

«EL IMPACTO DE LA EXTRACCION DE AGUAS SUBTERRANEAS EN EL PARQUE NACIONAL DE DOÑANA»

J. M. Suso * y M. Llamas **

RESUMEN

El Parque Nacional de Doñana (PND) es el más importante de España y uno de los principales de Europa por su extensión (730 km²) y por el valor de los ecosistemas que alberga. Está situado sobre el sistema acuífero de Almonte-Marismas que ocupa una extensión de unos 3.400 km² en el valle inferior del río Guadalquivir. Las características de los tres ecosistemas principales del PND (arenas estabilizadas, dunas móviles y marismas) y de sus respectivos ecotonos (zonas de contacto entre los ecosistemas) dependen en gran manera del sistema de flujo de agua subterránea del acuífero Almonte-Marismas.

En las dos últimas décadas se han iniciado en la zona ambiciosos planes de desarrollo agrícola y turístico que han supuesto una extracción de aguas subterráneas del orden de 60 hm³/año). Esta extracción, en opinión de los autores, podría producir en un plazo de tiempo relativamente breve, importantes modificaciones en sectores fundamentales del Parque, de modo similar a lo ocurrido en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel.

En este trabajo se estudia principalmente lo ocurrido hasta 1988 en las proximidades de El Rocío, por considerar que es la zona más significativa en lo que se refiere al impacto de las extracciones de aguas subterráneas. Se realiza también un análisis crítico de las predicciones de la evolución de los acuíferos que han realizado los organismos con responsabilidades en el PND. Se llega a la conclusión de que dichas predicciones son excesivamente optimistas y que probablemente los impactos importantes tendrán también lugar mucho antes de lo previsto.

Palabras clave: *Hidrogeología, humedales, impacto ambiental.*

SUMMARY

The National Park of Doñana (PND) is the most important one in Spain and one of the principal National Parks in Europe because of its large surface (730 km²) and its relevant ecosystems. It is located on the Almonte-Marismas aquifer system. This aquifer system has a surface of about 3,400 km² at the lower valley of the Guadalquivir river. The characteristics of the three main PND ecosystems (stabilized sands, moving dunes and marshlands) and of their respective ecotones (contact zone between two ecosystems) depend to a great extent on the Almonte-Marismas aquifer groundwater flow system.

Important agricultural and turistic developments have been performed at the neaby zone during the last two decades. They have implied a groundwater withdrawal of some 60 million m³/year. The authors' opinion is that such withdrawal might cause relevant impacts on fundamental parts of the Park at short term. It might occur something similar to the recent ecological deterioration on the National Park of Las Tablas de Daimiel.

This study is focused mainly on the El Rocío zone because it is probably the most significant one in relation to the ecological impact caused by the groundwater extraction. The water table evolution forecast by the models run by the Agencies in charge of the PND are analyzed. The authors conclude that such forecasts are too optimistic and significant impacts will occur before the time foretold.

Key words: *Hydrogeology, wetlands, environmental impact.*

* Intecsa. Madrid. Anteriormente en Dpto. de Geodinámica, Universidad Complutense, 28040 Madrid.

** Dpto. de Geodinámica. Universidad Complutense, 28040 Madrid.

Introducción y enfoque

Introducción

El Rocío está situado junto al Parque Nacional de Doñana (PND). Este Parque Nacional se encuentra en la desembocadura del río Guadalquivir y ocupa una superficie aproximada de 730 km² de los que unos 230 km² corresponden a marismas. Constituye sin duda el humedal más importante de España y uno de los principales de Europa. En él se distinguen tres ecosistemas principales: las marismas, las dunas móviles y las arenas estabilizadas o «cotos». La existencia y características de estos ecosistemas están directamente condicionadas por la relación entre las aguas superficiales, las aguas subterráneas y la morfología del terreno.

El ecotono —contacto entre las marismas y las arenas estabilizadas (La Vera) por una parte; y entre las marismas y las dunas móviles (La Retuerta), por otra— es una de las áreas de mayor interés ecológico (Merino *et al.*, 1980 a y b). Su gran fertilidad y productividad, esencial para el gran número de especies e individuos que alberga el Parque, se debe fundamentalmente a que, al ser una zona de descarga de aguas subterráneas, es el único lugar del PND que conserva permanentemente la humedad a lo largo de todo el año.

Los planes de desarrollo agrícola y turístico en esta región se basan, en buena medida, en la extracción de importantes volúmenes de aguas subterráneas. Por ello, es fundamental un buen conocimiento de los acuíferos de la zona y de su funcionamiento, con el fin de asegurar no sólo la conservación de los ecosistemas que dependen de ellos, sino también la propia continuidad a medio plazo de esos mismos planes de desarrollo económico. En el epígrafe sobre *Antecedentes* se presentarán de modo resumido los aspectos principales de la controversia, todavía viva, entre *desarrollo económico a corto plazo* y conservación de la naturaleza. Al final del artículo se comentará el informe realizado por el Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF) y la Unión Internacional de Conservación de la Naturaleza (UICN) sobre la repercusión de la extracción de aguas subterráneas en el PND. Este artículo se refiere casi exclusivamente a las relaciones entre aguas subterráneas y ecología, es decir, no se verán otros posibles impactos en el PND.

Situación

El área abarcada por este estudio está situada (fig. 1) en el SE de la provincia de Huelva, quedando comprendida en las Hojas n.º 1000 (Moguer), 1001

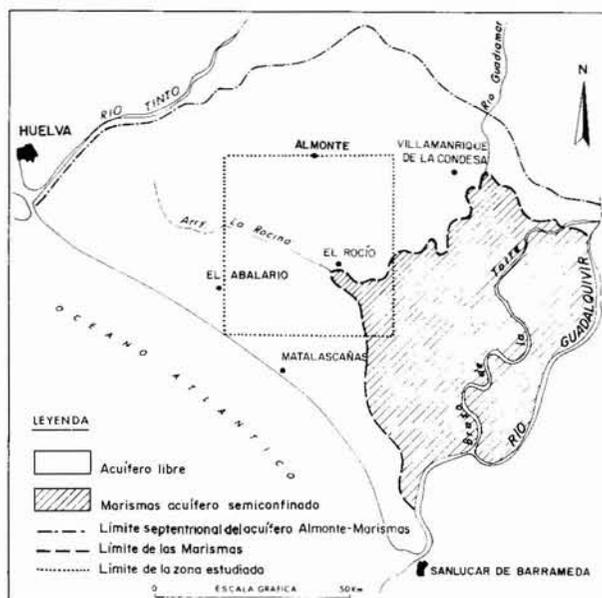


Fig. 1.—Mapa de situación.

(Almonte), 1017 (El Abalarío) y 1018 (El Rocío) del Mapa 1/50.000 del I.G.N.

En concreto, el área de interés prioritario es la situada en las proximidades del denominado Sector II del Plan de Transformación Agraria Almonte-Marismas (PTAAM) aunque, para facilitar la comprensión de su funcionamiento hidrogeológico, se ha ampliado hasta los siguientes límites aproximados: límite N: Almonte; límite S: El Acebuche; límite O: El Abalarío; límite E: Marismas del Guadalquivir y arroyo de la Cañada Mayor.

Desde el punto de vista fisiográfico, la zona se caracteriza por presentar un relieve con suaves ondulaciones y alturas máximas de unos 70 m (hacia el N y el O) que descienden gradualmente hasta alcanzar los 2-4 m de cota en las marismas. El arroyo de la Rocina es el principal curso de agua que, con carácter estacional, discurre por la zona hasta desaguar en las marismas; de menor entidad son los arroyos de la Cañada Marín, del Partido y de la Cañada Mayor que, con dirección N-S, están situados al E de El Rocío. Este conjunto de cuatro arroyos recibe el nombre de Madre de las Marismas, cuando confluyen dentro de dichas marismas. Estas marismas del Guadalquivir, situadas hacia el SO, constituyen una extensa llanura sin accidentes topográficos importantes, sujeta a ciclos de encharcamiento y desecación, según sea época de lluvias o de estiaje.

Antecedentes

Debido a su importancia, tanto científica como ecológica y económica, la zona ha sido centro de in-

terés para una gran variedad de organismos y de investigadores, que han orientado sus esfuerzos a mejorar los conocimientos del área, desde diferentes puntos de vista.

Entre los estudios geológicos recientes cabe citar la cartografía geológica a escala 1/50.000 del IGME (1976 a, b, c, y 1977) y la Tesis Doctoral de Zazo (1980). Otros trabajos que, aunque no estrictamente geológicos, contribuyen a la mejora del conocimiento del medio físico, son las Tesis Doctorales de Menanteau (1980) y Siljeström (1985); la primera sobre los aspectos geomorfológicos de la desembocadura del Guadalquivir, y la otra sobre la edafología de la Reserva Biológica de Doñana.

Los primeros estudios hidrogeológicos comienzan en la década de los años sesenta encuadrados en el «Proyecto Guadalquivir» realizado por la F.A.O. con la colaboración del IGME y, posteriormente, del IRYDA y de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir. Estos estudios permitieron definir las principales características litológicas, geométricas e hidráulicas del acuífero Almonte-Marismas, llegándose a realizar una primera evaluación de sus recursos, y un modelo numérico de su funcionamiento (FAO, 1970, 1972, 1973 y 1975). Las estimaciones de estos estudios han resultado excesivamente optimistas.

Finalizado el «Proyecto Guadalquivir», los sucesivos estudios hidrogeológicos han continuado aportando nuevos datos. Entre otros trabajos cabe mencionar los modelos numéricos de flujo realizados por el IRYDA (1976); Lucena y García (1978); IGME (1982, 1986 y 1987); Yagüe y Llamas (1984) y Vela y Llamas (1986). Baonza *et al.* (1982) abordan el estudio isotópico de las aguas subterráneas; Rodríguez Arévalo (1984), Tenajas (1984) y Vela (1984) estudian respectivamente tres zonas del Parque, bien diferenciadas desde el punto de vista hidrogeológico: el ecotono de La Vera y La Retuerta, las Marismas y las dunas móviles.

Como previamente se ha indicado, los planes de desarrollo de esta región se basan esencialmente por una parte, en el regadío de cultivos de alto valor comercial y, por otra, en el desarrollo turístico de la zona costera (Matalascañas en funcionamiento y Costa Doñana en preparación). Ambos tipos de desarrollo se están llevando a cabo mediante la extracción de aguas subterráneas del denominado acuífero Almonte-Marismas.

Ya desde el comienzo de la década pasada hubo quienes, como Heurteaux (1970), llamaron la atención sobre el posible impacto negativo que podrán tener estas extracciones de aguas subterráneas y las actividades agrícolas en el PND. Desde mediados de la década de los años ochenta hubo frecuentes llamadas de atención a los directivos de los organismos correspondientes sobre la naturaleza y gravedad de

esos impactos y sobre la necesidad de tomar las oportunas medidas. Estos avisos fueron hechos inicialmente de modo personal, después en publicaciones científicas y finalmente en los medios de comunicación (cf. Llamas, 1986; Rodríguez Arévalo y Llamas, 1986 a y b; Llamas y Rodríguez, 1987; Llamas *et al.*, 1987; Llamas, 1987 a y b; Llamas, 1988 a, b y c). En las conclusiones del escrito de Llamas y Rodríguez (1987) ya se hacía notar que parecía clara la decisión del IARA de no detener sus acciones hasta poner en regadío un mínimo de 10.000 Ha. Aparentemente la atención prestada a esos escritos fue mínima; así, por ejemplo, el Presidente del Patronato del PND, declaraba al final de una reunión del Patronato pocos días después de la publicación del artículo de Llamas (1987 b) lo siguiente: (cf. «El País», 10 de enero, 1988) «Hace un par de meses, cuando aparecían *alarmas completamente apocalípticas* sobre la muerte del Parque, yo les aseguré que no hicieran caso de eso ya que el Parque estaba en una situación mejor que hace muchísimo tiempo».

Sin embargo, alguna relación parecen haber tenido esos escritos con dos significativos sucesos posteriores. El primero, a finales de 1987, fue la presentación de un informe del IGME en el que se recomendaba no aumentar más la superficie de regadío entonces existente (7.000 Ha) para evitar posibles efectos adversos en los ecosistemas del PND. Es de notar que en este informe el IGME utilizó prácticamente el mismo modelo de flujo subterráneo que en sus otros previos informes de 1982 y de 1986; sin embargo, en éstos no se recomendaba reducción alguna de los regadíos ni se hacía mención a posibles impactos ecológicos en el PND a causa de la extracción de aguas subterráneas. En el modelo del IGME, (1987) se presenta el cálculo de los descensos del nivel freático al cabo de veinte años de bombeo para regar 5.500 Ha. Los descensos obtenidos son algo superiores a los del modelo del IGME (1982). Sin embargo, en este último modelo, aunque se utiliza la misma hipótesis de regadío, se incluyen también los bombeos para el abastecimiento urbano de Almonte, Matalascañas y otros núcleos urbanos y, además, los descensos presentados corresponden a la situación después de cuarenta años de bombeo.

El segundo suceso significativo fue que el Patronato del PND aceptó la propuesta de la asociación ecologista ADENA, representante en España del World Wide Fund for Nature (WWF), de que una misión de expertos, financiada por el WWF y nombrada por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN), emitiese un informe sobre el posible impacto de la extracción de aguas subterráneas en el PND. Este informe será objeto de un comentario detallado al final del artículo.

Como ya se dijo, tanto los informes del IGME de

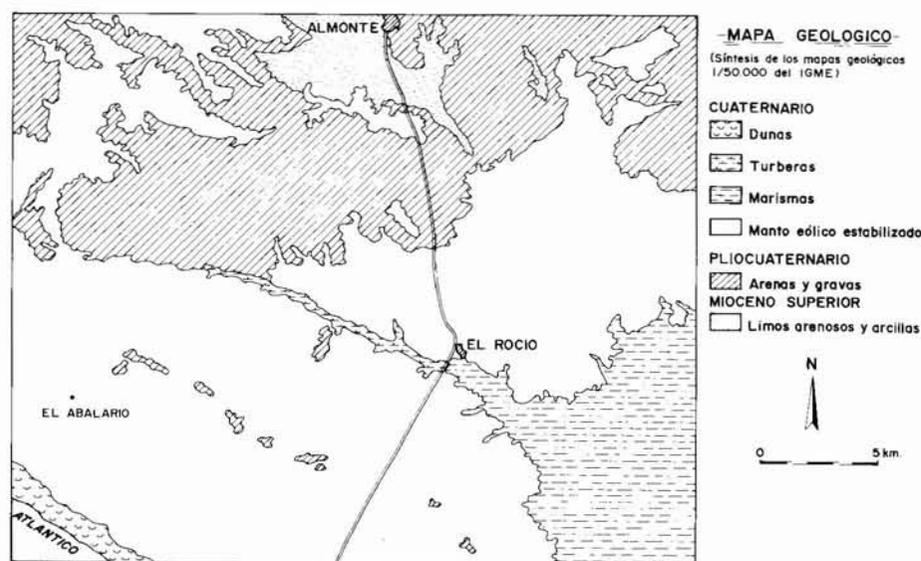


Fig. 2.—Mapa geológico.

1982 y 1986 como el de 1987 se basan esencialmente en los resultados de un modelo numérico de flujo. Con objeto de comparar los datos de dichos modelos con los datos geológicos e hidrogeológicos disponibles en la zona más crítica del PND —las proximidades de El Rocío— el primero de los autores de este artículo, a lo largo de 1988, realizó un trabajo de investigación que le sirvió como tesis de licenciatura (Susó, 1988). El texto preliminar de esta tesis fue entregado a la misión de la WWF en noviembre de 1988 y es ampliamente citado en su informe final (Hollis *et al.*, 1989). En este artículo se presenta esencialmente una síntesis de la versión definitiva de la tesis de Susó (1988), aunque, como es lógico, se harán las oportunas referencias a trabajos posteriores, en especial al informe WWF. Un primer resumen de la tesis fue ya presentado por Susó y Llamas (1989). Llamas ha incluido también algunos datos procedentes de esa tesis en dos publicaciones recientes (1989 a y b).

Encuadre general

Geología

Desde el punto de vista geológico, El Rocío está situado en el SO de la depresión tectónica de la Cuenca del Guadalquivir, que está limitada por el zócalo paleozoico de la Meseta en el N y NO, y por el olistostrama subbético en el S y SE (IGME, 1976 a, b y c; 1977). Dentro de la zona estudiada se pueden diferenciar las siguientes unidades (fig. 2):

— Mioceno superior:

Está constituido por dos tramos de diferente litología: margas azules en la base y limos arcillo-arenosos y calcáreos en el techo. Por lo general, las margas presentan una mala estratificación; frecuentemente son arenosas y hacia el techo presentan intercalaciones de niveles de arenas, limos y arcillas, progresivamente más abundantes. Sólo llegan a aflorar dentro de la zona estudiada en las proximidades de Almonte (fig. 2), pero aparecen en la mayor parte de los sondeos constituyendo el zócalo impermeable del acuífero Almonte-Marismas. La potencia conjunta de las margas y los limos arenosos puede superar los 1000-1200 m (IGME, 1976 b); se han datado como Andaluciense (IGME, 1976 c).

— Pliocuaternalio:

Sobre los limos arenosos que constituyen el techo del Andaluciense, y discordante sobre ellos, se encuentra una formación de arenas de colores blancos o amarillentos y rojizos. Aunque en superficie la discordancia es fácilmente observable y, a veces, está marcada por una costra ferruginosa de hasta 1 m de espesor (IGME, 1976 c), en las columnas litológicas de sondeos es difícil precisar el paso entre estas arenas y los limos del techo de las margas azules. Estas arenas son muy fosilíferas, con intercalaciones de lumaquelas, especialmente hacia la base, y arcillas ocasionalmente arenosas de irregular distribución y continuidad lateral. El origen de esta formación es complejo, poligénico, de ambiente marino, con influencias fluviales y eólicas (IGME, 1976 c); se le atribuye una edad pliocuaternalia, aunque algunos autores, como Zazo (1980), la consideran fundamentalmente cuaternalia en la zona costera gaditana.

Dentro del área estudiada aflora formando una franja continua en el tercio N, y en retazos dispersos y de poca extensión hacia el O y SO de El Rocío, donde las arenas cuaternarias que la recubren han sido erosionadas.

— Cuaternario:

Aflora en la mayor parte de la superficie de la zona estudiada. Se pueden distinguir las siguientes formaciones principales: manto eólico estabilizado, marismas, turberas y dunas actuales.

El manto eólico estabilizado, que tiene una gran extensión, recubre las arenas pliocuaternarias. Está constituido por arenas finas, muy homogéneas, de color blanco amarillento y ocre; su potencia es pequeña; rara vez alcanza más de 3 m. Su origen se atribuye a una serie de trenes de dunas, actualmente erosionados, de los que solamente en algunos puntos se intuye su previa morfología.

Las marismas se apoyan sobre una capa de unos 80-100 m de espesor, formada por arcillas y arcillas limosas con abundante microfauna, e intercalaciones de arenas y gravas. Estas intercalaciones pueden tener, a veces, una notable potencia (5-30 m) (IGME, 1983). Su base está formada por las arenas pliocuaternarias y su espesor máximo es de unos 150 m (FAO, 1972); se acuñan rápidamente hacia el N y NO; están formadas por sedimentos de tipo marino con importantes episodios fluviales y representan la colmatación progresiva de una albufera existente en el estuario del Guadalquivir, que fue progresivamente cerrada por una flecha litoral (Menanteau, 1980).

Las turberas ocupan una extensión reducida; aparecen junto al arroyo de La Rocina y también al Oeste de la zona estudiada, en el arroyo de las Madres, donde se explotan. Están constituidas por turba y arcillas oscuras con niveles arenosos. El IGME (1976 a y b) atribuye su origen a un mal drenaje del arroyo—por avance de las dunas— lo que provocaría la aparición de áreas pantanosas que permitirían el desarrollo de la turbera.

Las dunas móviles son actuales y constituyen un singular ecosistema, que apenas tiene representación en la figura 2. Dentro del PND se sitúan junto a la costa formando una gran barrera de unos 30 km de longitud, con hasta 4 ó 5 cordones o trenes dunares que pueden llegar a alcanzar anchuras de hasta 4 km, en conjunto y espesores del orden de 20-30 m. (Vela, 1984). Avanzan desde la costa hacia el NE a una velocidad media de 5-6 m/año. Están originadas por la removilización eólica de los materiales arenosos depositados en la playa por las corrientes marinas.

Por último, y por la importancia ecológica que en ocasiones se le ha dado (cf. Hollis *et al.*, 1989), conviene mencionar aquí la posible existencia de una serie de costras ferruginosas, situadas dentro de las are-

nas eólicas o manto eólico estabilizado, por lo general a profundidades inferiores a 3 m. Estas costras tienen origen edáfico, según Clemente *et al.* (1988) y Siljeström (1985). Posiblemente esas costras ferruginosas, a veces denominadas «fragipan», corresponden a anteriores zonas de descarga de aguas subterráneas. En estas zonas las aguas subterráneas que llegan con un potencial redox muy bajo se oxidan y se evaporan. La oxidación hace pasar el ión ferroso a férrico y da lugar a la precipitación de óxidos de hierro; la concentración evaporativa da lugar a precipitación de carbonatos de calcio y/o magnesio (cf. Rodríguez Arévalo, 1984). De confirmarse esta hipótesis, parece prudente suponer admitir que el «fragipan» no forme una capa continua ni de gran extensión. Del análisis de los datos de los sondeos del IGME y del IRYDA realizado tanto por Rodríguez Arévalo (1984) como por Suso (1988) no se deduce la existencia de una capa continua e impermeable que pudiera dividir el acuífero en dos unidades diferentes por una capa prácticamente impermeable. Este punto de vista fue ya expuesto por Llamas y Rodríguez Arévalo (1987) en un informe enviado al Presidente del Patronato del PND.

Climatología

El clima de las marismas se ha caracterizado como mediterráneo subhúmedo bajo influencia atlántica (Cota Galán, 1977).

Precipitaciones y temperatura

Las principales características de las *precipitaciones* son su concentración y su variabilidad. La concentración se manifiesta en la existencia de una estación húmeda (de octubre a marzo) en la que se producen más del 80 % de las lluvias, y otra seca (de abril a septiembre) en la que son muy escasas (FAO, 1972).

La variabilidad se manifiesta en la existencia de períodos o secuencias húmedas y secas. La precipitación media en la estación de Sevilla-Tablada entre los años 1871-1987 es de 562 mm/año con una máxima de 1.063 mm, en 1895 y mínima de 158 mm, en 1874; es decir la mínima ha llegado a ser tres veces inferior a la media y seis veces inferior a la máxima. La precipitación media anual para la estación de Sevilla-Tablada es de 602 mm, según las fichas hídricas normalizadas del Instituto Nacional de Meteorología (Almarza, 1984). Esta diferencia considerable (40 mm), es atribuible al menor número de años para obtener la media de dichas fichas normalizadas. En la curva de desviaciones acumuladas de la estación de

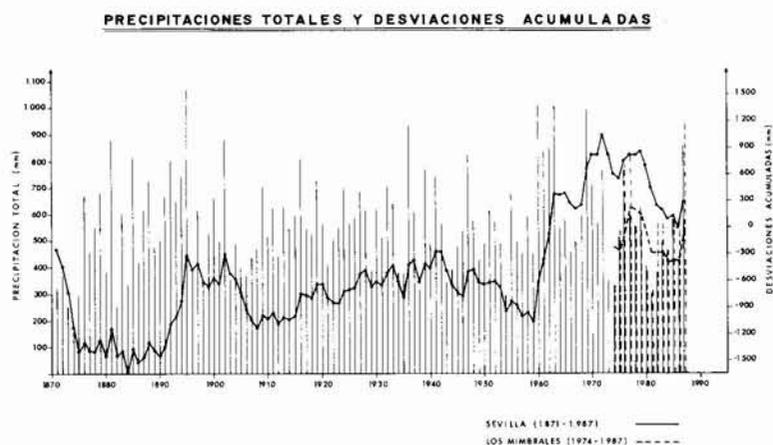


Fig. 3.—Precipitaciones totales y desviaciones acumuladas en las estaciones meteorológicas de Sevilla-Tablada y Los Mimbrales.

Sevilla-Tablada (fig. 3) se pueden observar alternancias de secuencias húmedas y secas de duración muy irregular, con precipitaciones netamente por encima o por debajo de la media.

En la tabla 1 se dan las principales secuencias, su duración y su precipitación media. Los datos de esta Tabla volverán a ser comentados posteriormente, al estudiar la secuencia climática considerada en el modelo del IGME (1987). Destaca una secuencia de 5 años (entre 1871 y 1875) extremadamente seca (precipitación media anual 280 mm) y otras dos muy húmedas entre 1891 y 1895 (cuatro años; media de 785 mm/año). Precipitaciones medias inferiores a 450 mm/año en secuencias de 3 a 7 años no pueden considerarse anómalas. Recientemente se puede observar un período de corta duración muy seco (396 mm/año) entre 1973 y 1975, uno húmedo (637 mm/año) entre 1976 y 1979, y otro seco (437 mm/año) con una duración relativamente larga, siete años, de 1979 a 1986. El Jefe del Servicio de Hidrología de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, Antonio Silgado (comunicación verbal el 27-3-90) opina que los datos antiguos de pluviometría de la estación de Sevilla-Tablada, parecen tener errores sistemáticos y por ello son poco fiables.

La estación de Los Mimbrales (fig. 3) —situada dentro de la zona estudiada, muy próxima a El Rocio— aunque tiene una serie de datos corta (de 1975 a 1987) presenta una tendencia, en cuanto a la sucesión de períodos húmedos y secos, y una precipitación media (556 mm) similar a la de Sevilla, por lo que esta última se puede considerar, al menos en este aspecto, representativa de la zona.

La temperatura media anual oscila entre 17° y 19° C; el régimen térmico está caracterizado por una temperatura media elevada en verano (superior a 25° C)

Tabla 1. Secuencias de precipitación en Sevilla-Tablada desde 1871 a 1987 (valor medio 562 mm/año)

Años	Secuencias	Duración (años)	Precipitación media (mm)
1871-1875	seca	5	280
1876-1890	media	15	557
1891-1895	húmeda	5	785
1896-1899	seca	4	472
1900-1902	húmeda	3	680
1903-1908	seca	6	423
1909-1942	media-húmeda	34	585
1943-1959	media-seca	17	512
1960-1972	húmeda	13	723
1973-1975	seca	3	396
1976-1979	húmeda	4	637
1980-1986	seca	7	437

y moderada en invierno (unos 10° C). No obstante la benignidad del clima, no es una zona libre de heladas produciéndose éstas entre los meses de diciembre y febrero, y, excepcionalmente, incluso en noviembre y marzo (FAO, 1972).

Balance hídrico

Está condicionado por la elevada temperatura media y la irregularidad de las precipitaciones. El IRYDA (1978) considera que la lluvia útil media de la zona (precipitación menos evapotranspiración real) es de unos 180-190 mm/año. Para esta misma magnitud y como valor medio interanual en la estación de Sevilla-Tablada, Almarza (1984) obtiene los valores de 197, 172 y 122 mm, según que se suponga, respectivamente, que la reserva de agua en el suelo es

75, 100 ó 150 mm. Suso (1988) efectuó los balances hídricos mensuales de la estación pluviométrica de Los Mimbres en tres años hidrológicos tipo en cuanto a su precipitación total: seco (1980-81) con 285 mm; medio (1981-82) con 556 mm; y húmedo (1977-78) con 718 mm. Para su elaboración supuso una reserva de agua en el suelo de 100 mm y utilizó la evapotranspiración potencial (ETP) media mensual calculada por Menanteau (1980) para la estación de El Abalarío (situada unos 10 km al O de El Rocío) por no disponerse de datos de temperatura de la estación de Los Mimbres. En el año seco el exceso de agua (lluvia útil) es nulo; en el año húmedo es de 231 mm, mientras que en el año medio es de 214 mm. La diferencia de lluvia útil entre el año medio y el húmedo es poco significativa en estos dos casos concretos; ello se debe a que la época en que se produce la precipitación condiciona las posibilidades de existencia de escorrentía (entendiendo por tal el conjunto de la superficial y la subterránea). La distribución temporal de las lluvias juega un papel primordial a la hora de la generación de exceso de agua; en principio las lluvias producidas de mayo a octubre sólo excepcionalmente dan lugar a la existencia de escorrentías significativas. De todas formas, no debe olvidarse que estos balances, especialmente a nivel mensual, sólo constituyen una relativa aproximación a la realidad.

Los balances hídricos propuestos más arriba únicamente pretenden ilustrar sobre la dificultad de la estimación de la posible recarga del acuífero y sobre su irregularidad; no son valores definitivos sino que sólo son cifras orientativas en cuanto a la disponibilidad de agua; cambios en la reserva de agua en el suelo, zonas de nivel freático próximo a la superficie, plantaciones de eucaliptos, etc... son factores que modifican la ETP y la ETR y, por tanto, el exceso o déficit de agua en el suelo. No obstante estas incertidumbres, los datos anteriores parecen confirmar que en los años secos, p.e., con precipitación menor de 300 mm, la recarga que recibe el acuífero es prácticamente nula.

Hidrología de superficie

Los principales cursos de agua que recorren la zona son los arroyos de La Rocina, el de la Cañada Marín, el del Partido y el de la Cañada Mayor que se unen a su entrada en las marismas formando un solo «caño», llamado Madre de las Marismas de El Rocío. Este curso de agua juega un importante papel en el régimen hídrico del PND. En efecto, debido a distintas obras de transformación agraria la aportación de la Madre de las Marismas era, según el MOPU (1979), la única aportación significativa de

agua dulce no contaminada que recibían las marismas, además del agua de lluvia caída sobre las propias Marismas. El río Guadiamar, que era otra fuente importante de agua para las Marismas, fue desviado hace años hacia el Guadalquivir y no entra en el PND; además, sus aguas están sensiblemente contaminadas por las actividades mineras y agrícolas. El denominado Plan de Regeneración Hídrica de las Marismas volverá a introducir, mediante bombeo, aguas del río Guadiamar en las Marismas, si se confirma que estas aguas tienen una calidad aceptable.

Los datos de aforo de la Madre de las Marismas son muy escasos; sólo se dispone de aforos realizados una vez al mes entre los años 1969 y 1971 durante el «Proyecto Guadalquivir» de la FAO; el área total de la cuenca de la Madre de las Marismas es de unos 1.040 km² con una aportación anual media estimada de 140 hm³, estando la mínima y la máxima registradas en 30 y 470 hm³ respectivamente (FAO, 1972; MOPU, 1979). Estas cifras, dada la falta de aforos regulares y continuados, hay que tomarlas con mucha prudencia. Al parecer, hasta hace algunos años el propio Patronato no autorizó a la construcción de estaciones de aforo dentro del Parque o Pre-parque.

Salvo en épocas de lluvias importantes, dada la elevada permeabilidad de las formaciones superficiales, la escorrentía de los arroyos anteriormente citados debe tener un significativo componente de origen subterráneo. No obstante, debido a las oscilaciones estacionales del nivel freático estos arroyos quedan secos en los períodos de estiaje. En la pág. 4 del informe del GTA (1989) sobre el informe de Hollis *et al* (1989) se afirma que la mayor parte de las aportaciones del arroyo de La Rocina son *evidentemente* superficiales. Estos autores desconocen las razones de dicha evidencia.

Según la opinión de prácticamente todos los autores, la aportación de agua subterránea a las marismas desde el acuífero que las subyace, a través de la capa semiconfinante, puede considerarse prácticamente irrelevante desde el punto de vista del balance hídrico (Yagüe y Llamas, 1984).

Las marismas del PND, con una máxima extensión actual de unos 270 km² (Tenajas y Llamas, 1986), están sometidos a ciclos estacionales de encharcamiento-desección condicionados principalmente por las lluvias, ya sea directas o a través de los arroyos que en ellas desembocan. Una vez terminadas las precipitaciones, la escorrentía subterránea de los arroyos hasta que quedan secos en el estiaje, contribuye a mantener inundadas las marismas. Por otra parte, la descarga del acuífero libre en su contacto con las marismas —en el ecotono de La Vera y La Retuerta— contribuye también, aunque en menor medida, a su encharcamiento (cf. Rodríguez Arévalo, 1984). El

período de inundación suele comenzar hacia octubre o noviembre y dura hasta marzo o abril e incluso, excepcionalmente, hasta mayo. El espesor medio de la lámina de agua es de unos 0,2-0,3 m, y la capacidad máxima de almacenamiento de agua de las marismas es del orden de 30 hm³ (MOPU, 1979). Esto hace que en los períodos de grandes precipitaciones las marismas sólo pueden almacenar una pequeña proporción de la aportación hídrica que les llega a través de la Madre de las Marismas que, como antes se dijo, puede suponer varios centenares de hm³ en la época lluviosa. El exceso de aportación sobre la reducida capacidad de embalse (unos 30 hm³) es evacuado al río Guadalquivir por las distintas compuertas construidas en el dique natural, en la actualidad recrecido, que hay en la zona SE de las marismas. En otras palabras, aunque el año sea húmedo el espesor medio del agua sobre la marisma es siempre reducido (0,2 a 0,3 m) al comienzo del estiaje. Así pues, la desecación de las marismas se explica fundamentalmente por evaporación física; en efecto, el poder evaporante de la atmósfera en los meses estivales es muy superior al espesor máximo de la lámina de agua cuando cesan las lluvias y las aportaciones de la Madre de las Marismas.

La calidad de las aguas superficiales que llegan a través del arroyo de La Rocina y de los otros «caños» no se conoce con el detalle que sería conveniente. Existen claros problemas de contaminación orgánica procedentes de algunos pueblos y de algunas almazaras que envían sus aguas residuales a dichos «caños». El más contaminado parece ser el arroyo Ajonjolí (MOPU, 1979). En los últimos años la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir realiza análisis con frecuencia aproximadamente mensual en una serie de puntos, en los que ha analizado también los pesticidas en algunas muestras. Según Hernández (1988, comunicación personal entregada con motivo de la misión WWF) esos datos parecen poco representativos pero muestran ya indicios de contaminación por algunos pesticidas, como el lindano; hace también notar Hernández lo extraño que resulta la inexistencia de compuestos derivados del DDT, pues este compuesto parece seguir utilizándose, a pesar de estar prohibido.

Los «caños» que atraviesan el ecotono suelen tener una longitud máxima de 1000 m. Su régimen por lo general es torrencial por lo que sólo llevan agua tras precipitaciones intensas, salvo en su parte más baja, en donde el flujo de agua es más constante, con un caudal medio típico del orden de 0,5 l/s (Rodríguez Arévalo, 1984).

En general, las lagunas ubicadas fuera de las marismas, son someras (profundidad inferior a un metro) y de reducida superficie. Su dimensión mayor

suele ser inferior a 50 m, aun cuando hay algunas que llegan a los 500 m (laguna de El Peladillo y lagunas de El Acebuche). Algunas de estas lagunas tienen su fondo por encima del nivel freático regional y por tanto tienen un carácter efímero y sus aguas suelen ser dulces y sus suelos no son hidromorfos ni salinos. Otras lagunas cortan la superficie freática regional y su contenido en agua depende de la oscilación estacional de esta superficie. Algunas tienen carácter permanente. Estas lagunas suelen estar en zonas de descarga de las aguas subterráneas; no obstante la situación de descarga-recarga de la laguna en relación con el acuífero puede variar a lo largo del tiempo y en las diferentes zonas de la laguna (cf. Vela y Llamas, 1986). La composición química del agua de cada una de estas lagunas depende esencialmente de sus relaciones con el acuífero. Las lagunas de El Acebuche, situadas junto al Centro de Recepción del PND, tienen un régimen artificial pues, aun estando «colgadas» sobre el nivel freático regional, se mantienen permanentemente con agua que se extrae por bombeo del propio acuífero.

Hidrogeología

Generalidades

El acuífero Almonte-Marismas tiene una extensión de unos 3.400 km² (FAO, 1972). Como puede verse en la figura 1, sus límites son: en el N los afloramientos de las margas azules del Andaluciense; el río Tinto al O; los afloramientos del olistostroma subbético en la margen izquierda del Guadalquivir; y el océano Atlántico al S y al SO.

Básicamente, el acuífero propiamente dicho está formado por la serie de depósitos detríticos del Mioceno superior y Pliocuaternalio, recubiertos por materiales fluvio-marinos y eólicos del Cuaternario. Su litología se caracteriza por la heterogeneidad tanto en sentido vertical como horizontal, siendo de destacar los frecuentes cambios laterales de facies, con intercalaciones de lumaquelas, areniscas y arcillas entre las gravas y arenas que lo constituyen; su potencia aumenta de N a S presentando espesores que varían entre los 10-20 m al N de Almonte, los 80-100 m., junto a las marismas y los 200 m., en las proximidades de la desembocadura del Guadalquivir (IRYDA, 1976; IGME, 1982).

En el sistema acuífero se pueden diferenciar claramente dos zonas: una de ellas, con unos 1.900 km², es libre; la otra, con unos 1.500 km², está confinada bajo los sedimentos arcillo-limosos de las marismas (FAO, 1972).

Según el IGME (1983) la permeabilidad aumenta de N a S oscilando entre valores inferiores 1 m/día junto al límite N, y 1-35 m/día junto a las marismas; en la parte confinada, en general, es superior a 10 m/día. La transmisividad también aumenta desde el N —donde, con valores en torno a 10 m²/día, es mínima— hacia el S y SE; en las proximidades del contacto acuífero libre-acuífero confinado tiene valores de unos centenares de m²/día, y bajo la marisma llega a superar los 1.000 m²/día. También según el IGME (1983), el coeficiente de almacenamiento oscila entre 10⁻³ y 10⁻⁴ en el acuífero confinado; la porosidad eficaz en la zona libre varía entre 0,02 y 0,05. Sin embargo, hay que hacer notar que la justificación del valor de la porosidad eficaz no consta ni en IGME (1983) ni en ninguno de los modelos numéricos del IGME en los que se adopta un valor medio de 0,03 (cf. IGME, 1982).

La recarga procede esencialmente de la infiltración de las precipitaciones directas sobre el acuífero libre; mucha menor importancia tienen los retornos de riego. La descarga se realiza por drenaje hacia el mar entre los ríos Tinto y Guadalquivir, y hacia los ríos y arroyos, destacando los de La Rocina y del Partido; especial interés tiene, por su papel ecológico, la descarga por rezume y evapotranspiración a través de prados húmedos, «caños» y lagunas en los ecotonos de La Vera y La Retuerta. También se produce una pequeña descarga por percolación vertical ascendente a través de la capa semiconfinante de las marismas, y posterior evaporación.

Yagüe y Llamas (1984) pusieron de manifiesto las diferencias que existían en la estimación de los diferentes términos del balance hídrico según los diversos autores y la necesidad de afinar esos datos para la mejor gestión del acuífero. Suso (1988) resume los datos de los distintos autores. La recarga se estima en 100 hm³/año por FAO (1970); en 318 hm³/año por Lucena y García (1978); en 200 hm³/año por IGME (1983 y 1987). La descarga a los ríos (Tinto, La Rocina, Guadiamar y Guadalquivir) varía entre 8 hm³/año (IRYDA, 1976) y 91 hm³/año (Lucena y García, 1978); las salidas por evapotranspiración en zonas con nivel freático próximo a la superficie pueden oscilar entre 73 hm³/año para el IGME (1983 y 1987) y 157 hm³/año para Lucena y García (1978). Parece fuera de duda que convendría afinar el margen de error que existe en estas cifras del balance, dada la importancia económica y ecológica del sistema acuífero de Almonte-Marismas. Hay que hacer notar que, a pesar de las divergencias en algunas cifras del balance, hay un notable consenso entre los diversos autores en lo que se refiere al funcionamiento hidrológico general del sistema, como se comenta a continuación.

Funcionamiento hidráulico: comentarios sobre los modelos de flujo

Han sido realizados un buen número de modelos numéricos de flujo (FAO, 1970; IRYDA, 1976; LUCENA Y GARCÍA, 1978; IGME, 1982, 1986 y 1987; VELA, 1984; YAGÜE Y LLAMAS, 1984) que, constituyen herramientas de trabajo útiles, si se utilizan con la oportuna precaución. No se puede olvidar que los resultados de un modelo matemático no son mejores que los datos que se le introducen. Se acaba de ver que existen todavía no pocas incertidumbres en cuanto a los parámetros utilizados (p.e., la porosidad eficaz) y en cuanto a las condiciones en los límites (p.e., la recarga). Las hipótesis de funcionamiento hidráulico de todos los modelos son similares a las ya anunciadas más arriba: recarga por infiltración de la precipitación directa sobre la superficie del acuífero libre; salidas por drenaje al mar, ríos y arroyos; por evapotranspiración en áreas con nivel freático próximo a la superficie; y por percolación a través del acuitardo de las marismas. Las diferencias existentes, entre los diferentes modelos pueden sintetizarse en tres aspectos:

A) *Problemas de límites geométricos del sistema:* los límites E y SE del sistema acuífero varían considerablemente según los autores. Para IRYDA (1976) y para Yagüe y Llamas (1984) está situado en el contacto con las formaciones impermeables del olistostroma subbético (límite natural del acuífero). Lucena y García (1978) sitúan estos límites en el río Guadalquivir y, bajo las marismas, en la isolinia de 1 gr/l de salinidad y suponen que en estos límites el nivel es constante. Por último, el IGME, en su modelo de 1982 y sus posteriores actualizaciones de 1986 y 1987, toma como límite la vertical del río Guadalquivir y lo considera impermeable; con ello la superficie del sistema acuífero queda reducida a unos 2.400 km² de los que 840 km² corresponden a la zona libre y el resto a la confinada.

B) *Incertidumbres sobre la recarga:* Las dificultades para la estimación de la recarga natural que debe ser introducida en un modelo de flujo de un acuífero son bien conocidas, especialmente en los países áridos y semiáridos y, en buena parte, están todavía sin resolver. En nuestra zona de estudio, dentro de su aparente simplicidad hidrogeológica es indudable que existen importantes variaciones en la cuantía de la recarga tanto en el tiempo como en el espacio. Así, por ejemplo, al tratar de los balances hidrometeorológicos, se ha visto previamente que la lluvia útil puede ser nula en los años secos y superior a 200 mm/año en años húmedos o normales. Evidentemente, también existe una variación en la cuantía de la recarga en el espacio, pues ésta en las dunas móviles será más elevada que en las arenas estabilizadas; y

en estas últimas, también dependerá del tipo de vegetación y suelo que exista; estos factores influyen en el reparto de la lluvia útil entre la infiltración eficaz y la escorrentía superficial.

No parece que se haya realizado todavía en Doñana un estudio suficientemente detallado (teórico y/o experimental) sobre este tema. Esto, unido a las variaciones en los límites del acuífero, explica las notables diferencias que, como ya se dijo, aparecen en las cifras dadas para la recarga total del sistema acuífero en los distintos modelos; entre 100 hm³/año en FAO (1970) y 318 hm³/año en Lucena y García (1978). La cifra utilizada por el IGME (1982, 1986, 1987) es 200 hm³/año, equivalentes a 160 mm/año de infiltración eficaz media.

C) *Incertidumbres sobre la función acuífero-río*: Como ya se dijo, se considera que los cursos de agua que atraviesan el acuífero libre (arroyos de La Rocina, Cañada Mayor, etc.) están en relación con el acuífero y son normalmente ríos ganadores. Sin embargo, la conexión entre el acuífero y el río o el acuífero y el mar no suele ser perfecta. En los modelos numéricos se suele simular esta conexión suponiendo que existe en el lecho del río una capa de menor permeabilidad que dificulta la conexión entre el acuífero y el río. Este parece haber sido el método utilizado en los tres modelos del IGME. Ahora bien, como ya advirtió Llamas (1988d) y también reconocen Hollis *et. al.* (1989) en esos tres informes del IGME, este importante aspecto está muy poco documentado. Los resultados obtenidos en esos modelos podrían indicar que se ha supuesto, por una parte, una excesiva conexión hidráulica entre el acuífero y el río; y por otra parte, que los arroyos circulan todo el año, lo cual no responde a la realidad. Más adelante se comentará la notable repercusión práctica de esas posibles hipótesis erróneas.

Características hidrogeológicas de la zona de El Rocío

Como previamente se dijo, en una serie de trabajos se puso de manifiesto que el PTAAM podía tener un adverso impacto ecológico en el PND y que dicho impacto se advertiría en primer lugar en la zona próxima a El Rocío. Esta conclusión se basaba, en parte, en los resultados de los propios modelos de flujo del IGME (1982 y 1987). Los datos y/o las conclusiones de los modelos del IGME han sido cuestionados por algunos miembros del Grupo de Trabajo sobre Aguas (GTA), constituido dentro del Patronato del PND. Como puede comprobarse mediante la lectura de la pág. 2 del Acta del 23.X.87, las objeciones a los informes del IGME suelen aludir al carácter teórico de todos los modelos de simulación y

a la hipótesis climática supuesta que se considera altamente improbable. Los autores de este trabajo también tenemos algunas reservas sobre los modelos del IGME pero nuestra opinión, que luego se justificará detalladamente, es que las predicciones y las conclusiones de los correspondientes informes pecan de excesivo optimismo. En otras palabras, el impacto de los bombeos va a producirse antes de lo indicado en esos informes del IGME.

Por ello, después de la aparición del informe IGME (1987) se consideró oportuno realizar un estudio hidrogeológico clásico, es decir sin incluir ningún modelo matemático nuevo, que permitiera conocer en detalle la hidrogeología de la zona probablemente más impactada por los bombeos y que sintetizase los datos *históricos* disponibles sobre la evolución de los niveles piezométricos. Este estudio ha constituido la tesis de licenciatura de Suso (1988) de la que, a continuación, se resumen los aspectos más significativos.

El estudio detallado de las proximidades de El Rocío se ha centrado fundamentalmente en el Sector II del PTAAM (figs. 1 y 4). Se ha realizado en base a las columnas litológicas, características constructivas y parámetros hidráulicos de unos 50 sondeos, procedentes de los archivos del IGME y el IARA.

Litología del acuífero: en las descripciones litológicas de los sondeos perforados en la zona se aprecian, con frecuencia, diferentes criterios descriptivos de los materiales atravesados y distintos grados de detalle. La litología del acuífero es, vista en conjunto, relativamente simple: arenas y gravas ocasionalmente cementadas, con intercalaciones de lumaquelas, arcillas a veces arenosas y, ocasionalmente, margas. En detalle es muy compleja, con frecuentes cambios de facies, más o menos rápidos, tanto en sentido vertical como horizontal.

— *Las costras ferruginosas o «fragipan» (?)*: La existencia de costras ferruginosas o «fragipan» había sido mencionada por algunos edafólogos (Siljeström *et. al.*, 1987; Clemente *et. al.*, 1988). En los registros de los sondeos del IGME y del IARA nunca parece mencionarse la existencia de esas costras ferruginosas. Es posible que esto se debiera a que pasaron inadvertidas a los sondistas por su escaso espesor. En cualquier caso, como una primera aproximación, estos hechos parecen indicar que no existe una capa continua de «fragipan» con un espesor considerable.

La hipótesis del hidrogeológica del «fragipan» se formuló inicialmente en un informe interno anónimo del IARA de 1986. Consiste en suponer que esta capa es impermeable y en la zona del ecotono da origen a dos acuíferos separados por ella dentro del terreno arenoso. De este modo, aunque el nivel en el «acuífero inferior» descienda —como acusan muchos sondeos—, ese descenso no afectaría al «acuí-

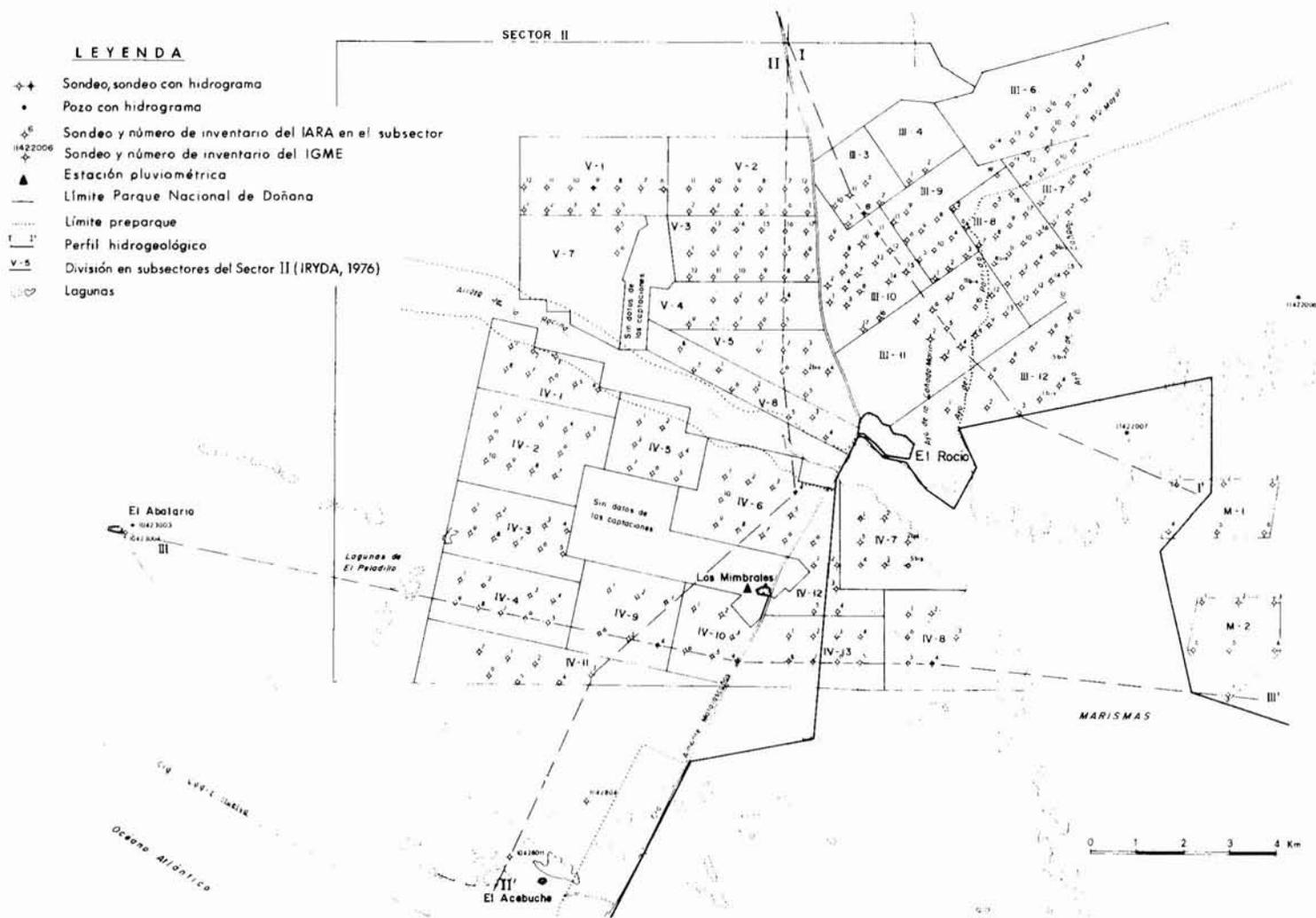


Fig. 4.—Mapa de inventario de puntos de agua.

fero superior» que es el que realmente tiene importancia para el ecosistema. Esta hipótesis también fue formulada en la reunión organizada por el capítulo español del SCOPE (1987) pero sin aportar datos escritos para su defensa. En nuestra opinión, parece difícil que esa capa pueda tener una continuidad y una impermeabilidad tales que permiten garantizar la existencia de un acuífero superior separado de un acuífero inferior que sería el explotado por los bombeos para el regadío. Será interesante hacer los oportunos sondeos y colocar piezómetros a distintas profundidades para verificar o rechazar esas hipótesis. Ahora bien, mientras no se realicen esas investigaciones parece poco prudente admitir que esa hipotética capa pueda evitar que el descenso ya observado en los sondeos profundos haga descender también y en plazo breve el nivel freático en el ecotono. Llamas y Rodríguez (1987) hicieron un amplio comentario sobre este tema al Presidente del Patronato del PND.

— *Geometría del sustrato del acuífero:* Junto al pueblo de Almonte (fig. 5) las margas azules se sitúan a unos 30 m de profundidad (cota + 30 m s.n.m.) para ir descendiendo suavemente hasta unos 6 km al N del arroyo de La Rocina en donde su cota absoluta se sitúa a -20 m s.n.m. y la pendiente aumenta bruscamente para descender a -70 m s.n.m. a unos 2-3 km al N de La Rocina; a partir de aquí el techo de las margas azules descende con suaves ondulaciones hasta la cota -100 m bajo la zona de El Acebuche. En sentido O-E (ver fig. 6) el zócalo descendiendo suavemente, desde la cota -40 m s.n.m. bajo a El Abalarío hasta a unos 4-5 km al O del contacto con las marismas donde, tras un salto brusco de unos 40 m, descende a -170 m s.n.m. En síntesis, en las

proximidades de El Rocío la base del acuífero desciende de N a S de modo relativamente rápido y de O a E con pendiente más suave. Los espesores de los materiales detríticos aumentan desde unos 20 ó 30 m cerca de Almonte, hasta unos 120 m junto a la marisma y superan los 180 m bajo ésta.

— *Parámetros hidráulicos:* Considerada en conjunto, la zona de las proximidades de El Rocío es relativamente homogénea. La transmisividad típica está entre 350 y 450 $m^2/día$, con valores extremos de 150 y 1.200 $m^2/día$. Sin embargo, vista en detalle, se observan algunas variaciones significativas; los valores máximos, entre 700 y 1.200 $m^2/día$, parecen situarse en una franja de dirección aproximada E-O, entre 4 y 6 km al N de El Rocío, más o menos coincidente con el cambio de pendiente del techo del sustrato impermeable, anteriormente mencionado. Al S de esta franja las transmisividades oscilan entre 200 y 500 $m^2/día$ y van aumentando hacia la marisma.

No se dispone de medidas directas de la permeabilidad sino únicamente de estimaciones a partir de los ensayos de bombeo, es decir, de la transmisividad y el espesor saturado. Como ya se dijo, a escala de todo el acuífero, la permeabilidad parece aumentar de N a S hasta hacerse máxima en la parte confinada bajo las marismas, pero, al igual que la transmisividad, observada en detalle, se aprecian variaciones locales similares a las de ésta. La permeabilidad media para el conjunto de la zona se estima en unos 15 $m/día$, mientras que al N de El Rocío parece alcanzar unos 20 $m/día$, encontrándose los valores máximos en los sondeos situados junto a la ruptura de pendiente del techo del zócalo impermeable para disminuir hacia el S, hasta valores en torno a 10 $m/día$

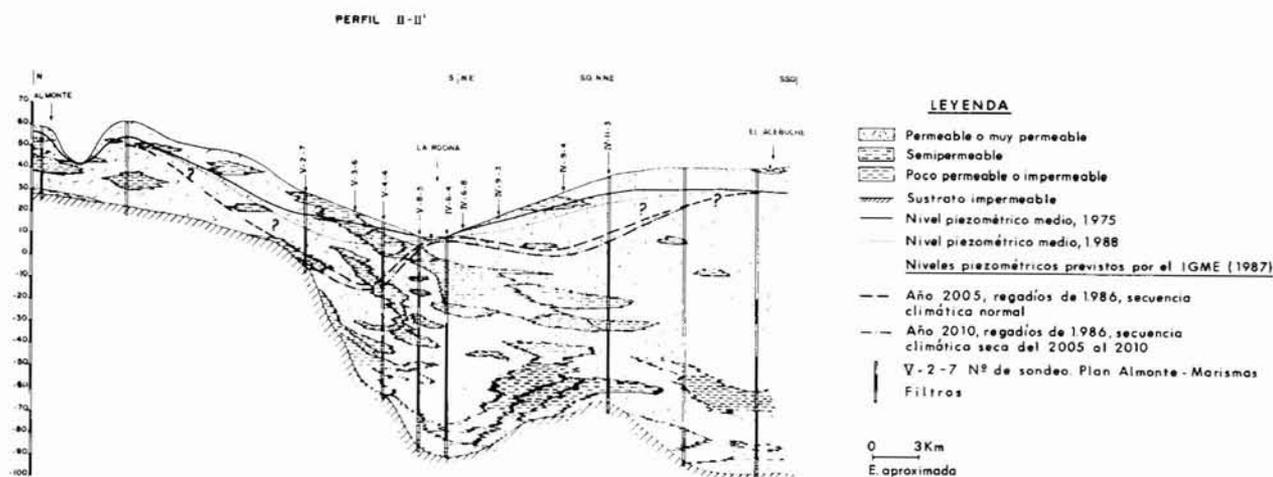


Fig. 5.—Perfil hidrogeológico II-II' (según Suso, 1988).

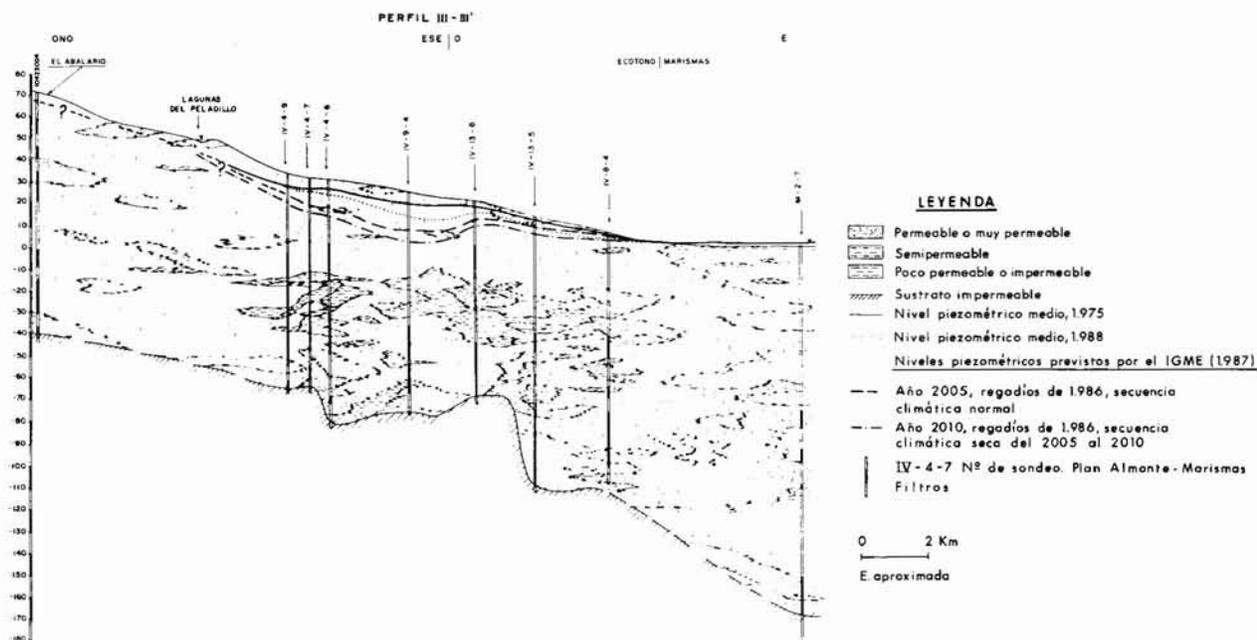


Fig. 6.—Perfil hidrogeológico III-III' (según Suso, 1988).

junto a las marismas donde vuelve a aumentar a valores de 15 a 20 m/día.

Como conclusión de lo anteriormente expuesto se puede decir que, aunque a nivel general, el área estudiada es una zona de transmisividad y permeabilidad media dentro del acuífero, analizada en detalle se aprecian variaciones locales que se desvían de la tendencia general de aumento de estos parámetros de N a S, y que corresponden a variaciones litológicas locales.

Impacto de la explotación de las aguas subterráneas

Antecedentes y enfoque

Este apartado se basa principalmente en las notas entregadas a la misión WWF/IUCN (cf. Llamas, 1988 d) y en la tesis de Suso (1988); se harán también los oportunos comentarios sobre el informe de la citada misión (Hollis *et al.*, 1989), así como de algunos documentos posteriores.

Algunas veces se ha aludido al probable futuro deterioro ecológico de Doñana con el término de «daimielización» por su analogía al deterioro ya producido en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel, debido principalmente al descenso del nivel freático por la extracción de aguas subterráneas (cf. Llamas,

1988 a y 1989 b). Dicho descenso provocó, en primer lugar, una disminución drástica de los caudales de agua superficial (ríos Cigüela y Guadiana) que llegaban a las Tablas; en segundo lugar, una inversión del sentido del flujo de aguas subterráneas en relación con las Tablas; éstas han pasado de ser una zona de descarga a convertirse en una gigantesca balsa de recarga artificial, cuando no están secas. A los dos efectos mencionados hay que unir el de la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas por fertilizantes y pesticidas. En las Tablas de Daimiel funciona actualmente un complejo, costoso y de dudosa eficacia plan de regeneración hídrica; ahora bien, la realidad jurídica y socio-económica de la llanura manchega introduce notables variaciones con relación al problema de Doñana (cf. Llamas, 1989 a).

Los problemas relacionados con la conservación de los humedales son, en general, complejos debido al cúmulo de intereses y organismos que intervienen en su gestión. Doñana no es una excepción, sino más bien un ejemplo típico de complejidad notable. Teóricamente el Patronato del PND debería coordinar la acción de todos los organismos que, de un modo u otro, intervienen en la gestión del Parque. La realidad, según Hollis *et al.* (1989) dista mucho de ser así.

Ciertamente una mejor coordinación entre los diferentes organismos implicados sería muy conveniente para mejorar el número y la calidad de los datos hidrológicos del PND para conocer con mayor pre-

cisión su funcionamiento. No obstante, datos ya conocidos desde el informe del IGME (1982) indicaban que lo prudente era no ampliar los regadíos de Almonte-Marismas. Así se hizo saber informalmente pero con claridad por Llamas desde 1984 a los organismos con responsabilidades en el tema y de modo especial a la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir a la que según la legislación vigente corresponde la protección de estas zonas húmedas; y con escritos oficiales de Llamas al Patronato del PND con fecha 9, febrero 1987 y 30, marzo 1987. El informe posterior del IGME (1987) vino a refrendar lo anteriormente expuesto. No obstante, como previamente se ha dicho, este informe, debido a un manejo inadecuado de los datos del modelo, da unos resultados y unas conclusiones más optimistas, que el informe del IGME (1982), como indica Llamas (1988 b y d). Esas conclusiones han dado ocasión al IARA, con la «aquiescencia» del Director General del ICONA (comunicación escrita del 31.V.89 a Llamas), no sólo para mantener las 7.000 ha de regadío admitidas por IGME (1987) sino para ampliarlas hasta 10.000 ha.

Antes de pasar a los apartados siguientes, se hace notar que en este trabajo prácticamente no se habla de los efectos de bombeos para las urbanizaciones de Matalascañas y de Costa Doñana, por ser su caudal sensiblemente menor que el de los regadíos y no ser contaminantes para el PND; también por existir alternativas, desde el punto de vista económico, para sustituir esos bombeos; finalmente porque su efecto en la zona de El Rocío es irrelevante. No obstante, sería necio ignorar que los fuertes intereses económicos que implican estas urbanizaciones pueden haber jugado un papel decisivo en la problemática general de Doñana.

Planes de regadío

Desde la realización por la FAO, en la década de los años sesenta, del estudio hidrogeológico de la Cuenca del Guadalquivir definiendo las principales características del Sistema Acuífero de Almonte-Marismas, los planes de desarrollo para la comarca de Doñana se basan, en buena medida, en el regadío mediante aguas subterráneas. Entre los años 1970 y 1975, en base a los estudios conjuntos de la FAO, el IRYDA y el IGME, se perforan en las proximidades del PND 462 sondeos con un caudal conjunto, en aforo, de unos 30.000 l/s. Parte de estos sondeos, debido a las sucesivas ampliaciones del Parque han quedado englobados dentro de él, o en su Preparque. En concreto en el Sector II (fig. 4) se perforaron 276 sondeos, de los que 229 resultaron positivos, con un caudal conjunto aforado en 14.350 l/s (IRYDA, 1976). Las inversiones realizadas con dinero público

en el PTAAM hasta la fecha superan ampliamente, en valor actualizado, los 20.000 millones de pesetas (cf. Llamas *et al.*, 1987).

En 1974 fue aprobado por el Gobierno (Decreto 2.244/74 de 20 de julio) el Plan de Transformación Agraria Almonte-Marismas (PTAAM) que, inicialmente, previó una superficie total de regadío de 24.000 ha, para la que se asignó un volumen de extracciones de agua de 145 hm³/año. Este proyecto se ha visto reducido debido a las presiones de grupos conservacionistas —y, probablemente, también a la disminución de la estimación inicial de recursos— hasta un máximo de 14.725 ha (IARA, 1986). Recientemente, a instancias del Patronato del PND, el Plan Director Territorial de la Comarca de Doñana contempló una nueva reducción de la superficie a transformar en regadío, dejándola en 10.140 ha, cifra que, según las últimas previsiones conocidas, se debía alcanzar en el año 1989 (IARA, 1986 y sin fecha). Las dotaciones de agua necesarias estimadas por el IARA (1986) son de 6.920 m³ por hectárea transformada. Sin embargo, a efectos de los modelos de flujo se cuenta una extracción neta de 6.220 m³/ha, pues se supone un retorno del 10 % y que cada año sólo se riega una superficie del 85 % de la transformada. Es significativo hacer notar la escasa atención prestada a las advertencias sobre la oportunidad de detener la expansión de los regadíos en tanto no se aclarase su impacto ambiental. Según el informe IARA (sin fecha) el regadío ha pasado de 5.950 ha en 1985 a 10.140 ha en 1990. Si de estas cifras se excluyen de regadíos privados, congelados en los últimos años, y se tienen sólo en cuenta los realizados por el propio IARA, se ha pasado de 2.065 ha en 1985 a 6.085 ha en 1990, es decir, la superficie de regadío del IARA se ha triplicado.

Hollis *et al.* (1989) hacen referencia en su informe la falta de control de los caudales bombeados para regadío tanto por parte de los particulares como por el propio IARA. De momento, no parece que la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir tenga establecido un sistema para obtener una cifra aceptablemente precisa de los bombeos del área de Doñana.

Evolución de los niveles piezométricos y su influencia en la desecación del ecotono y en la disminución de los caudales de los cursos de agua

La red de control y los hidrogramas

Desde el año 1975 el IGME y el IARA vienen realizando medidas periódicas (semanal o mensual, por lo general) en un cierto número de pozos excavados

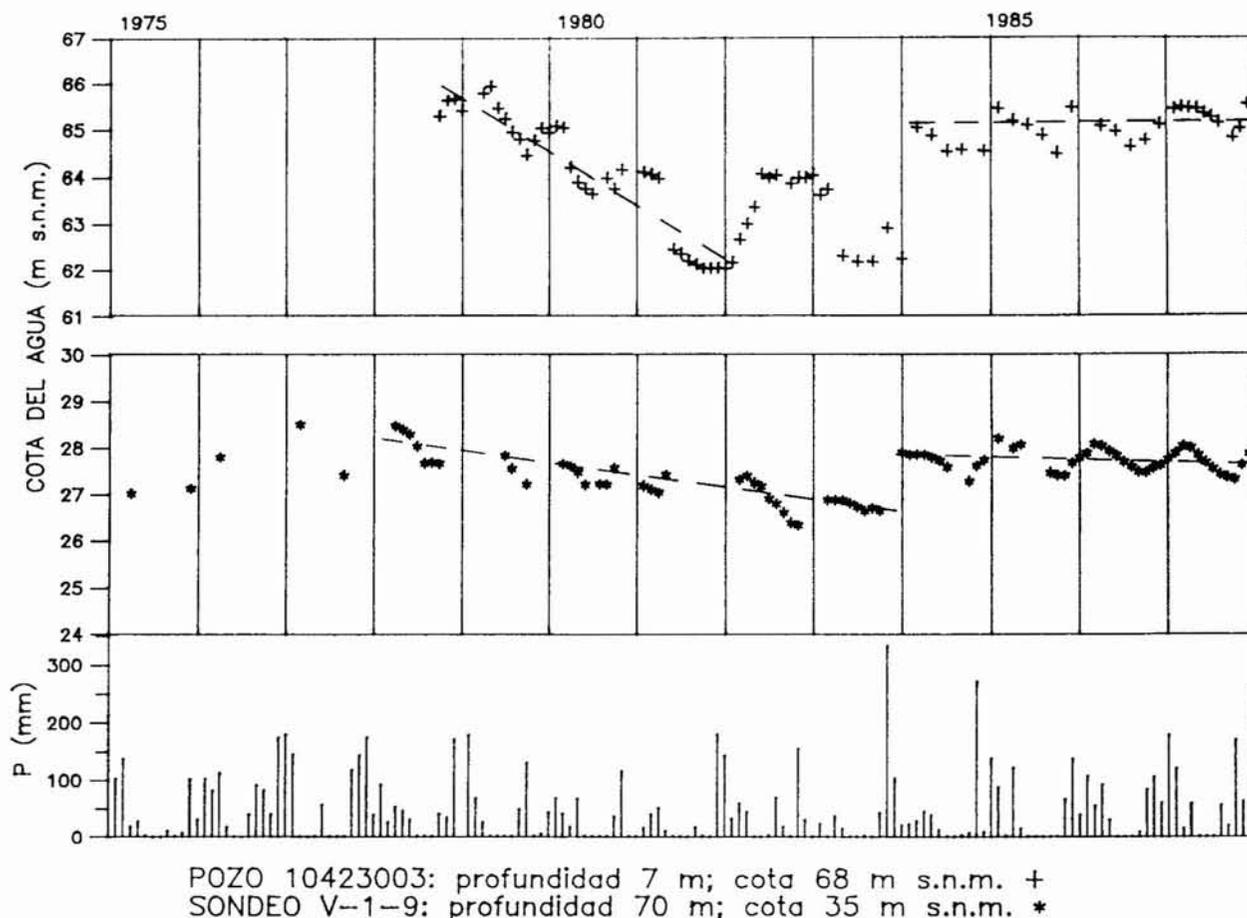


Fig. 7.—Hidrogramas de los puntos V-1-9 y 10423003.

y de sondeos. Suso (1988) presenta los hidrogramas con la evolución de dichos niveles piezométricos entre 1975 y 1988 en cuarenta y nueve puntos de la zona de su tesis (fig. 4). Dada la distinta frecuencia y regularidad de las medidas con que están realizados no todos los hidrogramas son igualmente significativos. El número total de puntos con medidas situados dentro del PND, o a menos de 500 m del límite del Parque o Preparque, es de unos 20, es decir, superior al indicado por Hollis *et al.* (1989).

En las figuras 7 a 9 se presentan unos hidrogramas cuyo análisis parece importante para predecir el impacto de los regadíos en el PND. No ha sido posible obtener de los organismos implicados (IARA, IGME, CHG) ningún tipo de datos ni sobre los pozos concretos que se bombean ni sobre la cuantía y el régimen de dichos bombeos. A pesar de esta falta de información, los datos disponibles permiten sacar importantes conclusiones sobre el impacto ecológico que van a producir estas extracciones de aguas subterráneas.

En primer lugar se observa, como era de esperar, una oscilación estacional, con niveles máximos al comienzo de la primavera y mínimos al comienzo del otoño. Estos niveles oscilan generalmente entre 0,5 y 1,5 m en puntos situados lejos de las zonas de regadío, p.e., en el sondeo V-1-9 (fig. 7). Las oscilaciones llegan a ser del orden de 10 m en puntos situados en la zona de regadío, p.e., en el IV-9-4 (fig. 8); estos puntos deben estar muy próximos a uno o más pozos de bombeo pero, como previamente se dijo, no se ha podido obtener información específica ni sobre los puntos de bombeo ni sobre el régimen de extracciones. No obstante, parece claro que los cambios estacionales de nivel importantes —p.e., superiores a 3 m— deben ser considerados como un efecto de bombeos próximos.

En todos los hidrogramas se ha calculado y dibujado la recta de regresión lineal. En muchos de ellos esta recta acusa una clara tendencia al descenso de los niveles, al menos desde 1978 (ver, p.e., los correspondientes a los cuatro puntos representados en la fi-

Tabla 2. Evolución de los niveles piezométricos (modificado de Suso, 1988)

Sondeo	Nivel medio del agua (m.s.n.m.)				Velocidad variación de nivel (m/año)	Oscilación media total (m)		Observaciones
	1975	1978	1987	1988 (*)	1978-87	1975-87	1975-88	
III-3-8	16,7	16,89	6,60	(5,5)	- 1,14	- 10,10	- 11,20	
III-3-11	16,00	(15,5)	(7,3)	6,47	- 0,96	- 8,70	- 9,53	(1)
III-9-11	15,78	(14,9)	(8,0)	6,52	- 0,77	- 7,78	- 9,26	(4)
III-10-10	14,37	14,79	(5,2)	4,44	- 1,07	- 9,17	- 9,93	
III-10-11	14,50	14,90	5,03	(3,90)	- 1,10	- 9,47	- 10,60	
III-10-12	13,03	13,33	3,85	(2,20)	- 1,05	- 9,18	- 10,83	
III-10-15	10,65	10,86	(3,1)	2,32	- 0,86	- 7,55	- 8,33	
III-11-2	8,95	(8,8)	(5,7)	4,72	- 0,34	- 3,25	- 4,23	(4)
III-11-3	8,36	(7,7)	(5,6)	5,00	- 0,23	- 2,76	- 3,36	(4)
III-11-4	7,61	(7,5)	(5,4)	4,72	- 0,23	- 2,21	- 2,89	(1)
III-11-6	8,99	8,79	4,07	4,51	- 0,52	- 4,92	- 4,48	
III-11-8	7,27	(7,1)	(5,3)	4,79	- 0,20	- 1,97	- 2,48	(4)
IV-1-6	16,73	(18,5)	(18,5)	18,57	+ 0,00	+ 1,77	+ 1,84	(4)
IV-2-2	22,91	(23,5)	(24,2)	23,91	+ 0,08	+ 1,29	+ 1,00	(4)
IV-4-2	21,25	(22,2)	(23,3)	23,00	+ 0,12	+ 2,05	+ 1,75	(4)
IV-4-6	30,42	(30,9)	(30,8)	30,00	- 0,01	+ 0,38	- 0,42	(4)
IV-4-9	28,47	(29,2)	(29,8)	29,20	+ 0,07	+ 1,33	+ 0,73	(4)
IV-6-4	8,39	8,30	6,60	(6,60)	- 0,19	- 1,79	- 1,79	Surgente 1976/77/78/79
IV-6-8	10,86	8,64	4,87	(7,50)	- 0,42	- 5,99	- 3,36	
IV-7-1	7,22	(7,1)	(5,3)	4,5	- 0,20	- 1,92	- 2,72	(4) Surgente 1975/76/77/78
IV-7-4	8,84	(8,6)	(7,1)	6,36	- 0,17	- 1,74	- 2,48	(4)
IV-7-5bis	4,25	(4,1)	(3,0)	2,45	- 0,12	- 1,25	- 1,80	(4) Surgente 1977/78
IV-8-4	5,72	5,75	4,38	3,31	- 0,15	- 1,34	- 2,41	
IV-8-5	7,92	(7,9)	(6,6)	6,05	- 0,14	- 1,32	- 1,87	(4)
IV-8-6	6,31	(6,5)	(5,2)	4,76	- 0,14	- 1,11	- 1,55	(4)
IV-9-3	17,84	18,58	14,64	(15,2)	- 0,44	- 3,20	- 2,64	
IV-9-4	20,72	20,58	14,09	(14,8)	- 0,72	- 6,63	- 5,92	
IV-9-6	26,53	(27,00)	(27,20)	26,53	+ 0,02	+ 0,67	+ 0,00	(4)
IV-13-3	12,83	(12,5)	(10,2)	9,21	- 0,26	- 2,63	- 3,62	(4)
IV-13-7	15,22	(16,1)	(16,4)	16,02	+ 0,03	+ 1,18	+ 0,80	(4)
IV-13-8	17,44	17,63	16,18	14,56	- 0,16	- 1,26	- 2,88	
V-1-6	24,77	(25,1)	(24,9)	24,17	- 0,02	+ 0,13	- 0,07	(4)
V-1-9	27,06	28,07	27,70	(27,5)	- 0,04	+ 0,64	+ 0,44	
V-2-3	21,23	21,62	(17,9)	18,27	- 0,41	- 3,33	- 2,96	
V-3-6	15,49	15,76	7,84	(6,8)	- 0,88	- 7,65	- 8,69	
V-3-8	16,11	(15,4)	(10,8)	9,84	- 0,51	- 5,31	- 6,27	(4)
V-3-16	14,85	(14,0)	(9,2)	8,42	- 0,53	- 5,65	- 6,43	(3)
V-4-4	15,33	15,06	9,46	9,09	- 0,62	- 5,87	- 6,24	
V-4-8	14,64	14,37	(9,5)	7,59	- 0,54	- 5,14	- 7,05	
V-5-1	13,82	(13,7)	(10,3)	9,20	- 0,38	- 3,52	- 4,62	(4) Surgente 1978
V-5-6	11,95	(11,5)	(6,5)	4,94	- 0,56	- 5,45	- 7,01	(4) Surgente 1977
V-8-4	6,35	(6,0)	(3,8)	2,78	- 0,24	- 2,55	- 3,57	(4) Surgente 1975/76/77/78/82
V-8-5	9,08	(8,60)	(6,30)	6,13	- 0,26	- 2,78	- 2,95	(4) Surgente 1976/77
V-8-6	12,78	(12,2)	(9,6)	8,85	- 0,29	- 3,18	- 3,93	(4)
V-8-7	12,77	11,83	(8,9)	7,87	- 0,33	- 3,87	- 4,90	
M-1-1	3,07	3,00	(1,70)	(1,50)	- 0,14	- 1,37	- 1,57	Surgente 1975/76/77/78/80
11422006	—	3,59	- 0,58	(- 1,50)	- 0,46	—	- 5,09	
11422007	—	1,57	1,77	(2,00)	+ 0,02	—	—	
10423003	—	65,48	65,17	(65,30)	- 0,03	—	—	

Nota: Los valores entre paréntesis se han estimado a partir del hidrograma del sondeo correspondiente.

* Niveles correspondientes a mayo de 1988 (Suso 1988).

(1) Sin datos desde 1977 hasta mayo de 1988

(2) Medidas no disponibles desde 1981 hasta mayo de 1988

(3) Sin datos desde 1978 hasta mayo de 1988.

(4) Sin datos desde 1982 hasta mayo de 1988.

gura 8 y a dos de los tres puntos representados en la figura 9). El ritmo de descenso, que llega a ser del orden de 1 m/año en los sondeos III 3-8 y III-10-11, lógicamente debe atribuirse a los bombeos para regadío.

Sin embargo, al observar los hidrogramas de algunos otros puntos puede verse que no se notan descensos progresivos o incluso que los niveles parecen aumentar.

En la tabla 2 se muestran los valores medios del nivel del agua para los años 1975, 1978 y 1987 en 49 sondeos de la zona. Se ha considerado como nivel medio de un año la media aritmética entre el máximo y el mínimo valor registrado en dicho año. Cuando en un año no hay medidas —o las que existen no

son representativas por corresponder a una misma época (de aguas altas o bajas)— se ha estimado la media a partir de la recta de regresión del hidrograma, indicándolo en la tabla mediante su inclusión entre paréntesis. En la misma tabla también se han incluido los valores correspondientes a una campaña de medidas realizada en la 2.ª quincena de mayo de 1988. Esta campaña se centró especialmente en los sondeos sin medidas desde el año 1982; por tanto, esos valores presentan una imagen instantánea de los niveles en el acuífero y no una situación media como los otros valores de la tabla. Figura también en la tabla la velocidad de variación del nivel medio (en m/año) entre los años 1978 y 1987, el descenso total del nivel medio observado entre 1975 y 1987 y entre

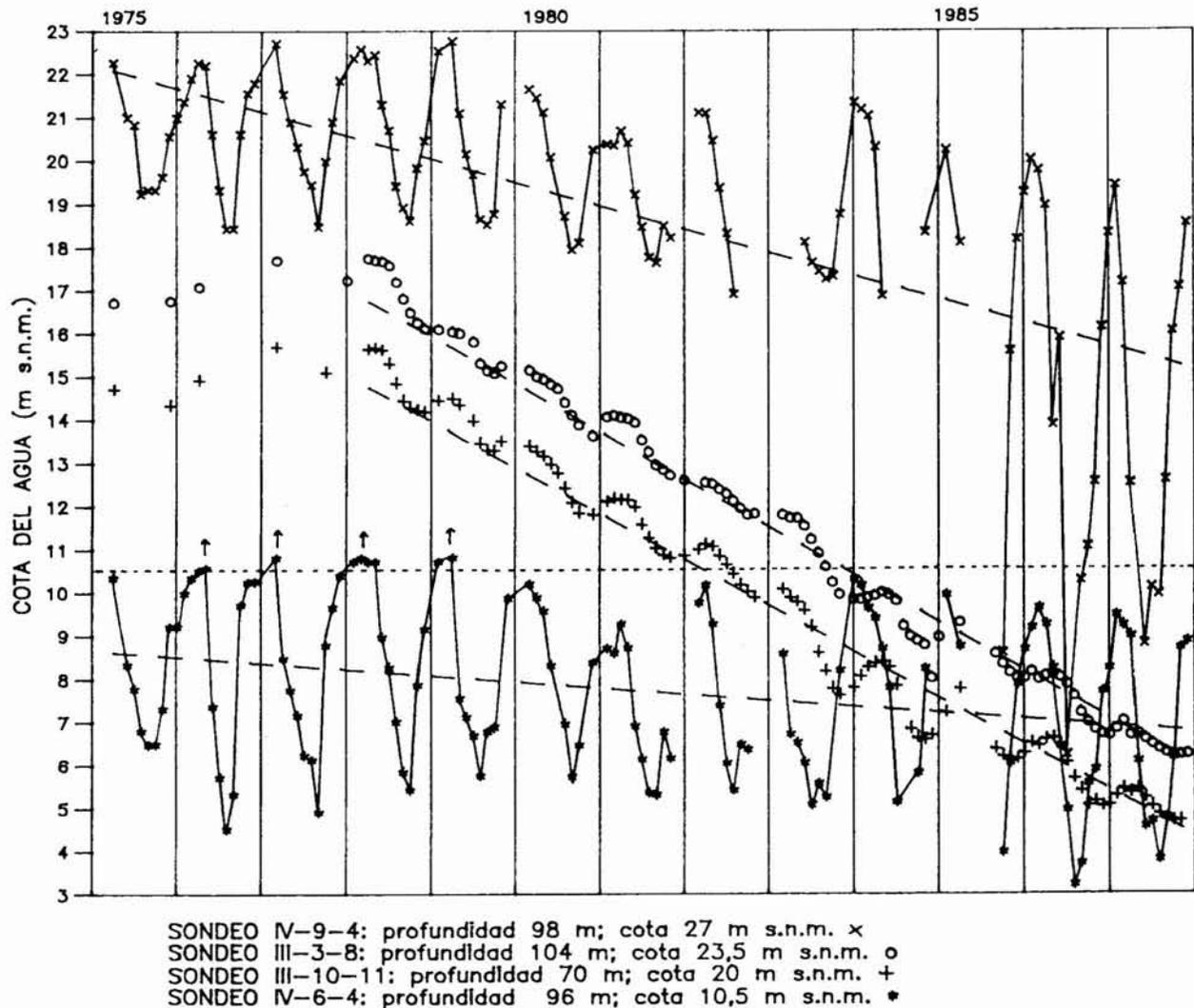


Fig. 8.—Hidrogramas de los puntos IV-9-4, III-38, III-10-11 y IV-6-4.

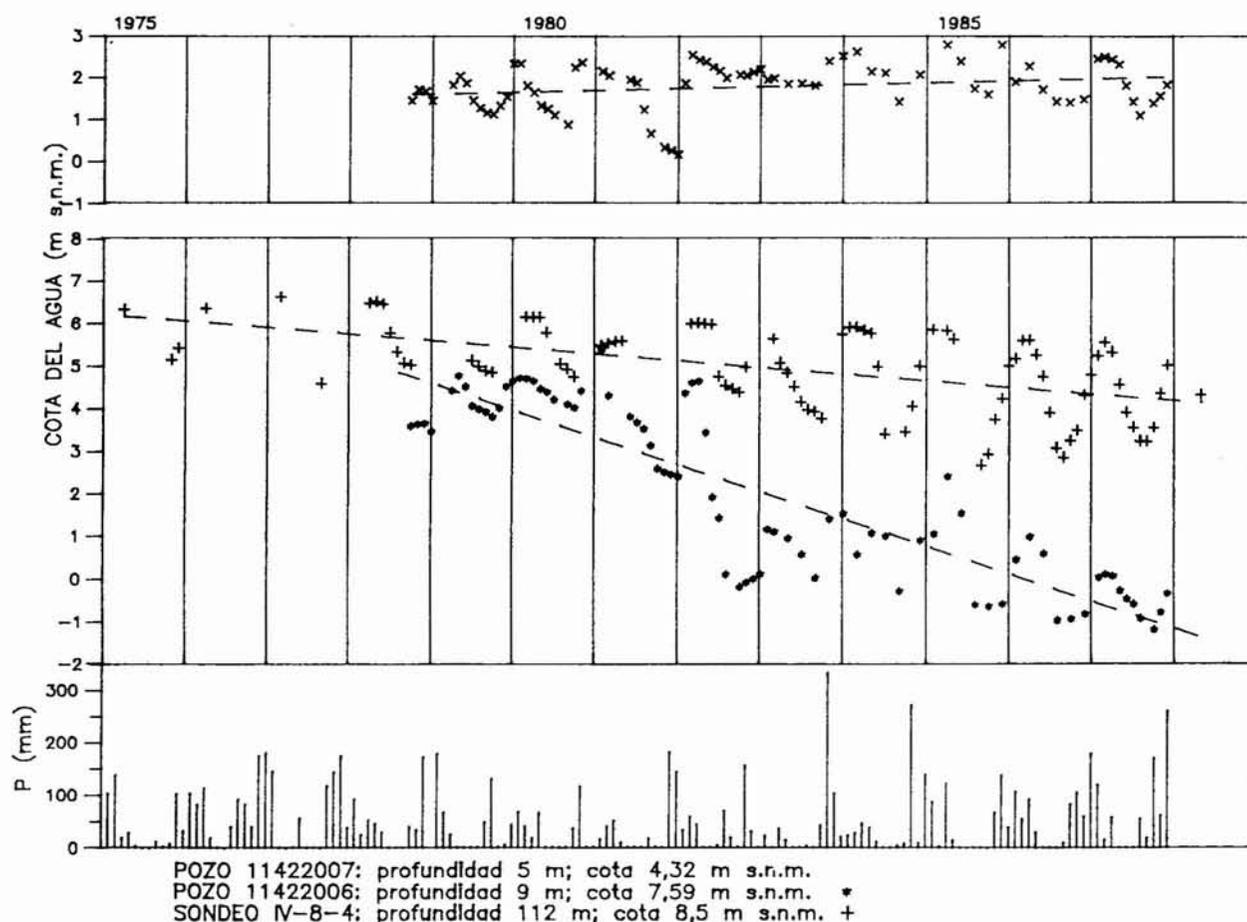


Fig. 9.—Hidrogramas de los puntos 11422007, 11422006 y IV-8-4.

1975 y 1988. La velocidad de variación se ha calculado entre 1978 y 1987, pues los bombeos anteriores a 1978 eran pequeños y de 1988 se tiene únicamente una medición en 36 sondeos, hecha por Suso (1988). No fue posible obtener del IARA los datos de ese año. Parece interesante hacer notar que los ocho sondeos que eran sugerentes en los primeros años han dejado de serlo sin excepción desde 1982 a 1988. Todos estos ocho sondeos están en el ecotono, en el pre-parque o muy próximos a sus límites (ver, fig. 4).

De los 49 hidrogramas analizados (ver tabla 2) solamente en diez parece observarse una relativa estabilización o un aumento de niveles. Los hidrogramas de siete de estos puntos (IV-1-6, IV-2-2, IV-4-2, IV-4-9, IV-9-6, IV-13-7 y V-1-6) cuya situación puede verse en la figura 4, no se han reproducido en este trabajo por tener pocas medidas. Todos ellos están relativamente alejados de las zonas de regadío (ver, figs. 4 y 10); también hay que tener en cuenta que dos de ellos están próximos a una línea de recarga:

el IV-1-6 junto al arroyo de La Rocina y el IV-13-7 junto a un canal de drenaje.

Los tres puntos que no acusan tendencia al descenso y cuyos hidrogramas se reproducen en este trabajo son el pozo 10423003 y el sondeo V-1-9, ambos en la figura 7, y el pozo 11422007 en la figura 9.

Como se ha dicho, estos son los únicos tres puntos con datos suficientes, que parecen no seguir la regla general de la tendencia al descenso; en los tres casos existe una explicación de esa anomalía. El pozo excavado 10423003 (7 m de profundidad) está situado junto a El Abalarío, a 68 m de altura, se trata, pues, de una zona de recarga muy alejada de los centros de bombeo en la cual es lógico que la secuencia climática seca se notase de modo más acusado, pero finalizada ésta, se recuperan los niveles. La reducida oscilación del sondeo profundo V-1-9 (70 m de profundidad) probablemente se debe a su relativa lejanía a los centros de bombeo (ver figs. 4 y 10). Especial interés tiene el caso del pozo 11422007 (5 m de

profundidad) y su comparación con el relativamente próximo pozo 11422006 (9 m de profundidad) (ver fig. 9). En el primero no se observa tendencia al descenso y en el segundo sí. Una explicación de esta diferencia puede consistir en que el primero está muy próximo al arroyo de la Cañada Mayor que cada año, en la época de mayor caudal, recarga el acuífero y, además, está relativamente alejado de los principales bombeos; en cambio el pozo 11422006 no tiene un curso de agua próximo y está cercano al centro de bombeo del Sector I del PTAAM situado al E del Sector II (ver figs. 4 y 10).

En resumen, de lo anteriormente expuesto parece deducirse que los bombeos para el PTAAM han inducido un descenso progresivo del nivel del agua en los pozos y sondeos. La velocidad de este descenso en los últimos 10 años es del orden de 1 m/año en las proximidades de los centros de bombeo y de unos 0,1 a 0,2 m/año en buena parte de los sondeos y pozos próximos al ecotono o incluso dentro de él. Por falta de tiempo y de accesibilidad a los datos de niveles, no se ha podido realizar un análisis del posible retraso en la tendencia al descenso de los niveles piezométricos ocasionado por las lluvias extraordinariamente elevadas que tuvieron lugar entre noviembre de 1989 y enero de 1990; parece lógico suponer que el efecto de estas lluvias sea similar al de las elevadas precipitaciones de finales de 1987. En la figura 7, puede observarse cómo un pozo (10423003) y un sondeo (V-I-9), alejados de los centros de bombeo, experimentaron un brusco ascenso de nivel tras las lluvias del otoño de 1983, recuperando el descenso debido a la secuencia seca anterior. En el resto de los puntos de observación, sólo se observa un ligero aumento de nivel pero en seguida continúa la tendencia al descenso.

Mapas y perfiles piezométricos

Con los datos de la tabla 2 se ha obtenido el mapa de isodescensos medios entre los años 1975 y 1987 que se presenta en la figura 10. Se aprecian en él áreas relativamente extensas en las que las disminuciones del nivel piezométrico son superiores a 5 m o, incluso, 10 m al N del El Rocío, en donde se alcanzan los mayores ritmos de descenso, en algunos casos con valores superiores a 1 m/año. Parece evidente que el embudo provocado por los bombeos alcanza el ecotono; este hecho se aprecia más claramente al S de El Rocío. Otra zona de gran interés es el tramo inferior del arroyo de La Rocina, donde las bajadas del nivel medio están próximas a los 2 m. Para valorar el significado de estos datos conviene tener en cuenta que el mapa corresponde a niveles medios anuales y que a los descensos representados se unen los estacionales del verano, que en esa zona pueden ser del orden de 5 m (ver fig. 8). En resumen, parece que durante el período estival el nivel del agua en los pozos queda claramente varios metros por debajo del lecho del arroyo de La Rocina, que en ese período suele estar seco.

Parece, pues, claro que los niveles de los sondeos y pozos han descendido de forma generalizada no sólo en las zonas inmediatas a los centros de bombeo sino también, al menos, en una veintena de pozos y sondeos situados dentro del Parque o Preparque o a menos de 500 m de esos límites. Los descensos medios en cada uno de estos puntos entre 1975 y 1987 son del orden de uno a tres metros (con la única excepción, previamente explicada, del pozo 11422007).

Estos descensos *realmente medidos* parecen coherentes con los ya calculados en el modelo de flujo del

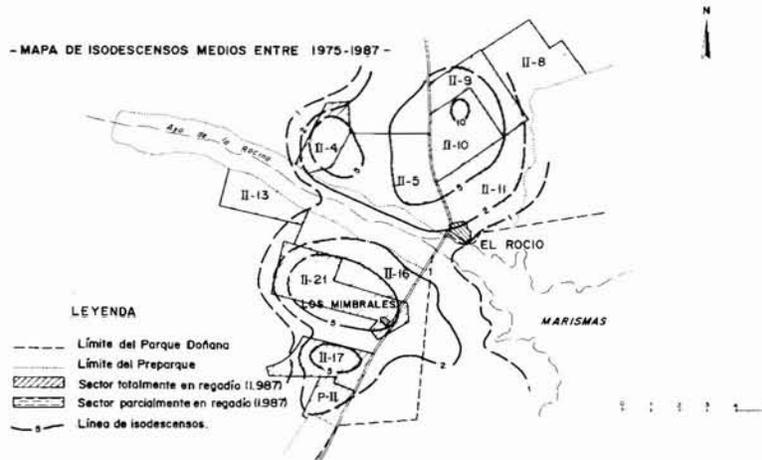


Fig. 10.—Mapa de isodescensos medios entre 1975-1987.

IGME (1982). Sin embargo, como ya se ha dicho, ni en dicho modelo ni en el del IGME (1986) se indicaba que dichos descensos podrían tener un impacto ecológico en el PND (cf. Rodríguez y Llamas, 1986 a y b; Llamas *et. al.*, 1987). En el último informe del IGME (1987), entregado a finales de 1987, por primera vez se hace referencia a esos efectos y se hace una previsión de la situación de los niveles piezométricos en los años 2005 y 2010 suponiendo que estuviese en regadío sólo la superficie existente en 1987, es decir unas 7.000 ha. En el modelo se supone una precipitación media normal hasta el año 2005 y una secuencia relativamente seca (409 mm/año) en el quinquenio 2006 a 2010. En las figuras 5, 6 y 11 se han representado los niveles previstos en el modelo del IGME (1987), así como el nivel piezométrico medio real en 1975 y en 1988.

El descenso de la superficie freática

Parece existir un consenso generalizado entre los biólogos que han estudiado el PND en admitir que la vegetación de los «cotos» y del ecotono está directamente relacionada con la profundidad de la superficie freática o libre y que un descenso de esta superficie tendría un serio impacto en esa vegetación y por tanto en todo el PND (cf. Allier *et. al.*, 1974; Allier et Bresset, 1978; Merino *et. al.*, 1980 a y b; Merino y Merino, 1988). Diversos estudios en otros países, p.e., en Holanda, parecen confirmar la importancia que tienen en los ecosistemas de los humedales los

cambios en el régimen del agua subterránea (cf. Smidt *et. al.*, 1986; Wassen *et. al.*, 1988; Hollis *et. al.*, 1989).

Se ha visto también cómo los hidrogramas de los sondeos situados en el ecotono, o cerca de él, acusaban un progresivo descenso a lo largo de los 10 últimos años con un ritmo entre 0,1 y 0,3 m/año. Los resultados de los modelos del IGME (1982, 1986 y 1987) también indican que ese descenso va a continuar.

Ahora bien, como ya se dijo, desde 1985 ó 1986, de palabra o en informes sin autor conocido (cf. SCOPE, 1987) se ha sostenido que el descenso medido en los sondeos profundos no representa realmente el descenso de la capa freática o zona saturada. La razón aducida es la existencia de una supuesta capa impermeable a veces denominada «fragipan»—que divide el acuífero en dos unidades.

Como previamente se dijo, Llamas y Rodríguez Arévalo (1987) en un informe personal dirigido al Presidente del Patronato hicieron ver lo problemático y poco probable de dicha afirmación; y por tanto se recomendaba no tomarla en cuenta en tanto no se presentaran los oportunos estudios. No parece que hasta la fecha se hayan presentado dichos estudios sobre la existencia y papel del «fragipan»; al menos no se entregaron a la misión de la WWF (cf. Hollis *et. al.*, 1989).

En resumen, los datos disponibles parecen indicar que los descensos en los sondeos profundos se transmitirán con relativa rapidez (meses o pocos años) al límite superior de la zona saturada. Esto no obsta

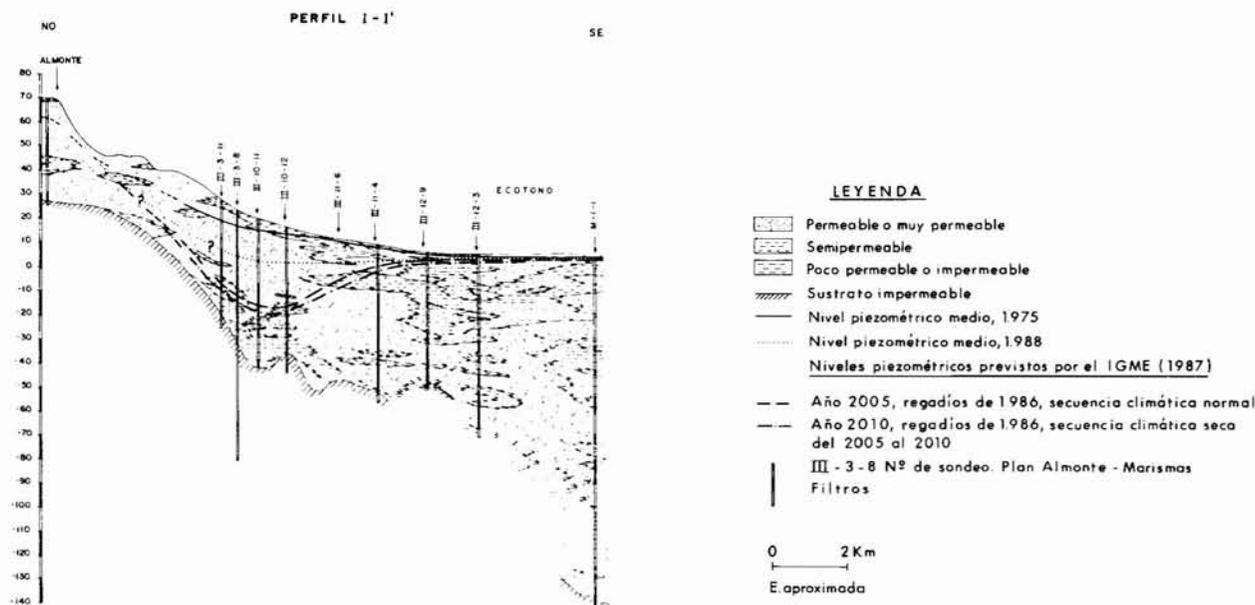


Fig. 11.—Perfil hidrogeológico I-I' (según Suso, 1988).

para que en algunas zonas muy *localizadas* la existencia de alguna capa menos permeable (ver figs. 5, 6 y 11) pueda inducir un retraso algo mayor entre el descenso medido en un sondeo profundo (del orden de 100 m) y el descenso que se observa en un piezómetro somero (menos de 5 m).

Se ha mostrado cómo los datos disponibles de medidas de descenso en un número considerable de puntos indican con claridad que los bombeos del PTAAM están produciendo desde 1978 unos descensos del orden de 0,1 a 0,3 m/año, dentro del ecotono y del valle de La Rocina. Por analogía con el problema estudiado por Samper *et. al.*, (1989), parece poco probable que no exista una correspondencia relativamente rápida entre los descensos observados en los pozos profundos y los descensos que se van a producir en la superficie freática. Se ha mencionado finalmente cómo los expertos en ecología parecen estar de acuerdo en que ese descenso en el nivel freático va a producir un notable impacto ecológico en el ecotono. Parece lógico considerar ahora cuál va a ser la evolución de esos descensos del nivel freático en un futuro próximo, es decir si va a continuar aumentando y a qué ritmo. Para ello se van a comentar las predicciones de descensos futuros que hace el informe del IGME (1987) y que, en gran parte, parece suscribir el informe de Hollis *et al.* (1989). Esas predicciones sintéticamente se expresan en unos mapas de isodescensos del nivel del acuífero entre los años 1986 y 2005 ó 2010 (IGME, 1987). En la secuencia climática supuesta, el quinquenio 2006-2010 es seco con una lluvia media de 409 mm/año. Los bombeos supuestos son sólo los necesarios para regar 7.000 ha (unos 50 hm³/año y no se incluyen los bombeos para abastecimientos urbanos. El modelo de cálculo utilizado parece ser el mismo del IGME (1982) tanto en lo que se refiere al código de cálculo como a las condiciones en los límites y a los parámetros del sistema acuífero.

En nuestra opinión, ya expuesta en trabajos previos (cf. Llamas, 1987 b y 1988 a), existen numerosos aspectos de los modelos del IGME (1982, 1986, 1987) que están poco documentados y algunos aspectos que requieren una profunda revisión pues pueden conducir a unas predicciones erróneas. Estas reservas fueron expuestas a la misión del WWF/IUCN (cf. Llamas, 1988 d) y, en cierta forma, han sido recogidas en el cap. 6 del informe de Hollis *et. al.* (1989). No obstante, en su conjunto, las conclusiones y recomendaciones de dicho informe se basan, en gran parte, en el informe del IGME (1987).

En cualquier caso, las últimas informaciones parecen indicar que el Grupo de Trabajo sobre Aguas del Patronato del PND (GTA), considera que la aceptación poco crítica del informe del IGME (1987) por Hollis *et. al.* (1987) lleva a estos autores a una visión

excesivamente pesimista del futuro de Doñana. Con base en estas premisas el GTA descalifica parte de las conclusiones y recomendaciones del informe.

Nuestro punto de vista sobre la futura evolución de los niveles en Doñana es distinto. Esto ha sido expuesto repetidas veces tanto inmediatamente después de la presentación del informe del IGME (cf. Llamas, 1987) como desde la aparición del informe WWF/IUCN (cf. Llamas, 1989 d).

De modo sintético nuestras principales reservas a los resultados del informe del IGME (1987) son las siguientes:

a) La relativa complejidad del problema aconseja estudiarlo con un código de cálculo más moderno y sofisticado que el utilizado, que corresponde al clásico método del U.S.G.S. de la década de los setenta. La utilización de ese código pudo ser oportuna para el modelo de 1982 pero ahora podría convenir ensayar modelos más sofisticados, entre ellos, alguno basado en el método inverso.

b) Es conveniente revisar igualmente la influencia de haber situado el límite oriental del acuífero en la vertical del río Guadalquivir, aunque esto no supondrá probablemente cambios sustanciales en los resultados.

c) Convendría revisar el valor asignado a la porosidad eficaz; al parecer: 0,03. Si se tiene en cuenta el flujo en la zona no saturada es posible que este valor sea excesivamente bajo. Esto puede conducir a que los descensos calculados sean mayores que los reales, lo cual conduciría a resultados más seguros, pero también puede conducir a haber dado por buena una calibración errónea. Por ejemplo, el valor bajo (0,03) de la porosidad eficaz puede haber quedado compensado, por ejemplo, por un valor alto en la recarga (160 mm/año).

d) Parece importante introducir en las hipótesis de los nuevos modelos los bombeos para Almonte y Rocina y para las urbanizaciones de Matalascañas y Costa Doñana en vez de suprimirlos por considerar gratuitamente que su influencia es pequeña.

e) De acuerdo con lo sugerido por Hollis *et. al.*, (1989), parece muy importante conocer con adecuada precisión los bombeos reales para los regadíos. Parece elemental exigir la instalación de contadores en todas las captaciones. También sería oportuno hacer una serie de mapas cronológicos de las zonas regadas y de los tipos de cultivos mediante análisis de imágenes de satélite.

f) Como ya se ha dicho, una de las razones principales del GTA, presidido por el Presidente de la CHG, para «descalificar» el informe del IGME (1987) es el hecho de que en ese informe se haya supuesto una secuencia seca en los cinco últimos años de la simulación (2006 a 2010) en la que la precipitación anual media sería 409 mm. En los años nor-

males la recarga media se estima en unos 160 mm/año y en la secuencia seca se reduce proporcionalmente a la lluvia, es decir, sería unos 113 mm/año. En opinión del GTA, ésta es una hipótesis irrealmente negativa pues como previamente se dijo la probabilidad de que se produzca dicha secuencia seca es de 1/8000, según el GTA. Sobre esta aseveración hay que insistir en que aun cuando los datos de la secuencia seca de 1871 a 1875 (280 mm/año de media) de la estación de Sevilla-Tablada pudieran quizá tener un error sistemático, hay otras secuencias más modernas —y por tanto sin ese posible error sistemático— con valores similares a los supuestos en el informe del IGME (1987): 1903-1908 (6 años) con 423 mm; 1973-1975 (4 años) con 396 mm; o 1980-1986 (7 años) con 437 mm. Por otra parte, es bien conocido que la infiltración o recarga natural no varía de modo lineal con la precipitación; suele existir un umbral de precipitación por debajo del cual no hay prácticamente recarga. Es probable que este umbral en la zona de Doñana no sea inferior a 280 mm (ver ejemplo de balance hídrico mensual de Suso (1988) mencionado al comienzo del artículo).

g) En cualquier caso, basta ver los perfiles hidrogeológicos de las figuras 5, 6 y 11 para observar que en el año 2005, es decir antes de que comience la hipotética secuencia seca, ya se habrían producido, según el modelo IGME (1987) unos descensos muy importantes. Por otra parte, como ya advirtió Llamas (1989d), tanto el informe IGME (1987) como el de Hollis *et. al.* (1989), inducen fácilmente a la confusión, pues parecen dar a entender —y de hecho así lo han entendido casi todos los medios de comunicación— que hasta el año 2005 a 2010 no se va a producir un deterioro ecológico de Doñana. Esto, obviamente, no es así, ya que los descensos son progresivos. El informe IGME (1987) no indica si los descensos alcanzados en el año 2005 corresponden a un nuevo régimen estacionario. En cambio en el informe IGME (1982), que estudió la evolución de los niveles durante 40 años se analizó esta posibilidad y se comprobó que los niveles entonces indicados correspondían a un régimen permanente. El hecho de que en el informe de 1987 no se haya analizado este aspecto no tiene fácil explicación.

h) Finalmente, se insiste de nuevo en que uno de los *probables* fallos importantes de todos los modelos del IGME (1982, 1986 y 1987) es el tratamiento de la relación acuífero-río en los nodos o celdas del arroyo de La Rocina y de los otros tres arroyos principales. Se dice probable pues de la lectura de esos informes no es fácil deducir, como también reconocen Hollis *et. al.* (1989), cuál es el tratamiento matemático utilizado en esos modelos. La observación del perfil hidrogeológico de la figura 5 nos induce a pensar que se ha supuesto una elevada conexión entre el

acuífero y el río y que se ha supuesto que los ríos llevan siempre agua. Ambas hipótesis, si no responden a la realidad física, lo cual es bastante probable, conducen a que los descensos predichos por los modelos IGME resulten inferiores a los que se producirán realmente. Urge realizar un análisis detallado, experimental y teórico de este problema.

La afección a los caudales del arroyo de La Rocina y otros arroyos

Como previamente se dijo, aparte de la lluvia, el arroyo de La Rocina, junto con los otros arroyos menores (Cañada Mayor, del Partido, etc.) constituían la única aportación de agua dulce a las marismas del PND desde que se desvió el río Guadiamar. El resultado del plan de regeneración hídrica superficial, que consiste en introducir de nuevo por bombeo las aguas del río Guadiamar, es todavía incierto.

Es lástima que no se disponga de aforos sistemáticos de ninguno de los mencionados arroyos. Únicamente se tiene un conjunto de aforos mensuales realizados por la FAO entre 1969 y 1972. Con base en esos datos se ha estimado (cf. MOPU, 1979) que las aportaciones conjuntas de los arroyos que forman la Madre de las Marismas oscilan entre 30 y 400 hm³/año, con un valor medio de unos 150 hm³/año. A falta de mejores datos, se van a aceptar esas cifras como una primera aproximación.

Dado el relieve y la litología de la zona, parece lógico suponer que el arroyo de La Rocina y los demás arroyos eran en condiciones naturales cursos de agua «ganadores», es decir que recibían un caudal subterráneo. El hecho de que ocho sondeos próximos al arroyo de La Rocina y al Rocío fueran surgentes antes del comienzo de los bombeos parece confirmar esta hipótesis. Véanse los datos de los sondeos IV-6-4 (fig. 8) y IV-7-1 y 5 bis, V-8-4,5,6 y 7 (Tabla 2).

Casi todos los modelos numéricos de flujo efectuados trabajan con esta hipótesis de río ganador al estudiar el régimen no perturbado. Yagüe y Llamas (1984) indican que el caudal de agua subterránea aportado a éstos, los arroyos, oscila entre 7 y 80 hm³/año, según los diversos autores. Estas divergencias probablemente corresponden a las diversas hipótesis de partida y en especial al espesor y la permeabilidad asignados a la capa de arcilla y/o turba que constituye el lecho de los arroyos.

A pesar de estas incertidumbres, los datos disponibles —especialmente los hidrogramas de los puntos arriba mencionados— permiten ya llegar a conclusiones de notable interés sobre el impacto negativo del PTAAM en los arroyos que alimentan el PND. En primer lugar, el hecho de que estos arroyos estén normalmente secos durante el período estival exige aclarar cómo han sido simulados en los modelos del

IGME (1982, 1986 y 1987). Aparentemente se ha supuesto que estos arroyos llevan agua durante todo el año, lo cual no se correspondería con la realidad. Desde el punto de vista práctico, este posible error conduciría a que los niveles predichos por todos los modelos del IGME sean superiores a los que se producirán en la realidad.

En segundo término, parece conveniente cuantificar cuál va a ser la reducción de caudales de la Madre de las Marismas como consecuencia del cambio de gradiente en el acuífero. Los hidrogramas de los puntos antes mencionados indican, prácticamente sin excepción, que los niveles piezométricos están ya actualmente por debajo del lecho del arroyo de La Rocina. O lo que es lo mismo, La Rocina —y probablemente todos los demás arroyos— han pasado en su tramo inferior, de «ganar» agua subterránea a «perder» agua superficial. La estimación adecuada de esta pérdida exige estudios detallados de los que no se dispone todavía. Las grandes oscilaciones que se observan en algunos sondeos próximos a La Rocina podrían indicar que la infiltración a través del lecho turboso es pequeña (situación en verano) pero puede ser mayor a través de los márgenes (en las crecidas del otoño). En cualquier caso, no se debe excluir a priori la posibilidad de que en los años secos (aportaciones naturales del orden de 30 hm³/año) la aportación de agua superficial a las marismas sea muy reducida pues se infiltrará en el acuífero. Los hidrogramas de la figura 7, con su tendencia generalizada al descenso, quizá indican que la capacidad de infiltración de los lechos de los arroyos durante los años húmedos (con aportaciones del orden de 400 hm³/año) no es capaz de reponer los descensos ocasionados por los bombeos. Como antes se dijo, esas aportaciones extraordinarias son desaguardas, en su mayor parte, rápidamente al río Guadalquivir, pues la capacidad de embalse de las marismas apenas alcanza los 30 hm³.

En resumen, en los años secos los bombeos del PTAAM pueden producir una reducción drástica en las ya menores aportaciones de agua dulce del arroyo Madre de las Marismas. Sin embargo, es posible que la recarga producida a través de los lechos de los arroyos en los años húmedos no sea suficiente para reponer en buena parte el agua bombeada por el PTAAM. En otras palabras, la capacidad de regulación del sistema natural parece bastante reducida, a juzgar por los escasos datos disponibles. Sin duda, convendría obtener mejores datos para despejar estas incertidumbres.

Consideraciones sobre la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas

Hoy es ampliamente aceptado que las actividades agrícolas constituyen uno de las principales causas de

la contaminación de los acuíferos, especialmente si se trata de una agricultura intensiva, como es la del PTAAM. Sin embargo, parece existir una tendencia a minimizar los problemas de contaminación en el entorno de Doñana por parte de algunos organismos. Así en IGME (1983, pág. 100) se dice: «Se analiza a continuación la incidencia de estas actividades (contaminantes) en el acuífero de Almonte-Marismas bien entendido que, por el momento, el acuífero tanto fuera como dentro del Parque Nacional, *no sufre problemas graves de contaminación que puedan afectar seriamente ni a los usos del agua subterránea ni a la ecología de la zona*». No ha sido posible obtener directamente del IARA datos sobre la evolución en el tiempo de la calidad del agua subterránea en los alrededores de El Rocío desde que se iniciaron los regadíos en la zona.

No obstante, con objeto de obtener una idea, aunque fuese remota y puntual de la situación actual, Suso (1988) analizó el contenido en NO₃⁻ en muestras de agua procedentes de 5 sondeos, cuyos resultados se dan en la tabla 3. Dos muestras (IV-5-1 y IV-10-6) proceden de sondeos situados al S del arroyo de La Rocina en zonas relativamente alejadas de las más íntensamente explotadas; estas muestras presentan contenidos inferiores a 10 mg/l de NO₃⁻. Las otras tres proceden del área situada al NE de El Rocío en la que los regadíos comenzaron con intensidad hace ya unos diez años; estas muestras presentan contenidos en NO₃⁻ varias veces superiores a los de las otras dos muestras, aunque todavía no alcanzan el límite de potabilidad (50 mg/l). Es significativo, por otra parte, que los sondeos con contenido más elevado de NO₃⁻ son aquéllos cuyos filtros se sitúan más próximos a la superficie del terreno; hay que tener en cuenta que este tipo de contaminación suele ser siempre de origen superficial.

Tabla 3 Contenido en NO₃⁻ de cinco sondeos del PTAAM

Sondeo	Posición de los Filtros (m)	NO ₃ ⁻ (mg/l)
IV-5-1	22-24/26-28/39-61/73-77/94-102	8,7
IV-10-6	52-88	5,7
III-9-10	19-33	21
III-10-7	8-42	25
III-10-14	26-44/52-54	14

Recientemente hemos tenido ocasión de consultar el informe IARA (sin fecha) que fue enviado a la misión WWF/IUCN (cf. Hollis *et al.*, 1989). Según dicho informe, cuyos planos son casi ilegibles, son pocos los puntos que en la zona superan los 20 mg/l en NO₃⁻. Parece significativo que Hollis *et al.* (1989) recomienden que, en lo sucesivo, el control de la ca-

lidad del agua sea realizado por agencias independientes, es decir no por el propio IARA.

El hecho de que los valores de los nitratos, hasta ahora, sean relativamente reducidos no quiere decir que en un futuro próximo no se observe una elevada contaminación. En este sentido la situación en Palos de la Frontera y Moguer —en el borde occidental del mismo acuífero libre de Almonte-Marismas— parece un claro precedente de cuál puede ser la evolución de la contaminación de las aguas subterráneas en las proximidades y dentro del PND. En dichas localidades, el tipo de cultivos regados con aguas subterráneas es similar al del sector II de la zona de El Rocío. IGME (1988) informa de que el contenido en NO_3^- en algunos pozos de Palos y de Moguer ha pasado en menos de veinte años de valores inferiores a 20-30 mg/l a superiores a 200-300 mg/l. Parece lógico admitir que algo similar puede ocurrir en los regadíos del PTAAM.

Además, hay que tener en cuenta que la contaminación de origen agrícola va a llegar a las marismas, bien sea con las aguas subterráneas si vuelven a alimentar los arroyos, bien con la escorrentía superficial que se origina cuando las lluvias son importantes.

Los datos de análisis de pesticidas hasta el año 1984, facilitados por la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (cf. Hollis *et. al.*, 1989) indican que con frecuencia se superan ampliamente los valores máximos tolerados para aguas potables. En dichos análisis sorprende la irregularidad y discontinuidad de los valores detectados y la falta de datos de bifenilos policlorados (PCBs), y de derivados del DDT (un insecticida utilizado en la zona), contaminantes de mayor relevancia medioambiental (comunicación personal de Hernández Saint-Aubin (1988), Jefe de la Unidad Estructural de Investigación de Contaminación Ambiental del CSIC). Este conjunto de datos, a pesar de ser tan incompletos o dudosos, parece indicar con claridad que la contaminación de las aguas superficiales y subterráneas será en plazo no lejano un grave problema no sólo para la conservación del PND, sino también para el abastecimiento urbano de Almonte-Bollullos-Rociana, que, al parecer, tiene sus captaciones en la zonas III-8 y III-9 (fig. 4).

Comentario sobre el informe de la misión WWF/IUCN

La petición de un dictamen realizado por una comisión internacional había sido solicitada desde 1985 por uno de los autores de este trabajo (cf. Llamas 1987b) pero sólo fue aprobada por el Patronato el 9 de enero de 1988, a propuesta de la entidad que representa al WWF en España.

El informe de Hollis *et. al.* (1989) constituye un do-

cumento de notable interés dentro del proceso de Doñana, tanto por su origen y elaboración como por las reacciones oficiales u oficiosas a que ha dado origen. Por ello, se presenta separado este comentario, aun cuando parte de su contenido ya se ha expuesto previamente.

La misión del WWF/IUCN estaba formada por T. Hollis, geógrafo inglés, J. Mercer, hidrogeólogo americano y P. Heurteaux, biólogo francés; es decir solamente uno de los tres científicos es un reconocido experto en la ciencia de las aguas subterráneas. Durante una semana, en noviembre de 1988, la misión visitó Doñana y mantuvo entrevistas con distintas personas en Sevilla y Madrid. Un avance del informe fue enviado por sus autores en enero de 1989. La versión definitiva, que tiene fecha de mayo de 1989, fue distribuida por los autores en junio del mismo año, pero no fue presentada oficialmente por ADENA hasta octubre de 1989. La primera reacción oficial del Patronato no parece tener lugar hasta su reunión del 17 de diciembre de 1989 (cf. «El País», 19-XII-89) si bien antes tiene lugar un dictamen del denominado Grupo de Trabajo de Aguas del Patronato sobre el informe de Hollis *et. al.* (1989). Más adelante se harán los oportunos comentarios sobre ese dictamen y otros documentos del Grupo de Trabajo de Aguas (GTA) pero previamente parece oportuno mencionar que, con fecha 7 de julio de 1989, Llamas envió al Director de la WWF, de la IUCN y de ADENA un extenso escrito en el que se hacían notar algunos posibles errores u omisiones de ese informe. El documento entregado oficialmente por ADENA en octubre de 1989 fue el mismo que el distribuido en junio.

Los comentarios de Llamas del 7-7-89 expresaban su conformidad general con la mayor parte de las conclusiones y recomendaciones del informe. Esto era lógico ya que básicamente, aunque de modo poco explícito, coincidían con las ideas del escrito que él mismo había entregado a la misión en Sevilla durante su visita (Llamas, 1988 d). Sus observaciones se referían esencialmente a los aspectos siguientes:

a) Los datos de que había dispuesto la misión sobre la variación de niveles del agua subterránea dentro del PND o en su inmediata proximidad no eran tan escasos como decían Hollis *et. al.* (1989) y eran suficientes para tener *ya una razonable evidencia* del inminente peligro de «daimielización» de Doñana. En concreto, entre los hidrogramas con niveles de pozos y sondeos que se incluyen en IGME (1986) y en Suso (1988) hay más de veinte situados en el ecotono o en sus proximidades; y como se ha visto en prácticamente todos hay una tendencia al descenso con un ritmo que oscila entre 0,1 y 0,3 m/año. Esta tendencia no se ha visto apenas alterada por las fuertes lluvias de finales de 1983 y 1987. No disponemos

todavía de datos suficientes para conocer el efecto de las fortísimas precipitaciones de finales de 1989 y principios de 1990 (unos 600 mm en menos de tres meses). Por supuesto, Llamas suscribía la conveniencia de obtener datos complementarios en lo que se refiere a nuevos puntos de medida de niveles piezométricos y especialmente a los aforos superficiales y a los análisis químicos de aguas superficiales y subterráneas.

b) Hollis *et al.* (1989) daban un crédito excesivo y poco crítico a los resultados del informe del IGME (1987), sin tener apenas en cuenta que era una simple nueva versión del informe IGME (1982). Es de destacar que los resultados del informe IGME (1982) indicaban que en un bombeo inferior al previsto en IGME (1987), al cabo de 40 años ya se producen importantes descensos para la misma zona. Aunque Hollis *et al.* (1989) reconocen con Llamas (1988 d) que el informe está poco documentado y que el planteamiento de la función acuífero-río es dudoso, sin embargo, buena parte de sus conclusiones y recomendaciones se apoyan en el informe IGME (1987). Esta apoyatura ha dado al GTA y al Patronato el argumento básico para descalificar o no aceptar algunas de las conclusiones y recomendaciones de Hollis *et al.* (1989).

c) Otra limitación significativa del informe de Hollis *et al.* (1989) es la defectuosa interpretación de las relaciones entre los organismos y personas relacionadas con Doñana. No parece conocer, por ejemplo, el claro protagonismo y responsabilidad que la legislación española atribuye a las Confederaciones Hidrográficas en todo lo referente a las aguas superficiales y subterráneas en general, y de modo muy específico a la protección de los humedales a los que el Reglamento del Dominio Público Hidráulico de 1986 dedica los artículos núm. 275 a 283 (cf. Llamas, 1989 c). El informe también parece ignorar que todos los trabajos realizados por Llamas y sus colaboradores han sido financiados por la CICYT o el Comité Conjunto Hispano-Norteamericano y han quedado encuadrados en otros proyectos de investigación más amplios del CSIC (ver apartado de agradecimientos). Termina Hollis haciendo un panegírico a la oportunidad de que se integren los estudios de Doñana en un marco más amplio de gestión a nivel de la Cuenca del Guadalquivir. No parece conocer, sin embargo, la dificultad objetiva que plantea la contaminación de todos los ríos próximos (Guadiamar, Guadalquivir, Tinto y Odiel) y los problemas legales y políticos para transvasar agua del embalse del Chanza (cuenca del Guadiana).

d) Se hacía ver en las mencionadas observaciones de Llamas (1989 c) lo inadecuado de la redacción de la conclusión núm. 28 en la que se decía que «There is a general agreement that no major chan-

ges have yet occurred in the National Park as a result of pumping from the aquifer». Como se temía, esa redacción ha sido ampliamente utilizada fuera de su contexto por el Patronato, para justificar la actuación pasada y no corregir decididamente la situación actual. Por supuesto, el Patronato parece ignorar frases como la de la pág. 25, líneas 10 y 11: «there is sufficient evidence in the literature to justify serious concern».

Comentario sobre algunos documentos del grupo de trabajo de aguas del patronato del PND

No es de extrañar que el Grupo de Trabajo sobre Aguas (GTA) del Patronato del PND no haya admitido fácilmente las conclusiones y recomendaciones principales de Hollis *et al.* (1989). Basta quizá recordar que el Presidente del GTA, en su calidad de Presidente de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, en la pág. 3 de un escrito oficial de fecha 16 de enero de 1987 decía a la Asociación ADENA lo siguiente:

«Durante los días 12 y 13 del pasado mes de febrero, se celebró una Reunión de científicos organizada por el Comité Español del SCOPE (Scientific Committee on Problems of the Environment) en colaboración con la A.M.A. de la Junta de Andalucía.»

«En dicha reunión los Sres. Rodríguez Arévalo y Llamas insistieron en el tema de que los descensos del nivel piezométrico en la zona de La Vera-La Retuerta podrían alterar su ecosistema, suscitándose un amplio debate en el que quedó de manifiesto que no existen hasta el momento actual elementos de juicio que permitan cuantificar tales alteraciones, en caso de que se produzcan, con lo que en modo alguno quedó científicamente refrendada la visión catastrofista con que se presentan las consecuencias de la explotación agrícola en el escrito de ADENA.»

«Asimismo quedó desvirtuada la afirmación hecha por D. Ramón Llamas a los medios de información, de que la turba existente en la marisma pudiera entrar en combustión espontánea al descender el nivel freático, en modo análogo a lo ocurrido en las Tablas de Daimiel, toda vez que, según se confirmó por expertos geólogos asistentes, en la marisma (al contrario que en las Tablas) no existe turba en cantidades apreciables que puedan entrar en combustión espontánea.»

«Quedó asimismo de manifiesto la gran cantidad de datos y estudios existentes sobre el acuífero Almonte-Marismas, posiblemente el mejor estudiado de España, en contraste con la escasez de datos y débiles argumentos en que se basan los temores manifestados respecto a las influencias de las explotaciones agrícolas, sobre el Parque.»

La inexactitud de estas aseveraciones del Presidente de la CHG no sólo ha quedado de manifiesto en múltiples trabajos posteriores sino en las mismas actas del SCOPE (1987).

Para finalizar este comentario, es oportuno hacer notar que el Grupo de Trabajo sobre Aguas del Patronato del PND parece ser el autor de un documento fechado en noviembre de 1989 en el que se realiza una evaluación del informe de la WWF/IUCN. Las conclusiones de ese documento parecen haber sido asumidas por la Comisión Permanente del Patronato.

Entre ellas sólo vamos a destacar ahora dos. La primera (pág. 5 del documento mencionado) es la que considera altamente improbable la secuencia climática seca (2005/2010) supuesta en el informe IGME (1987) por tener un período de recurrencia cada 8.000 años. Como previamente se comentó, que desde el siglo pasado hasta ahora ya se han dado varias secuencias secas similares a la supuesta; además, la recarga de agua subterránea supuesta en esa secuencia seca parece muy alta. La segunda, y quizá más importante, es la no aceptación por el Grupo de Trabajo de Aguas de la Conclusión General n.º 3 y de la Recomendación n.º 3 del informe WWF/IUCN. En ellas se sugería crear un grupo asesor de amplio espectro profesional que consensúe la toma de decisiones y reduzca desconfianzas y hostilidades (ver pág. 3 y 5 del documento de noviembre 1989 mencionado). Es de esperar que las reacciones de muy diversos grupos nacionales e internacionales (ver, p.e., «El Independiente» 13-I-90 y «ABC» Sevilla, 2-III-90) hagan cambiar la actitud de los responsables del PND.

Finalmente, de nuevo, nos permitimos sugerir en primer lugar, que se detenga inmediatamente toda nueva acción que afecte al sistema hídrico del Parque Nacional de Doñana; en segundo término, que se forme urgentemente un comité de carácter internacional y con totales garantías de independencia y competencia científica que haga los oportunos análisis detallados de la situación y proponga las consecuentes actuaciones para corregir los daños ya causados. Es probable que el coste de esas actuaciones tenga que ser superior a la inversión de dinero del contribuyente ya hecha en el PTAAM (unos 20.000 millones de pts., cf. Llamas *et. al.* 1987). En otras palabras, para salvar uno de los mejores monumentos naturales de Europa, habría que hacer en los próximos años una inversión no inferior a 30.000 millones de pesetas (Llamas, 1989 e).

Conclusiones

Sin duda, conviene mejorar el sistema de medidas hidrológicas superficiales y subterráneas dentro y

fuera del Parque Nacional de Doñana. Sin embargo, los datos ya existentes indican con evidencia que los bombeos para el regadío están produciendo un considerable y progresivo descenso de los niveles de agua del orden de 0,1 a 0,3 m/año en algunos pozos de observación situados dentro del propio Parque Nacional. Este descenso llega a ser del orden de 1 m/año en los pozos más próximos a los centros de bombeo situados a no mucha distancia de los límites del Parque. La recuperación de niveles freáticos producida por las fuertes precipitaciones de finales de 1989 y comienzos de 1990 no debe inducir a minusvalorar el problema.

El hecho de que estos descensos de nivel freático, que han alcanzado ya 1 ó 2 m en muchos puntos dentro del Parque Nacional, no se hayan traducido en cambios en la vegetación obvios para ojos profanos no debe inspirar confianza. Es probablemente un simple efecto de inercia del cambio de humedad en la zona no saturada del propio acuífero y de la vegetación.

El impacto negativo de los bombeos para el plan de regadíos de Almonte-Marismas no se reducirá sólo a la desecación del ecotono de La Vera y a las probables modificaciones en la vegetación de los «cotos». La influencia negativa alcanzará a todo el amplio sistema de las marismas ya que modificará sensiblemente la cuantía y la calidad de las aportaciones de agua superficial que llegan a las marismas a través del conjunto de arroyos que forman la «Madre de las Marismas». Estos cambios serán especialmente sensibles durante las secuencias climáticas secas.

De todo lo anteriormente expuesto puede concluirse que la elaboración de los datos que ya existen, confirma las advertencias ya realizadas desde hace cinco años en el sentido de que el plan de regadíos de Almonte-Marismas, tal como ha sido realizado por el IRYDA primero y el IARA después, es incompatible con la supervivencia de los ecosistemas del Parque Nacional de Doñana.

AGRADECIMIENTOS

Por lo que ha tenido de fuente de inspiración para este estudio, bien puede servir de introducción a estos agradecimientos lo que hace pocos años decía una persona mundialmente reconocida como un gran líder moral: «La investigación fundamental debe ser libre frente a los poderes públicos y económicos, que deben cooperar a su desarrollo sin dificultarla. La ciencia aplicada ha prestado y presta al hombre numerosos servicios por poco que esté inspirado por el amor, regulada por la sabiduría y acompañada por el coraje para defenderla contra injerencias indebidas de todos los poderes tiránicos» (Juan Pablo II, 1986).

Estas investigaciones han sido posibles en gran parte, gracias al proyecto de Investigación Conjunto entre el US Geological Survey y la Universidad Complutense (Proyecto CCA 8309/007 financiado por el Comité Conjunto Hispano-Norteamericano de Ciencia y Tecnología). Y también gracias a un proyecto del CSIC n.º

608/983, financiado en parte por la CICYT, cuyo investigador principal fue el Dr. Joan Albaigés del Instituto de Química Orgánica de Barcelona.

Los autores desean expresar su agradecimiento a Mercedes Campos que con tanta paciencia como eficiencia procesó las numerosas versiones de este artículo.

Referencias

- Almarza, C. (1984). Fichas hídricas normalizadas y otros parámetros hidrometeorológicos, Inst. Nac. de Meteorología, Madrid, 3 vol., aprox. 1.000 págs.
- Allier, C.; González Bernáldez, F. y Ramírez, C. (1974). *Mapa ecológico*. Reserva Biológica de Doñana, CSIC, Sevilla, 14 pp + cart.
- Allier, C. y Bresset, V. (1978). *Etude phytosociologique de la marisma et de sabordure (Reserve biologique de Doñana. Espagne)*. Monografía n.º 18, ICONA.
- 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, CDX. Madrid, 139 pp.
- Clemente, L.; Siljestrom, P. y García, L. V. (1988). Influencia del nivel freático en la evolución de suelos arenosos. *Proc. Intern. Symposium Hydrology of Wetlands in Semiarid and Arid Regions*. Agencia del Medio Ambiente, Sevilla, 49-53.
- Cota Galán, H. (1977). Descripción de las características climatológicas del área de Doñana. Centro internacional de Formación a las Ciencias Ambientales. Univ. de Sevilla. Dep. Ecología, 5 pp.
- FAO (1970). *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalquivir*. Informe técnico I-AGL: SF/SPA 9. Roma, 115 pp.
- FAO (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 I-AGL: SF/SPA 16. Madrid, 2 vols., 263 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. Roma, 157 pp.
- Grupo de Trabajo de Aguas del Patronato del Parque Nacional de Doñana (GTA) (1987 a 1989). Se mencionan diversas actas o documentos de este grupo.
- Hollis, T., Mercer, J. y Heurteaux, P. (1989). *The implications of groundwater extraction for the longterm future of the Doñana National Park*. Report of the WWF/IUCN/ADENA mission to the Doñana National Park, 18-20 November 1988, 60 p.
- Hernández Saint-Aubin, L. (1988). Comunicación personal sobre los datos de análisis químicos de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir, 4 pp.
- Heurteaux, P. (1970). *Conséquences prévisibles de l'utilisation á des fins agricoles et touristiques des nappes aquifères d'Almonte et des Marismas sur l'équilibre écologique du Parc National de Doñana*. Centre de Ecologie de Camargue, 25 pp.
- IARA (1986). Evolución de la superficie de riego en la zona de Almonte-Marismas y entorno. Sevilla, 3 pp.
- IARA (sin fecha). *Informe sobre la superficie de riego y dotaciones y evolución de niveles piezométricos y calidad del agua en la zona regable de Almonte-Marismas y alrededores*, mecanografiado, 6 pp. y figuras (informe enviado por el IARA a la misión WWF en 1989, cf. Hollis et al., 1989).
- IGME (1976 a). Mapa geológico de España E 1/50.000, Hoja núm. 1.018 (El Rocío) (2.ª serie). Madrid.
- IGME (1976 b). Mapa geológico de España E 1/50.000, Hoja núm.1.017 (El Abalarío) (2.ª serie). Madrid.
- IGME (1976 c). Mapa geológico de España E 1/50.000, Hoja núm. 1.000 (Moguer) (2.ª serie). Madrid.
- IGME (1977). Mapa geológico de España E 1/50.000, Hoja núm. 1.001 (Almonte) (2.ª serie). Madrid.
- IGME (1982). Actualización de los datos hidrogeológicos en los acuíferos de Almonte-Marismas y Mioceno de base, 1982. Modelo matemático bidimensional del sistema acuífero núm. 27. Unidad Almonte-Marismas. Memoria, planos y anejos. Madrid, 50 pp.
- IGME (1983). Hidrogeología del Parque Nacional de Doñana y su entorno. Colección Informe. Madrid. 120 pp.
- IGME (1986). *Actualización de datos hidrogeológicos de Almonte-Marismas. Aplicación del modelo matemático bidimensional del Sistema Acuífero n.º 27. Procesamiento de datos de ordenador*. Memoria, planos y anejos. Madrid, 50 pp.
- IGME (1987). *Simulación de la evolución piezométrica del acuífero Almonte-Marismas. Horizonte año 2010*. Memoria, planos y anejos. Sevilla, 32 pp.
- IGME (1988). *Contenido en nitratos de las aguas subterráneas en España. Distribución espacial y evolución temporal. Cuenca del Guadalquivir*. Memoria, planos y anejos. Madrid, 70 pp.
- IRYDA (1976). *Segundo informe sobre el modelo matemático de los acuíferos de Almonte-Marismas (Huelva-Sevilla)*. Memoria, anejos y planos. Madrid.
- IRYDA (1978). *Informe sobre el control y vigilancia del acuífero «Almonte-Marismas» durante los años 1975 a 1977*. Memoria, anejos y planos, 10 pp.
- Juan Pablo II (1986). Discurso a la Pontificia Academia de Ciencias. Osservatore Romano, 30 octubre 1986, pp. 6 y 7.
- Lucena Bonny, C. y García Fernández, E. (1978). El modelo matemático del sistema acuífero de Almonte-Marismas. *Bol. Geol. Min.* 89. 151-163.
- Llamas, M. R. (1986). *La desertización de Doñana*. Diario YA, 15 junio 1986, pág. 39.
- Llamas, M. R. (1987a). Impact of groundwater exploitation on two wetlands in Spain. *Abstracts 20th Intern. Congress Intern. Assoc. Hydrogeologists*. Roma, 34.
- Llamas, M. R. (1987b). *Réquiem por el Parque Nacional de Doñana*, Diario YA. Madrid, 28 noviembre 1987, pp. 11-12.
- Llamas, M. R. (1988a). Conflicts between Wetland-Conservation and Groundwater Exploitation: two case Histories in Spain. *Environ. Geol. Water Sci.* 11, 241-251.
- Llamas, M. R. (1988b). Difficulties involved in the protection of two Spanish wetlands. *Proc. Intern. Symp. Hydrology of Wetlands*. Agencia del Medio Ambiente de Andalucía. Sevilla, 103-106.
- Llamas, M. R. (1988c). Deterioration of Wetlands caused by Groundwater Exploitation Two Case Histories in

- Spain. *Abstracts Inter. Wetlands Conference*. Rennes, France, 9.
- Llamas, M. R. (1988d). *Analysis of the impact of groundwater exploitation on the Doñana ecosystems. Remarks for the WWF/IUCN mission*. Written communication, 9 p.
- Llamas, M. R. (1989a). Consideraciones en relación con el impacto negativo de la extracción de aguas subterráneas en dos importantes ecosistemas españoles, *Actas VIII Conferencia Hidrología General y Aplicada*, Salón Monográfico del Agua. Zaragoza, 127-141.
- Llamas, M. R. (1989b). Groundwater and Wetlands: new constraints in groundwater management. In *Groundwater Management* (ed. Sahuquillo). Intern. Assoc. Hydrological Sciences. Pub. n.º 188, 595-604.
- Llamas, M. R. (1989c). Notas sobre la relación entre sobreexplotación de acuíferos e impactos ecológicos. *Acta del Congreso sobre Sobreexplotación de acuíferos*, Grupo Español de la Intern. Assoc. Hydrogeologists (preprint 20 págs.).
- Llamas, M. R. (1989d). *Comentarios preliminares sobre el informe WWF/IUCN/ADENA de mayo de 1989*. Informe mecanográfico enviado a los directores de WWF, IUCN y ADENA, 11 págs.
- Llamas, M. R. (1989e). Entrevista en *ABC* de Sevilla, 6 nov. 1989, pág. 28.
- Llamas, M.R. (1989f). *La Vandalización de Doñana en El Mundo*, 7, diciembre, 1989, pág. 16.
- Llamas, M. R. y Rodríguez Arévalo, J. (1987). *Comentario sobre la Memoria del informe del IRYDA sobre el PTAAM y su influencia en la cantidad y calidad de las aguas del Parque*. Enviado por conducto oficial al Presidente del Patronato del PND el 16 de junio 1987. 9 págs.
- Llamas, M., Rodríguez, J., Tenajas, J. y Vela, A. (1987). *El Parque Nacional de Doñana: El Medio Físico*. Seminario sobre Bases Científicas para la Protección de los Humedales en España. Madrid. Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. 147-172.
- Martín Machuca, M. (?) (1989). *Informe sobre la situación actual del acuífero Almonte-Marismas y su evolución histórica*. Informe mecanografiado realizado para el Grupo de Trabajo de Aguas (GTA) del Patronato del PND y cuyo autor, según la pág. 1 del acta del GTA del 11.I.89 parece ser el indicado.
- Menanteu (1989). *Les Marismas du Guadalquivir. Exemple de transformation d'un paysage alluvial au cours du Quaternaire recente*. Tesis (3è cycle). Universidad de París-Sorbone. 2 Tomos.
- Merino, J.; Ramírez Díaz, L.; Sancho Royo, F. y Torres Martínez, A. (1980a). Estudio ecológico de la vegetación de ecotono («vera») de la Reserva Biológica de Doñana (Huelva). I. Metodología y medio físico-químico. *An. Edaf. Agrob.* 39, 1867-1878.
- Merino, J.; Ramírez Díaz, L.; Sancho Royo, F. y Torres Martínez, A. (1980b). Estudio ecológico de la vegetación del ecotono («vera») de la Reserva Biológica de Doñana (Huelva). II. Tipificación ecológica de las comunidades vegetales. *An. Edaf. y Agrob.* 39, 1879-1894.
- Merino, O. y Merino, J. (1988). Impacto potencial de la explotación del acuífero Almonte-Marismas en los ecosistemas del área de Doñana. *Proc. Intern. Symp. Hydrology of Wetlands*. Agencia del Medio Ambiente. Sevilla, pp. 123-126.
- MOPU (1979). *Informe hidrogeológico y de recursos hídricos, desagües y vertidos, y posibles incidencias de los mismos en el Parque Nacional de Doñana*. Direc. Gral. de Obras Hidráulicas. Madrid.
- 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. Facultad de CC. Geológicas. Universidad Complutense. Madrid, 177 pp.
- Rodríguez Arévalo, J. y Llamas, M. R. (1986a). Evaluación preliminar del impacto de los bombeos de agua subterránea en el ecotono de La Vera-La Retuerta (Parque Nacional de Doñana). *II Simposio sobre el agua en Andalucía*. Granada, 423-434.
- Rodríguez Arévalo, F.J. y Llamas, M.R. (1986b). Groundwater development and watertable variation in the Doñana National Park (Spain). *Memoires Intern. Assoc. of Hydrogeologists*. 19, 143-150.
- Samper, F. J., Galarza, G., Carrera, J., Cruces de Abia, J. y Llamas, M. R. (1989). *Interpretación de Niveles Piezométricos en zonas sobreexplotadas poco permeables, La Sobreexplotación de Acuíferos, Asociación Internacional de Hidrogeólogos*, Almería, pp. 631-645.
- Scientific Committee on Problems of The Environment (Grupo Español) (SCOPE) (1987). *La cantidad y calidad del agua disponible en el Coto de Doñana*. Reunión de Sevilla, 25 pp.
- Siljestrom, P. (1985). *Geomorfología y edafogénesis de las arenas del Parque Nacional de Doñana*. Tesis Doctoral. Universidad de Sevilla, 515 pp.
- Siljestrom, P., Clemente, L., Figueroa, M. E. (1987). *Localización de zonas de surgencia del nivel freático a través del estudio edáfico*. Cuaternario y Geomorfología, V-1, pp. 271-281.
- Smidt, J. T., Barendregt, A. and Wassen, M. J. (1986). *Impact assessment on inversion of groundwater flow in wetland ecosystems*. In *Impact Assessment Today* (Backer and Porter, ed.).
- Suso, J. M. (1988). *Estudio hidrogeológico de la influencia de la extracción de aguas subterráneas en las proximidades de El Rocío (Huelva)*. Tesis de Licenciatura, Facultad de CC. Geológicas, Universidad Complutense, Madrid, 120 pp.
- Suso, J. M., Llamas, M.R. (1989). *Impact of Groundwater Extraction on Wetlands: Doñana National Park (Spain) case*, 28th Intern. Geological Congress Abstracts, Vol. 3, pp. 198-199.
- 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 CC. Geológicas. Universidad Complutense. Madrid. 240 pp.
- 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)*, II Simposio sobre el Agua en Andalucía, Granada, 1986, pp. 555-566.
- Vela, A. (1984). *Estudio preliminar de la hidrogeología e hidrogeoquímica del sistema de dunas móviles y flecha litoral del Parque Nacional de Doñana*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Ciencias Geológicas. Universidad Complutense. Madrid. 221 pp.
- Vela, A. y Llamas, M. R. (1986). *Análisis preliminar del flujo del agua subterránea en el sistema de dunas móviles del Parque Nacional de Doñana*, II Simposio sobre el Agua en Andalucía, Granada, 1986, pp. 555-566.

Wassen, M. J., Barendregt, A. y Smidt, J. T. (1988). *Groundwater flow as conditioning factor in few ecosystems in the Kartenhoef Area, The Netherlands*, 8th Intern. Symp. on Problems of Landscape Ecological Research (preprint 11 p.).

Yagüe, A. y Llamas, M. R. (1984). *Simulación del flujo subterráneo del sistema acuífero del estuario del Guadal-*

quivir en un perfil vertical. Primer Congreso Español de Geología, Tomo I, pp. 435-451. Segovia.

Zazo, C. (1980). *El cuaternario marino-continental y el límite Pliopleistoceno en el litoral de Cádiz*. Madrid. Univ. Complutense (Tesis doctoral) 2 v.

Recibido el 20 de marzo de 1990
Aceptado el 29 de mayo de 1990