibilidad por la magnitud del valor del parámetro. Son una medida de los cambios en los resultados del modelo inducidos por un cambio fraccional en el valor del parámetro.

Las sensibilidades del estado estacionario y del transitorio tienen diferentes órdenes de magnitud debido a que estos valores están ponderados por el número de observaciones, que en el caso del estado transitorio son elevadísimas en comparación con el estado estacionario. Por ello, los valores de sensibilidad en el estado estacionario son mucho más elevados que en el transitorio. Las conductividades más sensibles de las zonas 2, 10 (El Abalarío), 19 y 20 (al oeste del Guadiamar) indican que éstos son los parámetros calibrados con mayor certidumbre. Las zonas de permeabilidad menos sensibles son en general las que tienen menos área y por lo tanto menos puntos de observación.

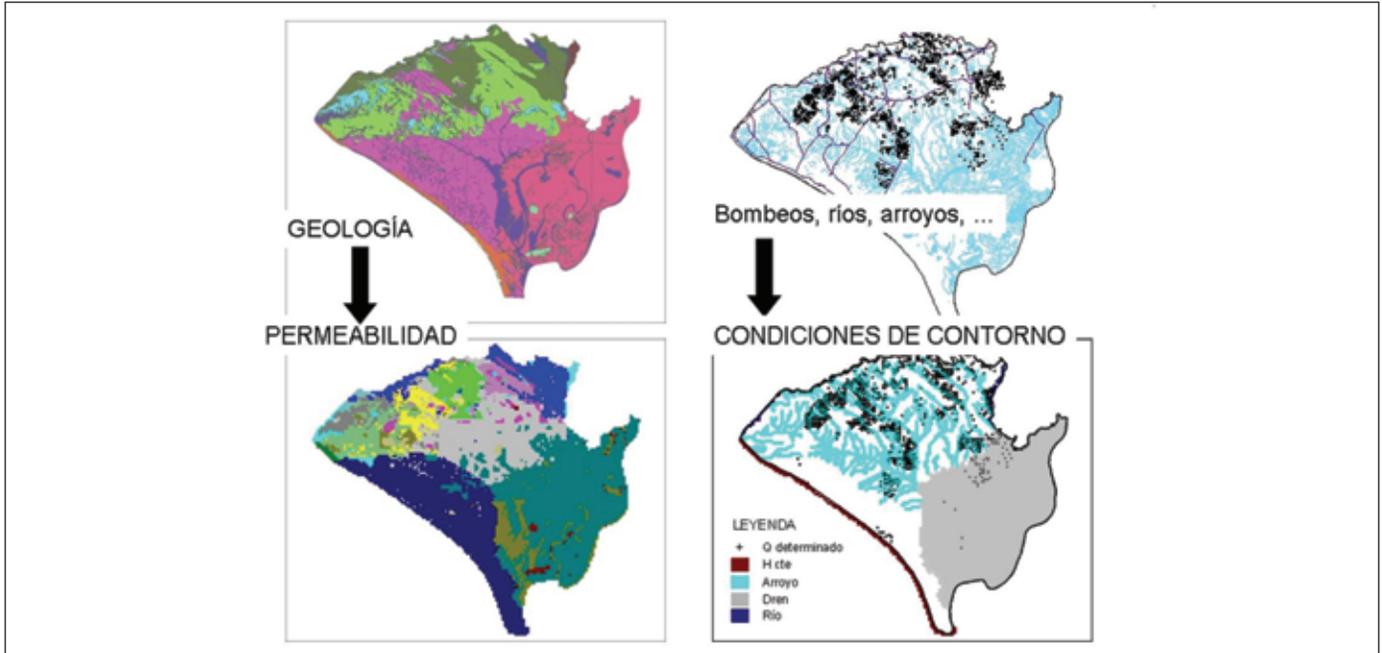


Figura 3. Geología, distribución horizontal de la permeabilidad en la capa inferior y condiciones de contorno del modelo en las dos capas  
 Figure 3. *Geology, map of horizontal permeability of the lower layer model and border conditions assigned to both layers*

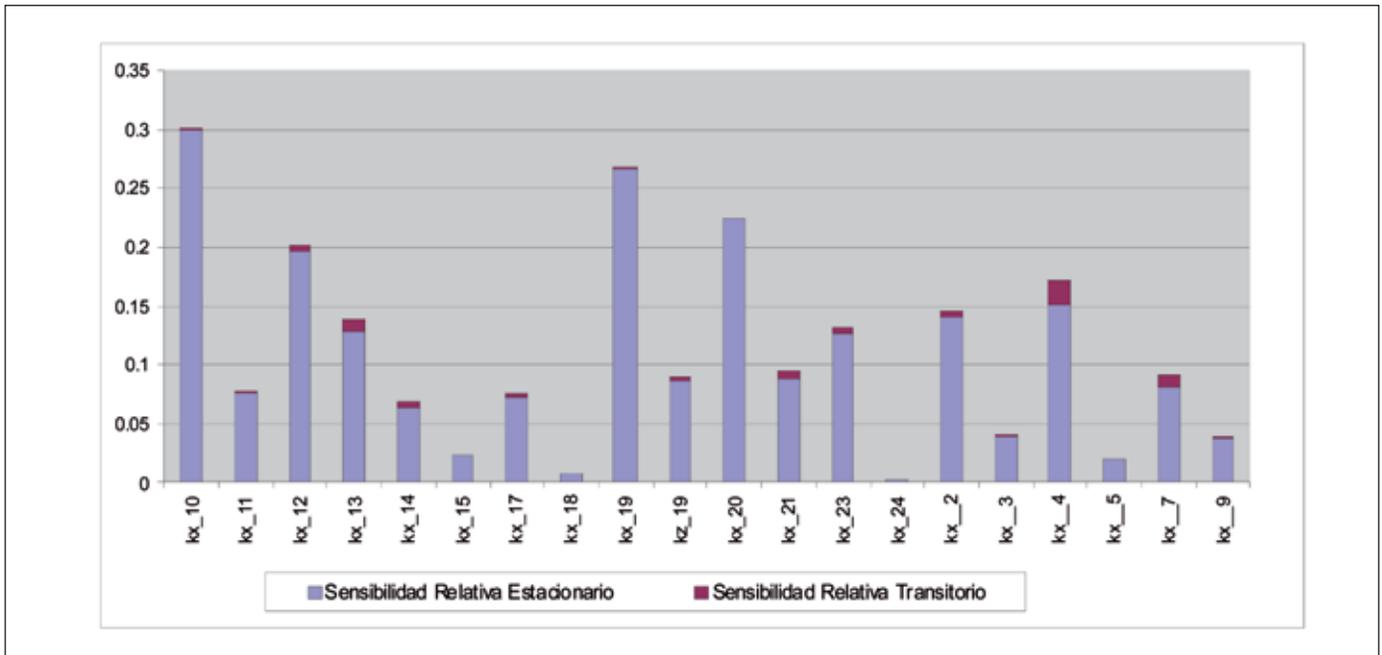


Figura 4. Valores de sensibilidad relativa de las permeabilidades (kx), calculados en los modelos estacionario y transitorio  
 Figure 4. *Permeability (kx) relative sensitivity values for steady and transient state*

Una vez conseguida una calibración satisfactoria del modelo en estado estacionario y transitorio (Figura 6), este modelo se considera adecuado como herramienta predictiva para evaluar el efecto de los

cambios en las entradas o salidas al acuífero sobre los niveles piezométricos y sobre los flujos subterráneos que alimentan ríos, arroyos y distintas zonas húmedas de interés.

### Gestión de los recursos hídricos subterráneos utilizando el modelo matemático de flujo

El agua es el elemento básico de los ecosistemas y la economía en Doñana. Las necesidades hídricas de las marismas, lagunas, arrozales, cultivos de fresas, núcleos urbanos, industrias y turismo generan importantes disputas y problemas ambientales. La explotación del acuífero de forma intensiva y no controlada puede provocar modificaciones muy relevantes para el medio natural, tales como (Custodio *et al.*, 2007, WWF/Adena, 2006):

- Disminución del llenado de la marisma, ya que éste se realiza principalmente con aportes de escorrentía de los arroyos tributarios.
- Deseccación de parte del ecotono por una menor descarga de agua del acuífero y un abatimiento del nivel freático. Esto implica la desaparición de vegetación y el cambio del régimen y modelo de humedales hipogénicos temporales y per-

manentes, así como pondría en peligro el refugio que constituye para la fauna en época estival al mantener un cierto nivel hídrico.

- Reducción del periodo de inundación y cambio de la extensión del agua inundada de los humedales hipogénicos estacionales o permanentes por abatimiento de los niveles freáticos. El vaso lagunar pasaría de ser un lugar de descarga a un lugar de infiltración de aguas pluviales, con la consecuente 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.
- Descenso de la densidad de la masa vegetal que depende directamente de un nivel elevado del acuífero para sobrevivir, así como sustitución de determinadas especies por otras menos dependientes del agua.
- Restricción o desaparición del área de distribu-

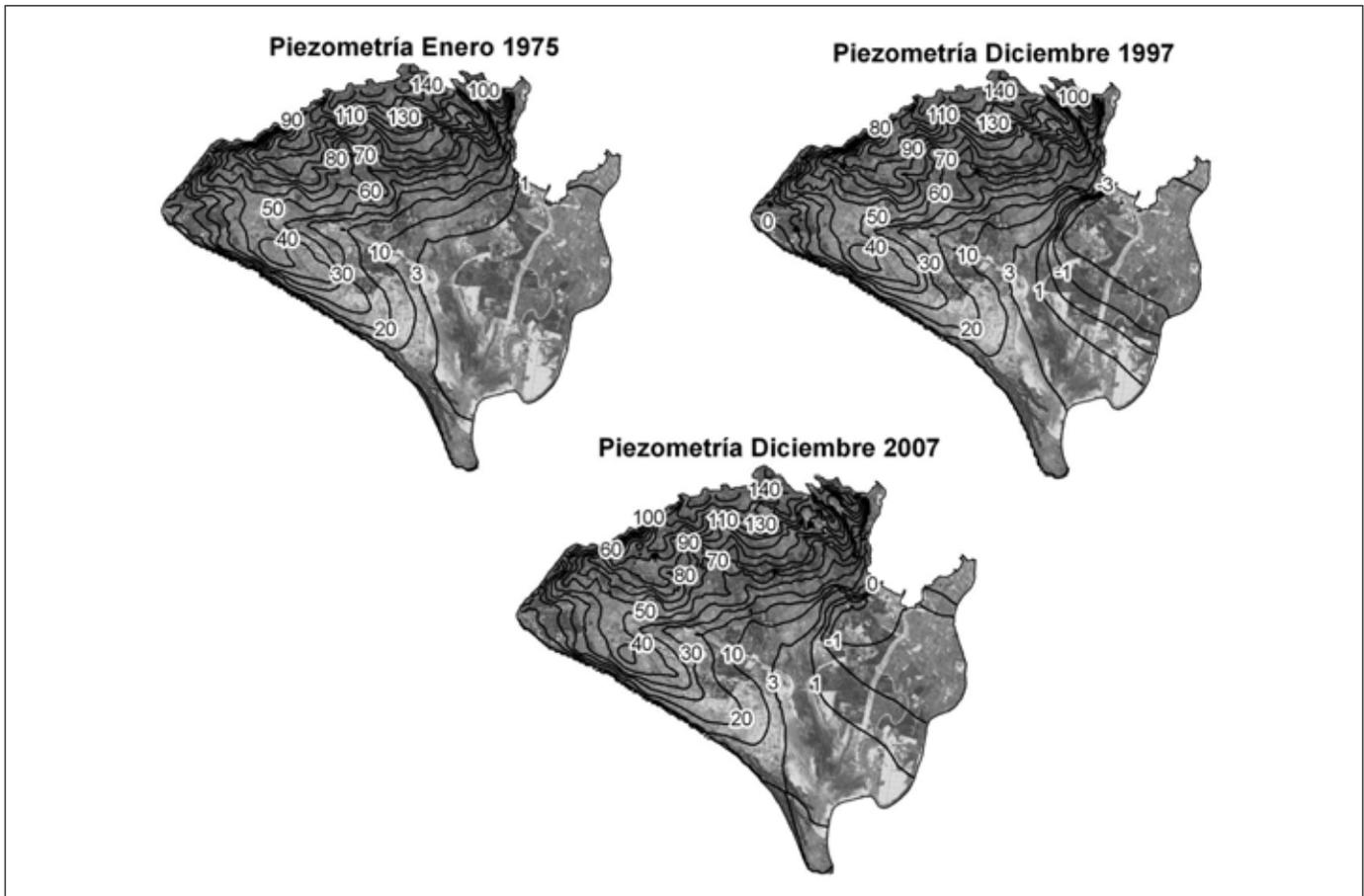


Figura 5. Altura del nivel piezométrico en la capa inferior del modelo, según la simulación numérica realizada en estado transitorio  
*Figure 5. Simulated groundwater heads in the lower layer model for the transient flow model*

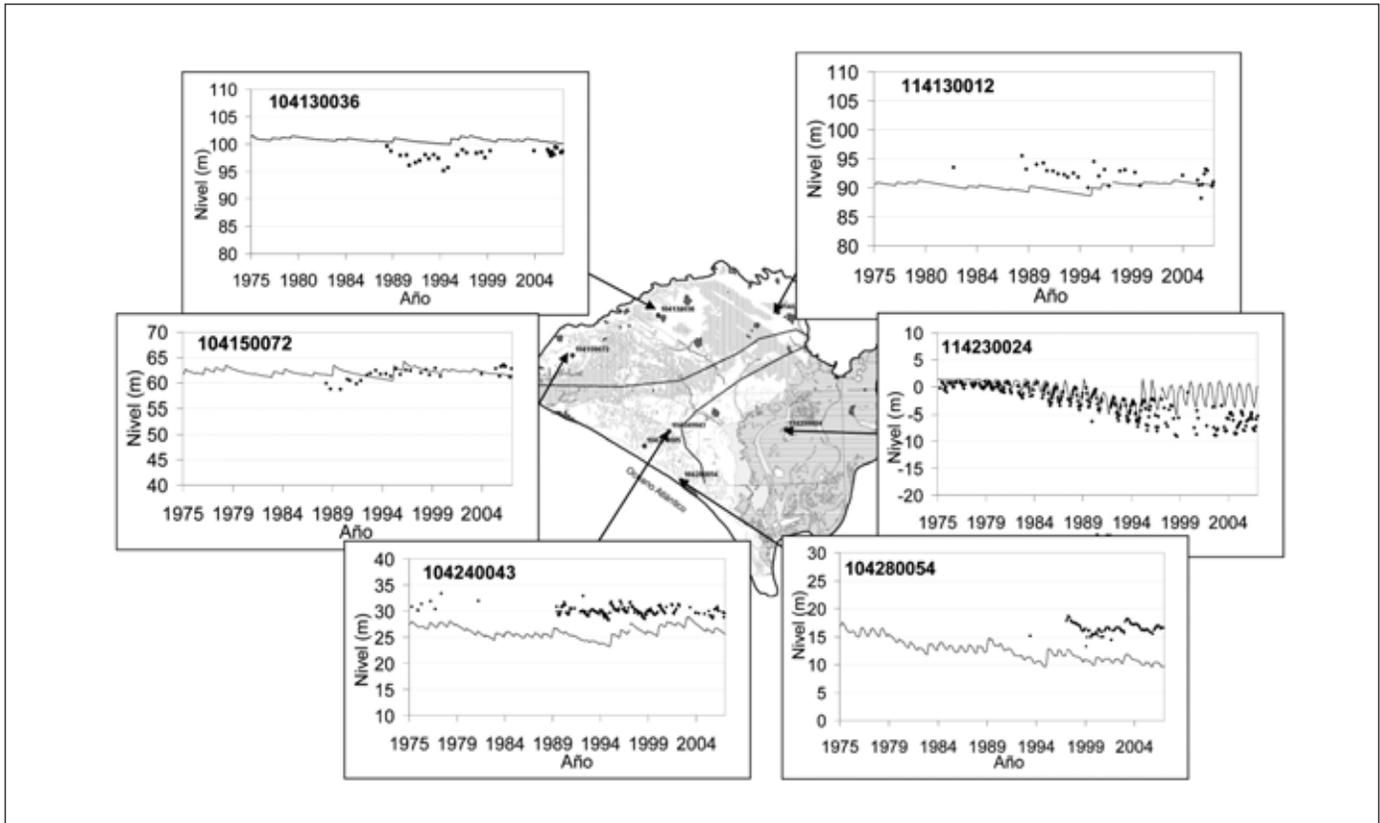


Figura 6. Comparación entre niveles piezométricos simulados y medidos en distintos puntos del acuífero  
 Figure 6. Comparison between simulated and measured heads in different points of the aquifer

ción de la vegetación herbácea debido a la mengua de agua dulce en la marisma y la desecación persistente de algunas áreas inundables.

- Consecuencia de las dos anteriores es la disminución de las posibilidades de supervivencia de determinadas especies de la fauna herbívora o de las que dependen de presas, que pueden ver disminuido su hábitat potencial.
- Aumento de la salinidad en las marismas y salinización del acuífero. El cambio de las condiciones de equilibrio con el agua salina del acuífero bajo la marisma puede producir una extensión del agua salina, que ahora impregna terrenos donde antes había agua dulce.

Teniendo en cuenta todas estas modificaciones, para la protección y mantenimiento de los ecosistemas de Doñana es necesario influir y formar parte activa de los planes y estrategias de gestión de los recursos hídricos, y de las aguas subterráneas en particular.

### **Simulación de distintas hipótesis climáticas**

Se han simulado tres supuestos climáticos, que responden a un período húmedo, uno medio y uno seco. Las simulaciones se calcularon partiendo de la piezometría del año 2004 extraída de una campaña piezométrica realizada por el IGME, más el apoyo de los datos suministrados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Se ha modelado un periodo de diez años con extracciones similares al período 1988-1997, es decir, de unos 60 hm<sup>3</sup>/a en todo el acuífero.

El período seco (caso A) se define con una recarga media de 152 hm<sup>3</sup>/a, el medio (caso B) con 189 hm<sup>3</sup>/a, y el período húmedo (caso C) con 228 hm<sup>3</sup>/a. La utilización de estos valores de recarga responden a la intención de estudiar un periodo con una recarga media. Esta recarga media está valorada en 200 hm<sup>3</sup>/a según IGME (1992) y entre 158 y 210 hm<sup>3</sup>/a según Custodio *et al.* (2007). Las otras dos situaciones hipotéticas se han calculado según si esta recarga media se reduce (período seco) o aumenta (período húme-

do) un 20%. La variación temporal de la recarga en la hipótesis climática B se ha supuesto similar a la del periodo 1988-1997.

Para comparar las diferencias de comportamiento del acuífero expuesto a las tres situaciones climáticas mencionadas se han hecho tres simulaciones, A, B y C, sin tener en cuenta otra actuación específica sobre el acuífero. Los balances (Figuras 7 y 8) se han analizado mediante una serie de gráficos que comparan las entradas/salidas hacia/desde el acuífero en las tres simulaciones, para los siguientes términos: lluvia, reservas, arroyos, ríos, marisma y mar.

De todos los términos de balance analizados los que se ven menos afectados por la variación de la recarga por lluvia son las entradas a través de arroyos, ríos y el mar, dado el pequeño orden de magnitud de este último término. Por el contrario las salidas del acuífero a través de la marisma, los ríos, los arro-

yos que alimentan la marisma y el mar experimentan variaciones importantes. El hecho de que los ríos y arroyos se “descuelguen” en época seca explicaría que las variaciones climáticas afecten mucho más a las salidas que a las entradas de ríos y arroyos. Estos balances son significativos a la hora de evaluar los términos que representan los aportes subterráneos a la marisma, pudiendo éstos variar entre un periodo seco y uno húmedo hasta varias decenas de hectómetros cúbicos al año. También es importante destacar el papel del modelo para evaluar los caudales cedidos desde el acuífero al mar. El estudio de su variación, motivado exclusivamente por cambios del clima no extremos, refleja una oscilación de hasta un 15%. Si además se tiene en cuenta la modificación de las explotaciones, así como el efecto del cambio climático global, este valor podría ser considerablemente más alto.

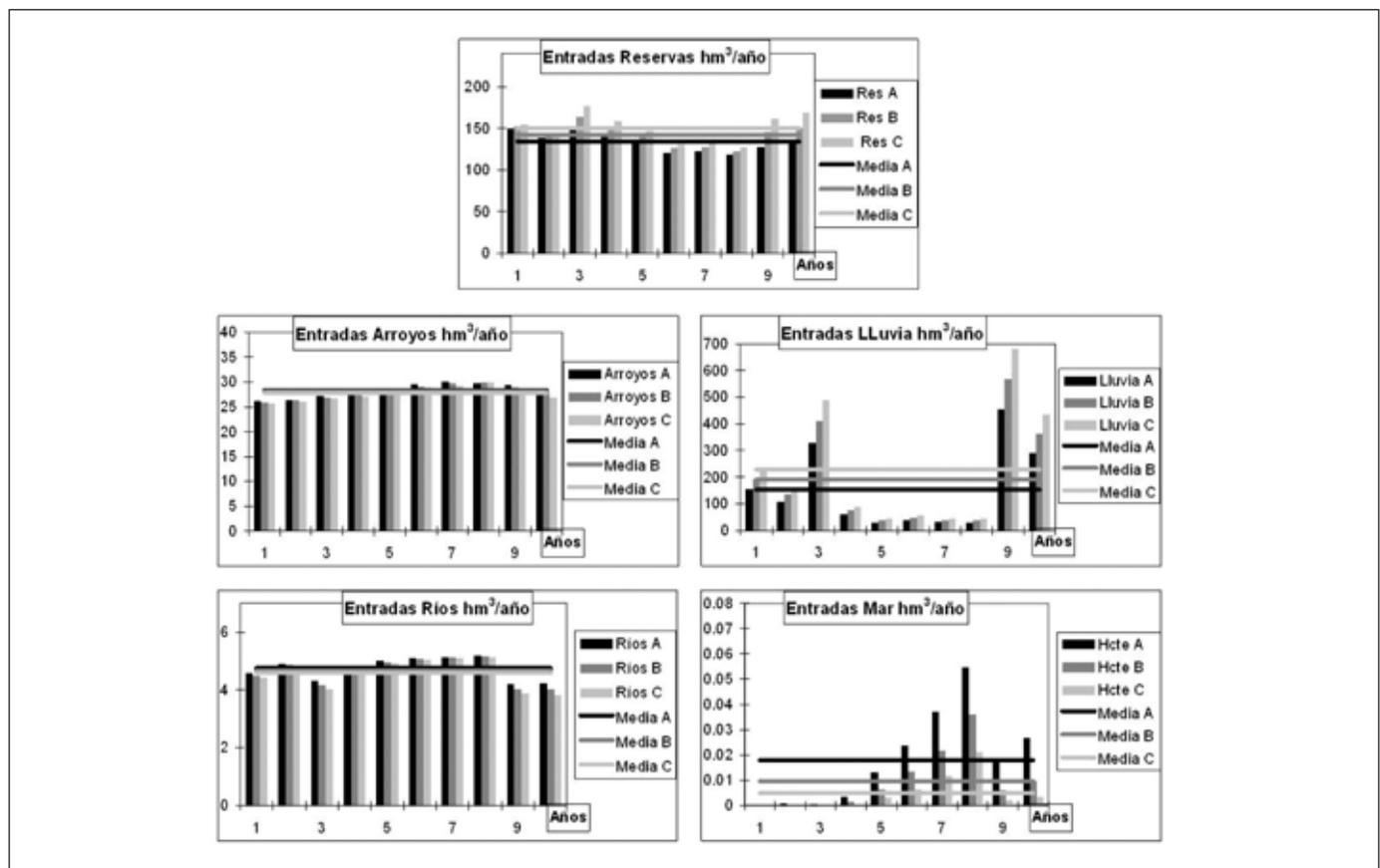


Figura 7. Comparación de las entradas al acuífero aportadas por las reservas, los arroyos, la lluvia, los ríos y el mar en las tres hipótesis climáticas simuladas: periodo seco (A), periodo medio (B) y periodo húmedo (C)

Figure 7. Comparison between inflow in the system for the three climatic hypothesis simulated: dry period (A), medium period (B) and wet period (C)

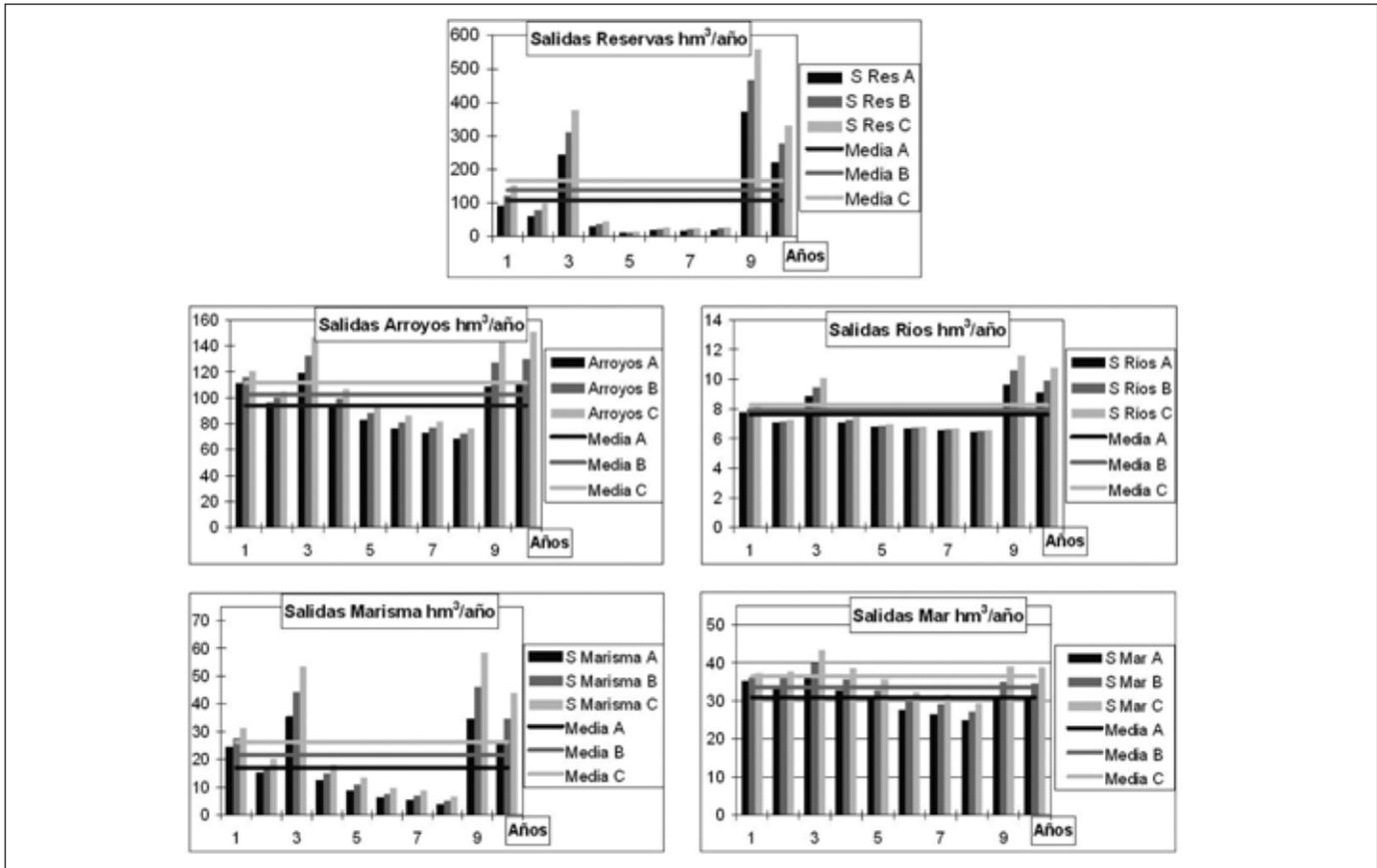


Figura 8. Comparación de las salidas del acuífero hacia las reservas, los arroyos, los ríos, la marisma o el mar en las tres hipótesis climáticas simuladas: período húmedo (A), período medio (B) y período seco (C)  
 Figure 8. Comparison between outflow in the system for the three climatic hypothesis simulated: wet period (A), medium period (B) and dry period (C)

### Simulación de actuaciones de gestión

El modelo también ha sido empleado para analizar el efecto de varias hipótesis de sustitución de bombeos sobre el acuífero, pudiéndose citar las siguientes:

1. Análisis de la recuperación del acuífero al cesar los bombeos en la margen derecha del arroyo de La Rocina.
2. Estudio del comportamiento del acuífero al aumentar los bombeos de abastecimiento de Matalascañas en un 20%.
3. Estudio de la evolución de los niveles piezométricos al abandonar los bombeos en la zona de Los Hatos.
4. Estudio de viabilidad de reactivación de 10 pozos del IRYDA en el término municipal de Almonte para una mejora de abastecimiento urbano.
5. Traslado de parcelas agrarias en la cabecera del arroyo de La Rocina a zonas ambientalmente menos sensibles, lejos de arroyos y corredores ecológicos.

En todas ellas se analiza la evolución del nivel piezométrico, el intercambio de flujos, la influencia en los distintos términos del balance hídrico, etc. Los tres primeros problemas han sido descritos en Guardiola-Albert *et al.* (2005, 2007 y 2008). En todos ellos se muestra el impacto de las actuaciones estudiadas sobre zonas de alto interés eco-hidrológico (lagunas, arroyos, marisma...) en cuanto a los niveles piezométricos y los aportes subterráneos de agua a estas zonas. A continuación se describe con mayor detalle el punto 4: *Estudio de viabilidad de reactivación de 10 pozos del IRYDA en el término municipal de Almonte para abastecimiento urbano.*

### Influencia de la reactivación de 10 pozos en el término municipal de Almonte

Se planteó el estudio de la variación sobre la piezometría en distintos puntos, más o menos cercanos a la marisma y a diferentes cursos fluviales, en el caso

de que se reactivaran 10 antiguos pozos del IRYDA (Figura 9) con el fin de mejorar el abastecimiento urbano fuera de la zona de extracción. Los caudales que extraerían esos 10 pozos serían un total de 7,7 hm<sup>3</sup>/a en régimen continuo, según los caudales óptimos que se obtuvieron en su año de ejecución (1972-1974). En la Figura 9 se puede observar la cercanía de estos pozos a la marisma. Estos pozos están situados sobre las zonas de conductividad 12 y 23 (Figura 4), cuya sensibilidad relativa es bastante elevada en comparación del resto de zonas, considerándose así que la calibración es adecuada para realizar un análisis de gestión en la zona.

Se procedió a analizar lo que ocurriría si empezasen a funcionar los bombeos, partiendo de la piezometría de finales del año 2004, ya que en el momento de iniciar este estudio era el último año del que se disponían de datos. A partir de esta piezometría se realizaron dos simulaciones durante un periodo de 10 años. La primera simulación suponía que no se ponían

en funcionamiento los bombeos propuestos, y la segunda simulación reflejaba lo que ocurriría si sí se ponían en funcionamiento dichos bombeos.

La evolución temporal de los niveles piezométricos de las dos simulaciones se ha representado en cuatro puntos situados a distintas distancias de la batería de pozos reactivados (Figura 9). Se puede observar que para el punto más cercano situado al Norte las diferencias entre ambas simulaciones son de hasta 14 m, mientras que en el punto más cercano a la marisma las diferencias llegan hasta los 3 m.

Para ilustrar el efecto de la reactivación de los pozos se ha calculado la diferencia entre la piezometría obtenida con las dos simulaciones realizadas trascurridos 10 años (Figura 10). Las diferencias son de entre los 5 y 17 m en los alrededores del arroyo del Partido y de la Mayor, así como se observa cierta afección en el borde de la marisma.

La principal conclusión que se pudo extraer de este estudio es la afección directa que tendrían los

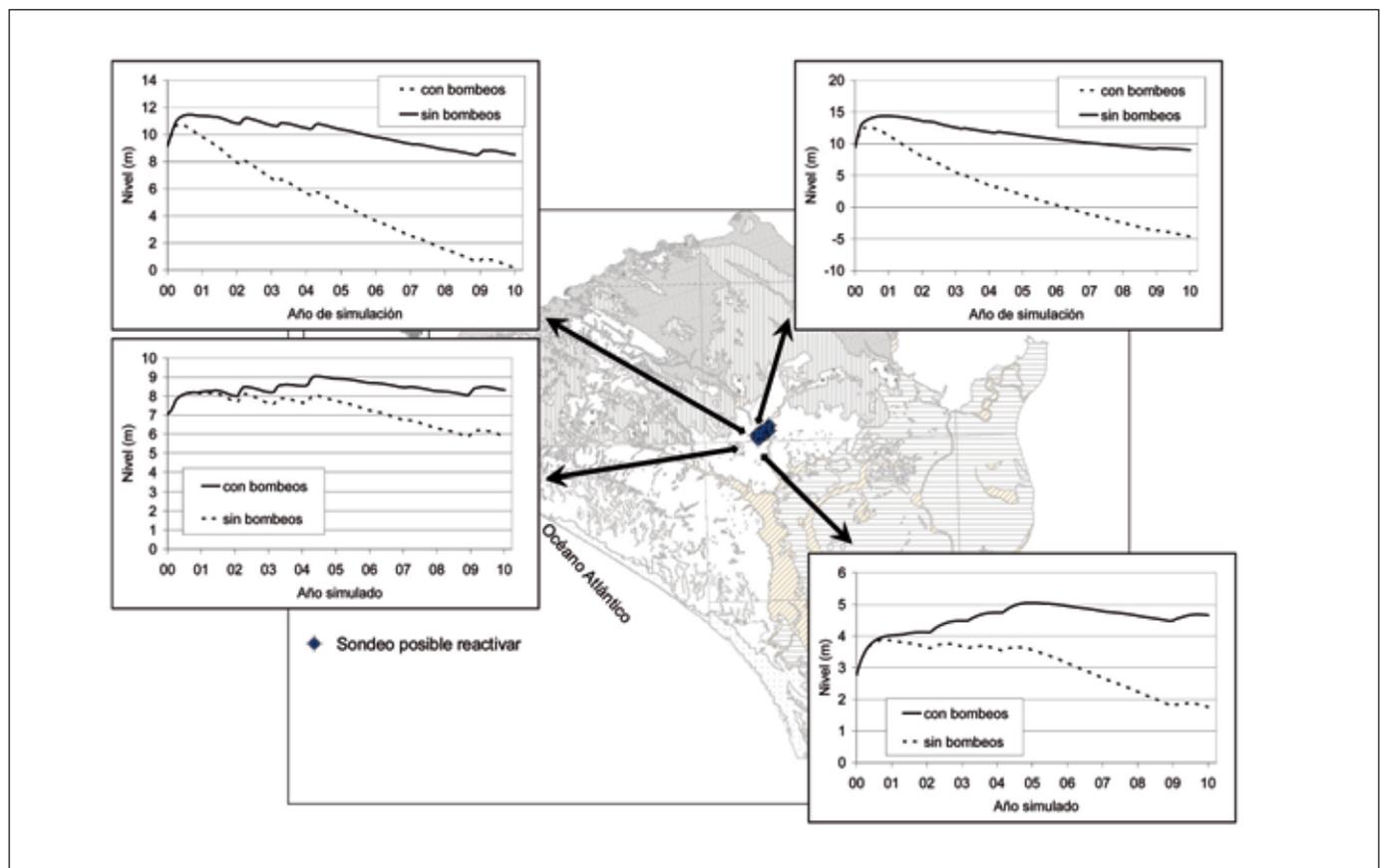


Figura 9. Niveles piezométricos simulados durante 10 años en 4 puntos situados entorno a los sondeos a reactivar que se analizaron. Valores con o sin bombeos  
 Figure 9. Simulated groundwater heads during 10 years in 4 points situated around the studied reactivated wells. Values with or without pumping

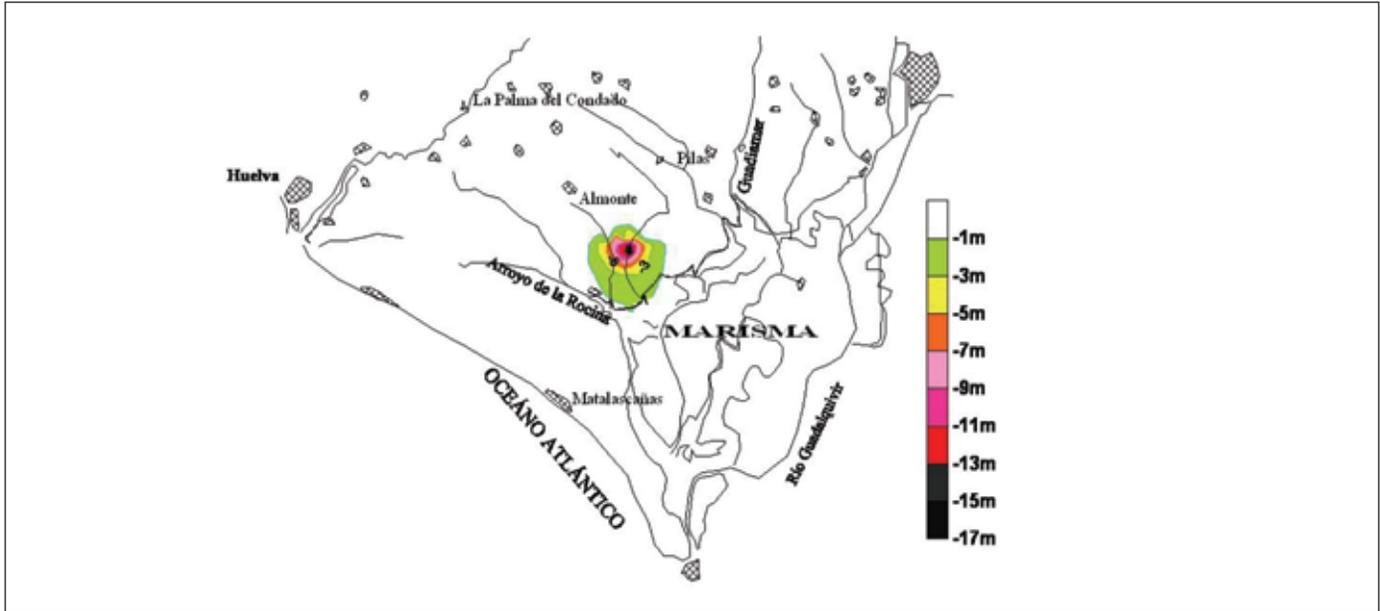


Figura 10. Diferencias entre la piezometría de la simulación con bombeos funcionando durante 10 años en la zona de estudio y la simulación sin bombeos reactivados en la zona de estudio

Figure 10. Differences between the simulated piezometric map with pumping wells active during 10 years in the study area and the simulated piezometric map without reactivation of the wells

pozos reactivados sobre los aportes subterráneos a los arroyos del Partido y de la Mayor, derivando esto indirectamente sobre los aportes de estos arroyos a la marisma. Así mismo se pudo concluir que a corto-medio plazo no habría una afección directa sobre los aportes subterráneos a la marisma.

### Conclusiones

Se ha mostrado el impacto que sobre el acuífero y sobre la transferencia de agua subterránea a las zonas de alto interés ecológico podría tener tanto el cambio climático como algunas actuaciones de gestión hídrica que se apliquen sobre el acuífero. Así, la variación climática afecta directamente a los aportes a la marisma tanto de aguas subterráneas como de los arroyos que desembocan en ella. De todos los términos de balance analizados los que se ven menos afectados por la variación de la recarga por lluvia son las entradas a través de arroyos, ríos y el mar, dado el pequeño orden de magnitud de este último término. Por el contrario las salidas del acuífero a través de la marisma, los ríos, los arroyos que alimentan la marisma y el mar experimentan variaciones importantes. Este hecho es significativo a la hora de evaluar los términos que representan los aportes subterráneos a la marisma, pudiendo éstos variar entre un periodo seco y uno húmedo hasta varias decenas de hectó-

metros cúbicos al año. También es importante destacar el papel del modelo para evaluar los caudales cedidos desde el acuífero al mar. El estudio de su variación, motivado exclusivamente por cambios del clima no extremos, refleja una oscilación de hasta un 15%. Las diferentes modificaciones de las extracciones existentes pueden mejorar o empeorar la disponibilidad de agua subterránea asociada a importantes zonas de interés ecológico. Así, el estudio de la afección que tendría reactivar los pozos en el término municipal de Almonte sobre los aportes subterráneos a los arroyos del Partido y de la Mayor, sería de un descenso piezométrico de hasta 17 m en 10 años, derivando esto indirectamente sobre los aportes de estos arroyos a la marisma.

La gestión del modelo supone recalibrar el modelo matemático, replantear el modelo conceptual para refinar las calibraciones y ejecutar el modelo según las necesidades que los distintos organismos competentes vayan requiriendo. Todo ello implica un esfuerzo que el IGME sigue realizando hoy en día y que, demostrada su gran utilidad, no se debería perder en el futuro.

### Referencias

Anderson M.P. y Woessner W.W. 1992. *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport*. Academic Press, New York, USA, 381 pp.

- Baird, K.J., Stromberg, J.C. y Maddock, T. 2005. Linking riparian dynamics and groundwater: An ecohydrologic approach to modeling groundwater and riparian vegetation. *Environmental Management*, 36 (4), 551-564.
- Boswell, J.S. y Olyphant, G.A. 2007. Modeling the hydrologic response of groundwater dominated wetlands to transient boundary conditions: Implications for wetland restoration. *Journal of Hydrology*, 332 (3-4), 467-476.
- Caldwell, P.V., Vepraskas, M.J., Skaggs, R.W. y Gregory, J.D. 2007. Simulating the water budgets of natural Carolina bay wetlands. *Wetlands*, 27 (4), 1112-1123.
- Custodio, E. 1995. Comportamiento y papel de las aguas subterráneas en Doñana. Consecuencia de las extracciones. *VI Simposio de Hidrogeología*, Sevilla. XX: 281-310.
- Custodio, E. 2000. Groundwater-dependent wetlands. *Acta Geologica Hungarica*, 43 (2): 173-202.
- Custodio, E., Dolz, J., Manzano, M.S. y Alcalá, F.J. 2007. *Recursos de agua de la Comarca de Doñana*. Informe Fundación Doñana 21. 190pp.
- Custodio, E., Manzano, M. y Montes, C. 2008. Perspectiva general del papel y gestión de las aguas subterráneas en el Área de Doñana, Sudoeste de España. *Boletín Geológico y Minero*, 119 (1): 81-92.
- De Marsily, G. 1986. *Quantitative Hydrogeology*, Academic Press, 440pp.
- Guardiola-Albert, C., Murillo, J.M., Martín Machuca, M. y López Geta, J.A. 2004. Actualización de la modelización matemática del acuífero Almonte-Marismas. *VIII Simposio de Hidrogeología*, Zaragoza, 471-480.
- Guardiola-Albert, C., Murillo, J.M., Martín Machuca, M., Mediavilla C. y López Geta, J.A. 2005. Modelo matemático revisado del acuífero Almonte-Marismas: aplicación a distintas hipótesis de gestión. *VI Simposio del agua en Andalucía*, Sevilla, 799-810.
- Guardiola-Albert, C., Murillo, J.M., Mediavilla C., Martín Machuca, M. y López Geta, J.A. 2007. Aportes de la modelación matemática a la gestión de los recursos hídricos en el entorno de Doñana. *XII Congreso Internacional de Energía y Recursos Minerales*, Oviedo, 434-436.
- Guardiola-Albert, C., Murillo, J.M., Mediavilla C., Martín Machuca, M. y López Geta, J.A. 2008. Aportes de la modelación matemática a la gestión de los recursos hídricos subterráneos en Doñana. *VII Simposio del Agua en Andalucía*, Baeza, II, 833-844.
- Hollis, T., Mercer, J., y Heurteaux, P. 1989. *The implications of groundwater extraction for the longterm future of the Doñana National Park*. Reporto f the WWF/UICN/ADENA. Mission to Doñana National Parck, November, 1988. 60 pp.
- IGME 1976. *Informe preliminar sobre la realización y resultados del modelo matemático Almonte-Marismas*. 41 pp + anexos
- IGME 1982. *Modelo matemático bidimensional del sistema acuífero nº27. Unidad Almonte-Marismas*. 93 pp. + anexos
- IGME 1992. *Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno*. Colección Informes Aguas Subterráneas y Geotecnia. Ed. IGME. 64 pp + 2 mapas.
- Krasnostein, A.L. y Oldham C.E. 2004. Predicting wetland water storage. *Water Resources Research* 40 (10) W10203.
- Krause, S., Jacobs, J. y Bronstert, A. 2007. Modelling the impacts of land-use and drainage density on the water balance of a lowland-floodplain landscape in northeast Germany. *Ecological Modelling* 200(3-4), 475-492.
- Ledesma Castro, A., Vázquez Suñé, E., Carrera Ramírez, J., Jaén Dupont, M. y Salvany, J.M. 1999. *Calibración del modelo regional de flujo subterráneo en la zona de Aznalcóllar, España: Ajuste de las extracciones*. Hidrología Subterránea. Serie Correlación Ecológica nº 13. Instituto Superior de Correlación Geológica CONI-CET. Fac. de Cs. Naturales e Instituto Miguel Lillo, Universidad Nacional de Tucumán. A.Tineo (Ed.): 21-29.
- Lozano, E. 2004. *Las aguas subterráneas en los Cotos de Doñana y su influencia en las lagunas*. Tesis Doctoral. Dpto. de Ingeniería del Terreno y Cartografía. Universidad Politécnica de Cataluña.
- Lucena, C. y García E. 1978. El modelo matemático del sistema acuífero de Almonte-Marismas. *Boletín Geológico y Minero*, 89 (2), 43-55.
- Mansour, M.M. y Hughes, A.G. 2004. *User's manual for the distributed recharge model ZOODRM*, British Geological Survey Internal Report, IR/04/150.
- 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.
- McDonald, M.G., y Harbaugh, A.W. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations*, 6 (A1), 586 pp.
- Mortier, F., Trigueros, E. Chapond, G., Ruiz-Celaa, C., Trac, N.Q. y del Valle Cardenete, M. 1970. *Investigaciones hidrogeológicas en la cuenca del río Guadalquivir*. Fondo Especial de las Naciones Unidas-FAO. Roma. 2 tomos. 146 pp.
- Muñoz Reinoso, J.C. 1995. Influencia del agua freática sobre la vegetación de las áreas de descarga sobre arenas en la reserva biológica de Doñana. *Limnética*, 11 (2): 9-16.
- Perconig, E. 1960-62. Sur la constitution géologique de l'Andalousie Occidentale, en particulier du Basin du Guadalquivir (Espagne méridionale). *Bulletin de la Société Géologique de France*, Livre Mém. Prof. Paul Fallot, 1º: 229-256.
- Prudic, D.E. 1989. Documentation of a computer program to simulate stream-aquifer relations using a modular, finite-difference, ground-water flow model: *U.S. Geological Survey Open-File Report* 88-729, 113 pp.
- Rodríguez Arévalo, J. 1988. *Origen y movimiento del agua intersticial en el acuitardo arcilloso de las marismas del Guadalquivir*. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 316 pp.
- Rodríguez Arévalo, J. y Llamas Madurga. 1986. Evaluación preliminar del impacto de los bombeos de agua subterránea en el ecotono de La Vera – La Retuerta (Parque Nacional de Doñana). *II Simposio del Agua en Andalucía*. Granada: 423-434.

- Rodríguez Ramírez, A., Yañez Camacho, C., Gascó, C., Clemente Salas, L., Antón, M<sup>a</sup>. P. 2005. Colmatación natural y antrópica de las marismas del Parque Nacional de Doñana: Implicaciones para su manejo y conservación. *Cuaternario y Geomorfología*, 19 (3-4): 37-48.
- Sahuquillo, A. 2002. *Desarrollos científicos y nuevas tendencias en hidrogeología. Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén*. IGME. Madrid, 1-11.
- Salvany, J.M. y Custodio, E. 1995. Características litoestratigráficas de los depósitos Plio-cuaternarios del Bajo Guadalquivir en el área de Doñana: implicaciones hidrogeológicas. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 8 (1-2), 21-31.
- Suso, J. y Llamas, R. 1993. Influence of groundwater development on the Doñana National Park ecosystems (Spain). *Journal of Hydrology*, 141: 239-269.
- 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, Th. 1998. *Impactos de las extracciones de agua subterránea en Doñana*. Tesis Doctoral, ETSICCPB, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona.
- UPC 1999. *Modelo regional de flujo subterráneo del sistema acuífero Almonte-Marismas y su entorno*. 114 pp+ anexos. Informe inédito.
- Viguié, C. 1977. *Le Néogène de l'Andalousie Nord-Occidentale (Espagne): histoire géologique du Bassin du bas-Guadalquivir*. Tesis Doctoral Univ. Bordeaux.
- Virgós, L., Martínez Alfaro, P.E., López Vilchez, L. y Martín Machuca, M. 1983. Estudio del funcionamiento hidrogeológico del acuífero de Almonte-Marismas (sistema n°27) mediante un modelo digital bidimensional. *III Simposio del Hidrogeología*, Madrid, 343-364.
- Virgós, L. y Martín Machuca, M. 1995. Modelo matemático del acuífero de Almonte-Marismas. *VI Simposio de Hidrogeología*, Sevilla, XIX, 639-660.
- WHI 2002. *WinPEST, version 3.0*. Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Notario, Canada, 158 pp.
- WWF/Adena 2006. *Doñana y Cambio Climático: Propuestas para la mitigación de los efectos*. Madrid. 63 pp.

Recibido: enero 2009

Revisado: julio 2009

Aceptado: octubre 2009

Publicado: octubre 2009

