

HIDROGEOLOGIA DEL DELTA DEL RIO ADRA

A. Pulido Bosch*, G. Morales* y J. Benavente*

RESUMEN

El delta del río Adra, en sentido geográfico, constituye un sistema acuífero de geometría compleja integrado por materiales detríticos neógeno-cuaternarios, cuyo sustrato impermeable está formado por metapelitas alpujárrides. Con una precipitación media anual de 400 mm y temperatura superior a 18°C se estima una lluvia útil media superior a 100 mm/año. Sus aguas, de calidad mediocre o mala, tanto para uso doméstico como agrícola, presentan facies sulfatada magnésico-cálcica o clorurada sódica y contenido total en sales disueltas comprendido entre 1 y 4 g/l. La principal fuente de alimentación procede de la recarga a partir del río Adra, con el que guarda estrecha relación hidráulica. Este sistema es actualmente excedentario en recursos y susceptible de un mayor aprovechamiento, en un área en donde la escasez de agua constituye el principal elemento limitativo del desarrollo.

Palabras clave: *Acuífero detrítico costero, río perdedor, excedentes hídricos.*

ABSTRACT

The geographical delta of the Adra River, comprises a complex aquifer system running through neogene-quaternary materials, which in turn overlie impermeable Alpujarride metapellitic rocks. The mean average rainfall is some 400 mm, the average temperature above 18°C, and it is calculated that, including infiltration and runoff, the annual rainwater amounts to more than 100 mm. The groundwater in general ranges from bad to mediocre in quality, both for domestic and agricultural use, containing as it does calcic-magnesium sulphates and/or sodium chlorate to quantities of 1 to 4 g/l in solution. The principal source of recharge for the system is from filtration through the permeable bed of the Adra River, with which in hydraulic terms it is closely related. The resources of this system at the moment exceed the demand being put on them and it would be possible to obtain greater benefits from it in an area where a general shortage of water is one of the main factors limiting development.

Key words: *Coastal detritic aquifer, losing stream, exceeding water.*

Introducción

En relación con la desembocadura del río Adra se encuentra una llanura costera de 22 km² de superficie; se sitúa al Suroeste de la provincia de Almería, junto al límite con la de Granada (fig. 1). Dentro del área en cuestión se diferencia una franja interior que incluye el delta actual y antiguo, prácticamente plana y con cota inferior a 20 m s.n.m.; sobre ella otra, triangular, de suave pendiente hacia el mar y cota inferior a 100 m; finalmente, rodea el área por todos sus bordes, salvo el meridional ocupado por el mar, una serie de relieves correspondientes a las sierras de Gádor y Contraviesa. El río Adra surca el sector estudiado.



Fig. 1.—Localización del área estudiada.

* Departamento de Geodinámica e IAGM, Universidad de Granada-CSIC. Avda. Fuentenueva, s/n. 18071 Granada.

El núcleo principal de población ubicado sobre el área es el de Adra, con unos 20.000 habitantes, de los que cerca del 20% viven en las pedanías de El Puente del Río, La Alquería y Guainos Bajos. La actividad económica principal es la agricultura de productos extratempranos, que ha sustituido en pocos años a la caña de azúcar. Se cultivan cerca de 1.400 ha dentro del término, la mayor parte de ellas en forma de cultivos forzados de enaneros. Las aguas utilizadas para el regadío de estos cultivos proceden del río Adra —conducidos a través de una serie de canales de distribución— y de pozos y sondeos equipados.

Principales características climatológicas

Precipitaciones y temperaturas

La riqueza agrícola del sector litoral de Andalucía oriental se debe, en gran medida, a sus peculiaridades climáticas. En efecto, son muy abundantes las horas anuales de insolación, escasas las precipitaciones y suele soplar muy frecuentemente viento dominante de

poniente que impide el exceso de humedad en los cultivos bajo plástico.

Existen dos estaciones pluviométricas dentro del área: Adra y Faro de Adra, esta segunda, además, termométrica, aunque dada la proximidad de ambos vamos a referir exclusivamente a los datos de la de Adra y, concretamente al período de 30 años 1953/54-1982/83. Los datos anuales, tras ser corregidos y completados, se muestran en la figura 2. Resulta un módulo pluviométrico interanual de 406 mm y unos valores extremos de 766 y 261 mm.

En cuanto a la distribución media mensual de las precipitaciones, el máximo se alcanza durante el mes de diciembre con 67 mm, seguido muy de cerca por el de enero con 66 mm y marzo con 59; los valores mínimos corresponden a los meses de junio y julio, con sólo 2 mm (fig. 3). Esta distribución es característica del clima mediterráneo subtropical (Capel Molina, 1977); estos valores medios distan mucho de reflejar la realidad del fenómeno físico, dadas las extremas variaciones tanto en frecuencia como en intensidad, con la consiguiente incidencia ambiental y económica. Así, por ejemplo, García *et al.* (1986), ponen de manifiesto que la probabilidad de no alcanzar 200 mm

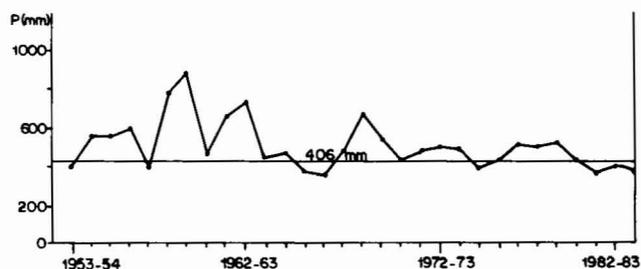


Fig. 2.—Pluviometría anual en la estación de Adra (período 1953-54/1982-83).

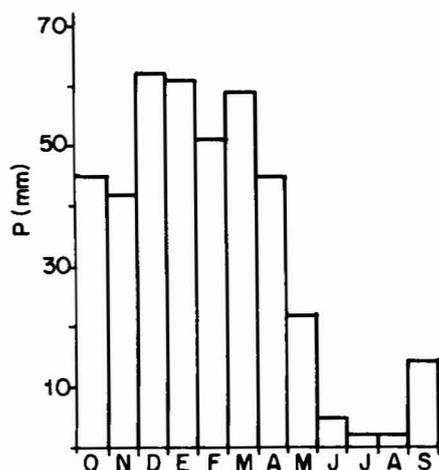


Fig. 3.—Distribución media mensual de las precipitaciones en la estación de Adra (mismo período).

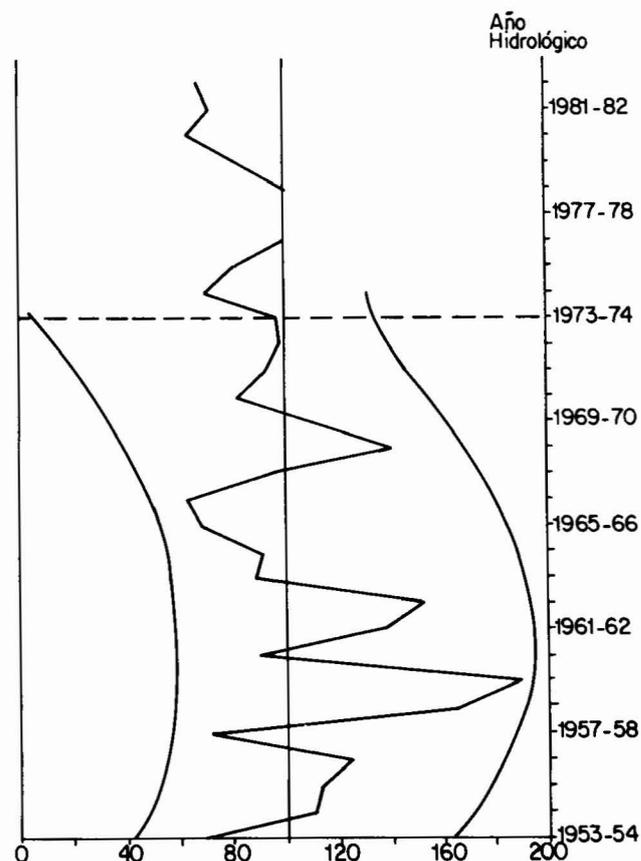


Fig. 4.—Variación de la pluviometría anual con respecto al módulo (%).

de precipitación entre octubre y abril es del 30%, mientras que la probabilidad de ocurrencia de una precipitación diaria superior a 30 mm se acerca al 25%; ello dificulta notablemente los cultivos de secano y trae consigo un elevado grado de erosividad.

En la figura 4 se muestra la variación porcentual de la precipitación en relación con el módulo pluviométrico, en donde se pueden diferenciar años secos y húmedos según el valor sea inferior o superior a 100. Parecen apreciarse dos periodicidades superpuestas: una de 3-6 años y otra menos clara, entre 17 y 21 años, periodicidades similares a las encontradas por Carulla (1981) en el sector oriental de la provincia de Almería y por Almecija (1984) en la rambla de Albuñol.

La distribución de frecuencias de las precipitaciones anuales para el período reseñado se muestra en la figura 5. Se observa que casi el 60% de las precipitaciones no superan los 400 mm. Del estudio de datos diarios se deduce que en la estación de Adra el número de días del año que registran precipitación varía entre 26 y 45 con un valor medio de 34, para un período de 26 años.

De los datos termométricos registrados en la estación de Faro de Adra se deduce una temperatura media anual de 18,4°C, con 13,4°C como valor mensual medio más bajo (enero) y 25,1°C como más caluroso (agosto). En los 11 años consultados el valor mínimo medido fue de 3,5°C (14-1-1981) y el máximo de 39,5°C (16-7-1975).

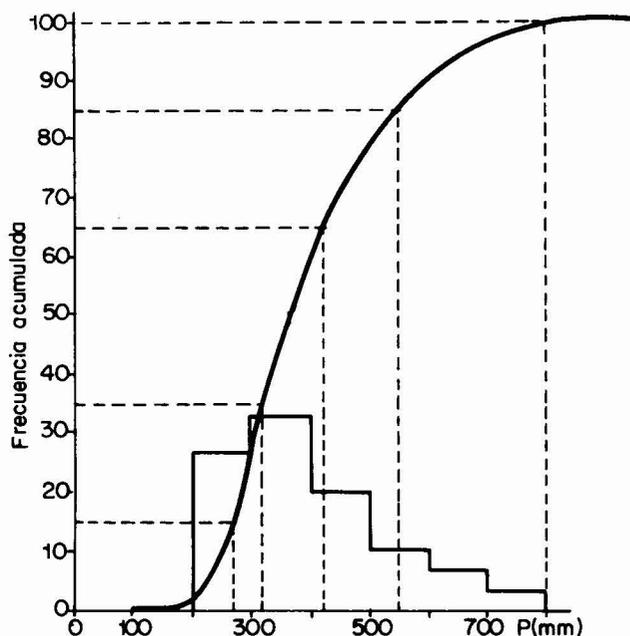


Fig. 5.—Distribución de frecuencias de las precipitaciones anuales (Adra).

Evapotranspiraciones potencial y real

La evapotranspiración potencial diaria ha sido estimada mediante el método de Thornthwaite con el programa EVADIA (Padilla y Pulido Bosch, 1986) en una computadora MPT/100 de Data General; el valor medio obtenido supera ligeramente los 900 mm/año.

Con el mismo programa se ha calculado la evapotranspiración real, empleando para ello diversos valores de la reserva de agua utilizable por las plantas, según la naturaleza del material aflorante. En las áreas ocupadas por glaciais encostrados, en el área litoral y deltaica actual se han considerado 30 mm, y 100 mm en las áreas ocupadas por esquistos y filitas alteradas y la deltaica antigua. Los valores obtenidos para la evapotranspiración real varían entre 230 mm (R.A.U. de 30 mm) y 320 (R.A.U. de 100 mm). La lluvia útil media, en tanto que diferencia entre precipitación y evapotranspiración real, queda comprendida entre 30 y 120 mm/año.

Existe una notable disminución de la evapotranspiración en el interior de los invernaderos, con respecto al exterior, como consecuencia de la existencia de una humedad relativa mucho mayor en el interior de la instalación. Los datos medidos en la Finca Experimental «Las Palmerillas», para el año 1983/84 se muestran en la figura 6.

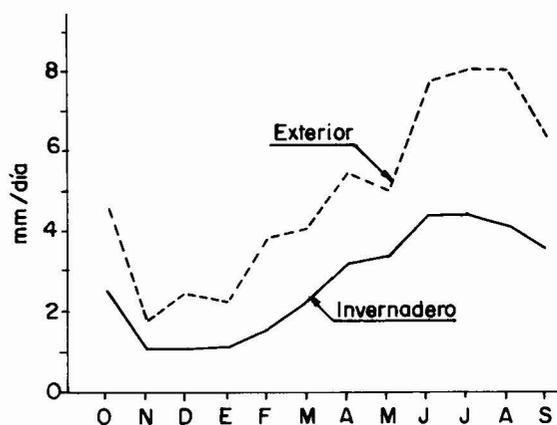


Fig. 6.—Valores de la ETR en invernadero y exterior (Finca Experimental de «Las Palmerillas»).

El marco geológico

La cuenca baja del río Adra está ocupada por materiales neógeno-cuaternarios; los relieves circundantes están constituidos por terrenos alpujárrides pertenecientes a diversos mantos. A continuación describimos los materiales del área.

Mantos alpujárrides

De acuerdo con Aldaya *et al.* (1983), los materiales alpujárrides que circundan la desembocadura del río Adra pertenecen a tres mantos diferentes: Lújar, Murtas y Adra. Los materiales del manto de Murtas son los que afloran más ampliamente en todo el sector; están integrados por filitas con cuarcitas e intercalaciones de calcoesquistos, con niveles de filitas y arcillas moradas en el muro de la serie carbonática triásica de techo, la cual puede alcanzar 1.500 m de espesor. Sobre los materiales del manto de Lújar reposan los de Murtas, los cuales presentan la sucesión alpujárride típica, es decir, micasquistos, cuarcitas micáceas y calizas y dolomías triásicas. Por último, los materiales del manto de Adra —que ocupan el borde más occidental del área— están constituidos por micasquistos y cuarcitas que presentan una estructura tectónica muy compleja.

Depósitos neógeno-cuaternarios

Son los materiales que rellenan la franja litoral objeto de este estudio; están representados por litologías muy diferentes con geometría muy compleja. Comprende términos que van desde el Tortonense hasta el Cuaternario actual.

Los terrenos más antiguos corresponden a la formación Vicar, ampliamente representados en el Campo de Dalías, pero que en este sector afloran tan sólo de forma muy reducida; reposan directamente sobre los materiales alpujárrides. En la mitad oriental han sido cortados en un sondeo de investigación a 108 m de profundidad, donde reposan sobre esquistos. Se trata de calcarenitas conglomeráticas con cantos dolomíticos y de micasquistos y cuarcitas, bien redondeados.

Los materiales del Plioceno inferior y medio están representados por facies deltaicas, litorales, infralitorales y profundas (Fourniguet, 1975). Las facies deltaicas están bien representadas al Este de Adra, donde reposan sobre metapelitas alpujárrides. Se trata de una

serie detrítica con cantos de naturaleza muy variada, poco rodados, embutidos en una matriz de los mismos materiales; presentan 10 a 15° de buzamiento original hacia el SE. El espesor, que alcanza 60 m en el Norte, se reduce hacia el Sur, donde se produce un cambio lateral a calcarenitas litorales e infralitorales.

Las facies litorales, que llegan a alcanzar 40 m de espesor, no afloran, al quedar recubiertas por la formación deltaica; han sido cortadas por varios sondeos y están constituidas por areniscas gruesas y conglomerados de cantos de naturaleza diversa.

Los terrenos de facies infralitorales han sido atravesados por varios de los sondeos de investigación realizados por el IGME, con espesores que varían entre 31 y 140 m. Se trata de calcarenitas con algunos cantos rodados; presentan megaestratificaciones cruzadas. Afloran a lo largo de una estrecha franja paralela a la carretera nacional, entre otros lugares. Estos materiales pasan lateralmente y de forma gradual a las facies profundas margosas, cortadas por algunos sondeos de investigación.

En la figura 7, tomada de Fourniguet (1975), se muestra el modelo de distribución de las facies pliocenas. En resumen, los materiales pliocenos representan distintas situaciones en la cuenca, desde un medio de gran influencia continental al Oeste, a otro marino y más profundo hacia el Este, con una progradación de facies costeras en ese mismo sentido.

Dentro de los materiales cuaternarios diferenciamos los de edad Pleistoceno (marino y continental) de los del Holoceno. El Pleistoceno marino aflora en dos terrazas que ocupan muy poca extensión. Integran estas terrazas conglomerados de matriz arenoso-arcillosa que alcanzan pocos metros de espesor.

Los materiales del Pleistoceno continental presentan diversas litologías, algunas reconocidas sólo en los sondeos de investigación; con menos de 15 m de espesor se han reconocido limos negros con niveles de grava finas, posibles depósitos de marisma. En el sector oriental afloran limos rojos arcillosos de probable origen eólico (Aldaya *et al.*, 1983), procedentes de la descalcificación de las costras de la parte superior de las terrazas marinas. Por último, se llegan a diferen-

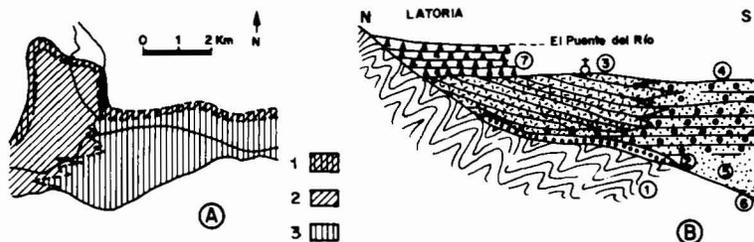


Fig. 7.—Distribución de facies pliocenas (según Fourniguet, 1975). A) Esquema general (1: Franja litoral. 2: Franja deltaica. 3: Zona infralitoral). B) Modelo (1: Sustrato. 2: Conglomerados litorales. 3: Formación deltaica. 4: Calcarenitas infralitorales. 5: Arenas circalitorales. 6: Margas profundas. 7: Brechas continentales).

ciar tres generaciones de glacia, el más antiguo de todos a unos 200 m de altitud. Adquieren poco espesor, de ahí que su interés hidrogeológico sea anecdótico.

Los depósitos holocenos corresponden a los aluviales relacionados con los lechos actuales, constituidos por gravas de diversa naturaleza y tamaños, y proporciones menores de finos, que pueden alcanzar localmente 70 m de potencia. Además existen depósitos de albuferas esencialmente limosos y sedimentos de playa.

Desde el punto de vista tectónico, al margen de la propia estructura en mantos de corrimiento de los materiales alpujárrides y de todas las deformaciones alpínicas, es preciso reseñar la existencia de varios episodios de deformaciones mucho más recientes. Así, por ejemplo, durante el Plioceno se identifican dos fases de fracturación, una que da lugar a fallas de dirección N-S a N 20 E y saltos que pueden alcanzar

30 m, y otra de dirección N 150 E a N 160 E; estas fracturas se encuentran fosilizadas por la tercera generación de glacia.

Finalmente, otro sistema de fracturas, de dirección aproximada N 140 E, aunque puede inflexionarse, afecta a las terrazas y glacia más recientes. Existen además otras deformaciones de gran radio que afectan a amplios sectores del mar de Alborán.

Características geométricas e hidráulicas

Características geométricas

Desde el punto de vista hidrogeológico los materiales neógeno-cuaternarios conforman un sistema acuífero complejo cuyos bordes y sustrato están constituidos por los materiales alpujárrides, salvo el meridional ocupado por el mar mediterráneo (fig. 8).

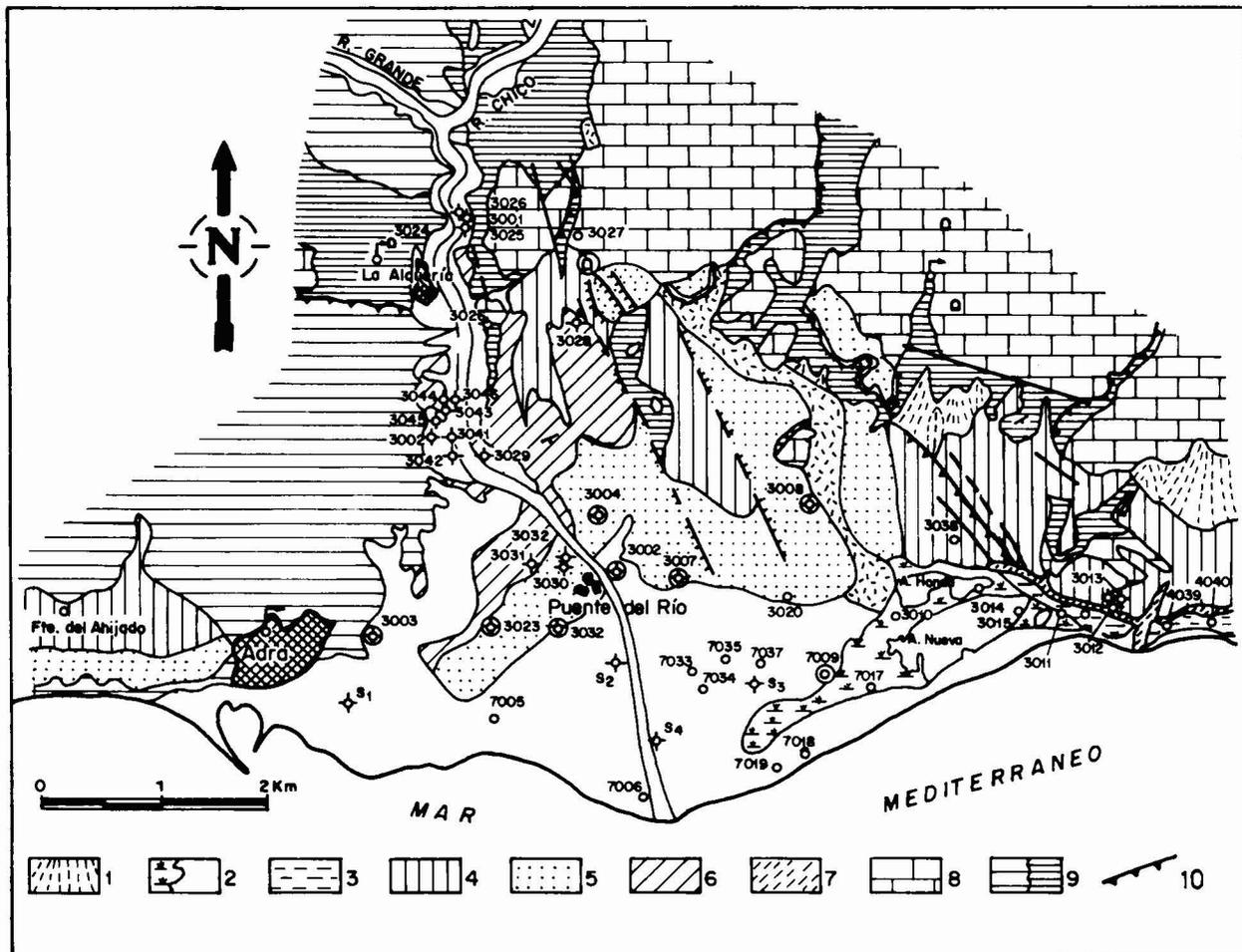


Fig. 8.—Plano hidrogeológico del delta del río Adra. 1 a 7: Materiales neógeno-cuaternarios (1: Conos de deyección. 2: Marismas, aluviales y delta actual. 3: Limos rojos. 4: Glacia. 5: Glacia cementado. 6: Conglomerados «facies deltaica». 7: Calcarenitas). 8 y 9: Materiales alpujárrides (8: Calizas y dolomías. 9: Esquistos, filitas y cuarcitas). 10: Manto de corrimiento. Base geológica simplificada de Aldaya et al. (1983).

Los materiales alpujárrides presentan un comportamiento hidrogeológico diferente según sea la litología; la serie carbonática tiene comportamiento acuífero, en donde la fracturación y la karstificación juegan un papel importante. Tanto las filitas como los esquistos, calcoesquistos y micasquistos pueden considerarse como acuíferos, aunque en relación con la franja alterada y en sectores más fracturados se puede almacenar y conducir ciertas cantidades de agua. Las cuarcitas, cuando adquieren potencia suficiente y están densamente fracturadas, pueden considerarse como un acuífero pobre.

Todos los materiales que rellenan la franja litoral relacionada con la desembocadura del río Adra tienen comportamiento acuífero, salvo las margas pliocenas de facies profunda, de comportamiento acuífero, y los tramos detríticos heterométricos de matriz limoso-arcillosa, consideradas como acuitardo. La compleja geometría de estos cuerpos puede dar lugar a la existencia en una misma vertical de varios tramos acuíferos separados por otros acuitardos.

De acuerdo con los datos de caudales específicos, obtenidos a partir del inventario de puntos acuíferos, se deduce que el sector más transmisor del acuífero corresponde al aluvial actual situado entre Adra y la confluencia de los ríos Grande de Adra y el Chico; dichos valores del caudal específico permiten estimar transmisividades en ese área comprendidas entre 15.000 y 4.000 m²/día; si se tiene en cuenta el espesor saturado, la permeabilidad en el sector queda comprendida entre 100 y 200 m/día. En el antiguo cauce del río Adra (el actual trazado al NE de Adra corresponde a una obra artificial realizada entre los años 1872-1875) los valores de la transmisividad que se obtienen por estimación a partir de los datos de caudal específico son también bastante elevados, comprendidos entre 1.500 y 3.000 m²/día. En la formación deltaica los valores que se obtienen son mucho menores y comprendidos entre 200 y 900 m²/día. Una única prueba de bombeo realizada en las calcareñas pliocenas, por técnicos de la Comisaría de Aguas del Sur de España (CASE), arrojó un valor de la transmisividad de 1.070 m²/día.

La superficie piezométrica y el régimen del manto

La superficie piezométrica

Para identificar la morfología de esta superficie se ha contado con los datos de profundidad del nivel del agua referentes a puntos acuíferos nivelados por la CASE. Este organismo posee un registro piezométrico del período 1975-actualidad, con datos mensuales o bimensuales. El mapa de la superficie freática correspondiente al mes de enero de 1985 se muestra en la figura 9, en una época intermedia entre las situaciones

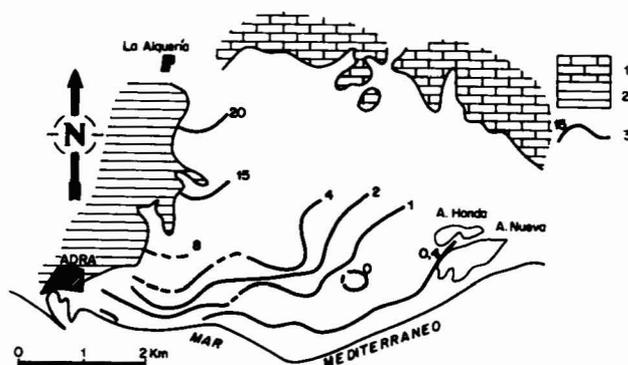


Fig. 9.—Superficie piezométrica correspondiente al mes de enero de 1985. 1: Materiales carbonáticos de borde. 2: Metapelitas. 3: Curva isopieza y su valor en m s.n.m. (en discontinuo, trazado supuesto).

extremas de humedad y estiaje que, lógicamente, supone cotas piezométricas intermedias en los puntos acuíferos. Se ha contado con un total de 54 puntos, con medida de profundidad del agua. De la observación del mapa de isopiezas se deduce que el nivel piezométrico varía desde los 28 m de cota hasta el nivel del mar, e, incluso, por debajo de éste en algunos puntos. El flujo, aunque con variaciones locales, tiene su principal componente en la dirección Norte-Sur. La superficie piezométrica es radial divergente, con un trazado en general muy uniforme, aunque en el margen derecho del río y muy próximo al mismo, se aprecia un considerable incremento del gradiente hidráulico. Su origen está en relación con una antigua albufera, llamada Ancha, que se emplazaba en este sector y fue desecada a finales del siglo pasado para incrementar la superficie cultivable. La albufera, con sedimentación limoso-arcillosa, tiene menor permeabilidad que la facies fluvio-deltaica que la rodea y, en consecuencia, origina un menor distanciamiento de las curvas isopiezas.

Los gradientes hidráulicos disminuyen hacia aguas abajo, en el sentido general del flujo subterráneo, lo que, a igualdad de otros factores, puede corresponder a un incremento de la sección del acuífero. En particular hay dos direcciones principales de flujo subterráneo que coinciden en su trazado con el antiguo y nuevo cauce del río Adra, respectivamente. En el cauce antiguo los gradientes varían desde el 2,2% en la parte más septentrional, al 0,7% en la parte intermedia y el 0,5% en el tramo final, desde las proximidades a la carretera nacional 340 hasta el borde costero. En el cauce nuevo los gradientes son más uniformes: varían entre el 0,9% en la parte más septentrional, hasta el Puente del Río, 0,7% en la parte intermedia y entre 0,1 y 0,2% en la final.

En lo relativo a la relación existente entre el acuífero cuaternario y los materiales de borde se observa que las isopiezas tienden a ponerse perpendiculares al

contacto con los materiales metapelíticos del Manto de Adra, así como con los de la formación deltaica antigua y glacia. Ello pone de manifiesto que los primeros son impermeables, bien por su propia composición litológica (conglomerados con matriz arcillosa), bien por tratarse de materiales metapelíticos enmascarados por una costra de uno o dos metros de glacia.

Respecto a las relaciones del acuífero con el río, son claramente destacables dos convexidades en el trazado de las isopiezas: una de dirección NNE-SSW y otra NW-SE, que suponen una circulación preferente de aguas. La dirección NW-SE refleja el curso actual del río Adra; se deduce que éste es efluente o perdedor en casi todo su recorrido. La otra dirección preferencial de flujo subterráneo coincide con el antiguo cauce del río, antes de que éste fuera desviado, y va a desembocar precisamente en la punta del antiguo delta. El antiguo cauce es también efluente en todo su trazado. La mayor descarga específica del acuífero al mar ocurre precisamente en este sector, lo que constituye un aspecto de indudable interés práctico para ubicar nuevas captaciones en el acuífero.

En cuanto a la relación acuífero-mar se aprecia que las aguas de la capa acuífera fluyen hacia el mar, con líneas sensiblemente paralelas a la línea de costas. Por último, sería muy interesante nivelar puntos en las proximidades a las albuferas y entre ellas, pues, se podría establecer de manera clara la relación de las mismas con el acuífero y las calcarenitas miocenas y pliocenas.

Profundidad de la superficie piezométrica

El plano de profundidad de la superficie piezométrica del área (fig. 10) tiene un interés doble: en el balance hídrico indica en qué sectores se produce evaporación directa del agua del acuífero, y también permite deducir las profundidades mínimas que deben alcanzar las captaciones de agua que pretendan explo-

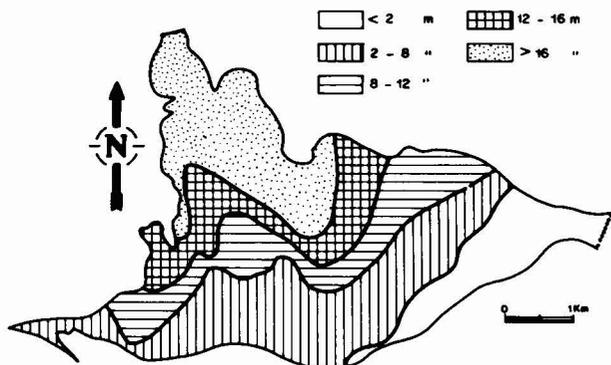


Fig. 10.—Profundidad de la superficie piezométrica (valores en metros). Enero de 1985.

tar el acuífero cuaternario. Se comprueba que la superficie piezométrica se encuentra a profundidades inferiores a 16 m en la mayor parte del acuífero. El sector de menor profundidad es la franja costera más oriental, donde el agua se encuentra a menos de 1 m de la superficie. Las profundidades se distribuyen de una manera mucho más regular en la margen izquierda del río que en la derecha, donde, por lo general, las aguas se encuentran más hondas para iguales latitudes y tienen más cambios laterales de profundidad. Se aprecia un incremento de la misma en el sector donde se emplazaba la albufera Ancha. Al sur de donde está situada la antigua fábrica azucarera se detecta disminución de profundidad. Este hecho está en relación con que precisamente allí desembocan las tomas de riego que proceden de la acequia de Haza Real, derivación muy caudalosa en el delta. Las derivaciones, sin revestir, podrían favorecer la infiltración de agua. Por lo general, las profundidades en la franja costera situada en la margen izquierda del río varían entre 2 y 8 m.

Régimen del acuífero

Las variaciones interanuales del nivel piezométrico del acuífero están en relación con los aportes y salidas de agua, así como con las características hidráulicas del acuífero, que son las que controlan el recorrido del agua desde las áreas de recarga a las de drenaje (Degallier, 1969). En la figura 11 se muestra el mapa de isofluctuación correspondiente a la diferencia de nivel en aguas altas (noviembre de 1983) y estiaje pronunciado (marzo de 1984); se ha contado para ello con las medidas de nivel en 57 puntos acuíferos.

De la observación del mapa obtenido se deduce que en el sector septentrional del acuífero, a la altura de la localidad de El Puente de El Río, las oscilaciones son del orden de cinco metros. Con toda probabilidad a mayor lejanía del cauce menores son las

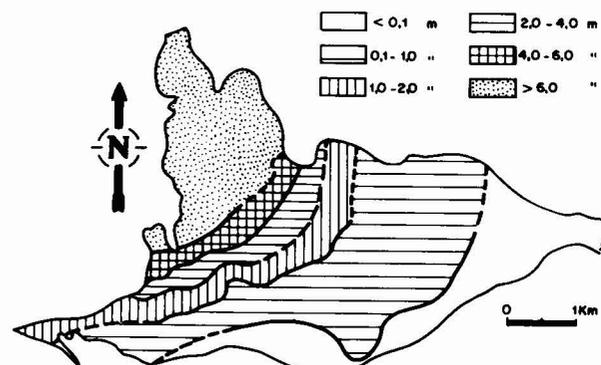


Fig. 11.—Fluctuación del nivel piezométrico entre noviembre de 1983 y marzo de 1984 (valores en metros).

fluctuaciones. Aunque no se tiene información para este año de las variaciones en las proximidades al pueblo de La Alquería, se sabe por los datos de la CASE que éstas pueden ser de hasta 12 m. Desde El Puente del Río y hacia el sur las oscilaciones descienden sin rupturas bruscas hasta llegar a la franja costera. En el delta formado por el río antes de ser encauzado, las fluctuaciones son inferiores a medio metro. Las oscilaciones piezométricas que se registran en la franja costera del delta actual son insignificantes, cuando no nulas.

Hay una relación directa entre la magnitud de las fluctuaciones del acuífero y los valores del gradiente hidráulico, de modo que a mayores gradientes son mayores las variaciones del nivel piezométrico. Las oscilaciones que se producen en el nivel del agua, por efectos de la marea en los pozos costeros, son del orden de 2 cm, tal y como se ha podido deducir del estudio de un limnigrama de un pozo situado a unos 100 m del borde litoral, cuyo control es realizado por la CASE. Lógicamente la fluctuación aumentará con la proximidad al mar y se amortiguará con el aumento de la distancia a la costa.

Otro tipo de oscilaciones, de período diario, se producen en las áreas donde el nivel freático está a menos de 1 m de la superficie. Estas son las generadas por evapotranspiración directa de las aguas del acuífero, que alcanzan un valor máximo durante el día y mínimo durante la noche.

Sobre la fluctuación estacional y de menor período se superpone otra de tipo hiperanual. La causa principal de estas fluctuaciones en el área son las precipitaciones, que inciden directamente en la explotación del manto acuífero. En años húmedos, el agua que corre por la red de canales del delta, en su mayor parte procedente de las Fuentes de Marbella, es suficiente para satisfacer las necesidades de riego de los 830 ha a las que abastecen. En años secos, el agua de estas acequias es insuficiente y los pozos próximos a las mismas, que no suelen funcionar en años húmedos, comienzan a bombear para satisfacer con agua subterránea el déficit de agua de los cultivos. Además, al ser inferior la pluviosidad, las necesidades de agua para riego son, en general, superiores para todo el delta, y los bombeos se acrecientan, lo que influye en que la capa freática se deprima. Esto no quiere decir que los niveles muestren una tendencia generalizada al descenso. Así, por ejemplo, desde el año 1979 al 1982 —años de intensa sequía— los niveles piezométricos en el delta se deprimieron 1 m (IGME, 1982), pero tras el año húmedo 1984/85, el manto ha recuperado sus niveles originales.

Características físico-químicas de las aguas

Los aspectos físico-químicos de las aguas han sido objeto de una reciente publicación (Benavente *et al.*,

1987). No obstante vamos a resumir los principales rasgos.

La mineralización de las aguas subterráneas es elevada, con valores comprendidos entre 1,1 y 3,8 g/l, sin incluir las albuferas, que se aproximan a los 5 g/l. La conductividad eléctrica está comprendida entre 1.300 y 5.200 micromhos/cm en las aguas del acuífero. Las albuferas tienen valores comprendidos entre 4.000 y 7.000 micromhos/cm. En lo referente a temperaturas hemos encontrado valores comprendidos entre 16 y 22°C. Los valores más altos están en relación con los sectores próximos a la costa, donde la profundidad del agua subterránea es menor.

En lo referente a la distribución areal de facies hidrogeoquímicas se constata que la facies sulfatada de las aguas ocupa las áreas más próximas al río Adra, principal fuente de alimentación del sistema, mientras que la clorurada se circunscribe al tercio oriental del acuífero. La salinidad se incrementa de manera gradual según franjas de dirección aproximada NE-SW, hasta alcanzar los valores máximos precisamente en el último de los sectores citados. Este incremento de la salinidad es coincidente, a grandes rasgos, con el aumento de la concentración de cloruros. La distribución espacial del contenido en sulfatos muestra algunas diferencias respecto de los cloruros. Los valores máximos no se alcanzan en las albuferas, sino en captaciones que se localizan entre éstas y la desembocadura del río, próximas al borde litoral. Conviene señalar que en el sector más oriental se registran las concentraciones más elevadas de nitratos, entre 100 y 150 mg/l, lo cual está en relación con la reutilización y reciclaje en el acuífero de aguas que han disuelto fertilizantes nitrogenados abundantemente empleados en los cultivos forzados.

La relación rCl^-/SO_4^{2-} de las aguas superficiales utilizadas en riego es próxima a la unidad o ligeramente superior (Pulido Bosch *et al.*, 1986). Sería de esperar que dicha relación se mantuviera aproximadamente constante en las aguas subterráneas si la única modificación hidroquímica de importancia estuviera en relación con procesos de concentración salina en el sentido del flujo subterráneo. En el extremo oriental de la unidad se supera el valor de 2 para dicha relación, lo que sugiere la ocurrencia de otros procesos para explicar el incremento más rápido en cloruros: lavado de sedimentos marinos recientes, por ejemplo.

Los materiales en este sector oriental son sedimentos de formación muy reciente, formados por remodelación de los depósitos de delta por los vientos de poniente. Su modelo de formación es litoral y, como tal, estrechamente ligado con aguas marinas. Así pues, es fácil suponer que los sedimentos saturados en agua marina son lavados exclusivamente por los únicos aportes que recibe el delta, que son, en su mayoría, procedentes del río Adra. La interpretación de los diferentes planos de isopiezas del sector señala que los

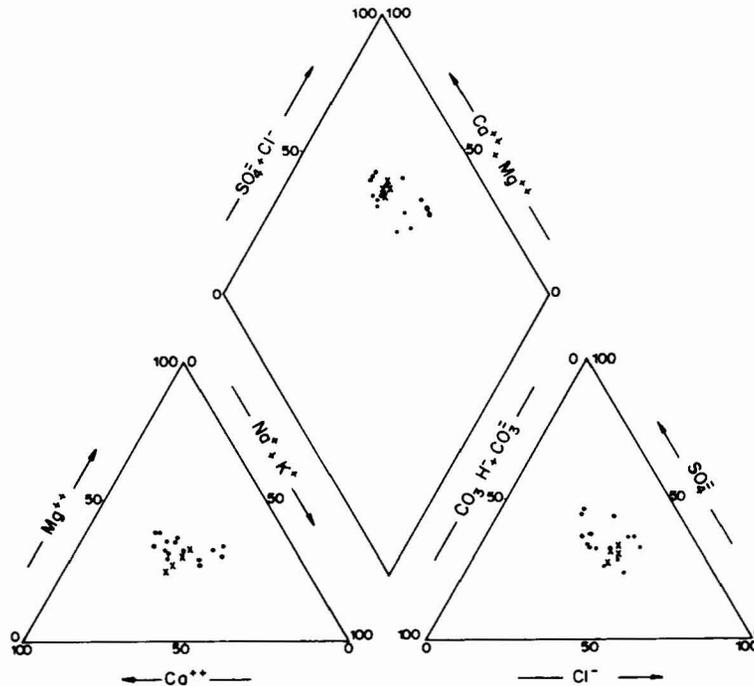


Fig. 12.—Diagrama triangular de los puntos con aguas de facies sulfatada o clorosulfatada del delta (círculos) y las aguas de los manantiales de Marbella (cruces).

aportes del río son escasos, por lo que el lavado de los materiales costeros debe ser un proceso lento que no se ha llevado a cabo en su totalidad; dado que los bombeos en este sector son mínimos con respecto al resto del área y no existen situaciones comprobadas de inversión del gradiente hidráulico resulta difícil explicar las características hidroquímicas exclusivamente por un proceso de intrusión marina.

Cabe destacar que en el sector con predominio de aguas sulfatadas es fácil comprobar la similitud en el quimismo de las mismas con los manantiales de Marbella, que constituyen la mayor recarga del río Adra superficial y subterráneamente. Para ello se realizó el diagrama de Piper de los puntos de facies sulfatadas o clorosulfatada magnésico cálcica del delta con los resultados del muestreo de 1985 con el muestreo que se hizo en marzo de 1985 en los manantiales (fig. 12). Este diagrama triangular ha sido especialmente útil para expresar con claridad las estrechas relaciones químicas de las aguas. Las aguas del acuífero del delta tienen contenidos en cloruros y sodio ligeramente más bajos que las de los manantiales, lo que con toda probabilidad es debido a procesos de dilución (cloruros) y de intercambio iónico (sodio), que suponen un ligero endurecimiento de las mismas, tal y como parecen indicar los índices de cambio de bases, superiores en general en esta porción del acuífero del delta. Al superponer los mapas de facies hidrogeoquímicos con el plano del isopiezas para 1985, se

observa la coincidencia exacta de las facies sulfatadas y clorosulfatadas con las fuentes de alimentación.

Respecto al contenido catiónico, el sodio sobrepasa los 600 mg/l en algunos puntos junto a la línea de costas. En las albuferas supera el gramo por litro. El magnesio oscila entre 75 y 215 mg/l. A diferencia de estos dos cationes, el calcio apenas incrementa su contenido respecto a los valores de los manantiales de Marbella, sino que disminuye sensiblemente en el sector oriental. En lo que se refiere a las proporciones iónicas se desprende del diagrama de Piper (fig. 12) que las muestras se diferencian fundamentalmente a nivel catiónico, por variaciones en la relación $r(Na^+ + K^+)/Ca^{++}$. La proporción de Mg^{++} se mantiene dentro de una banda relativamente estrecha. Algo semejante, aunque con un mayor margen de variación, sucede a nivel aniónico respecto a las proporciones de bicarbonatos: las diferencias más acusadas se establecen en base a los valores de la relación Cl^-/SO_4^{2-} .

Como complemento a todo el aspecto descriptivo reseñado hemos realizado análisis cluster, tanto de variables como de casos, para los muestreos llevados a cabo en 1985. Este tipo de análisis permite conocer el grado de relación entre los parámetros observados o medidos en muchos individuos, o agrupar los individuos por la similitud de los parámetros que los caracterizan. En el dominio de la Hidrogeología y, concretamente, el relativo al tratamiento de las carac-

terísticas físico-químicas de las aguas, este tipo de análisis comienza a ser usual en España (Ibáñez y Sánchez, 1983; Moral *et al.*, 1984; Castillo, 1985; Morell, 1985; Carrasco, 1986; Martínez-Gil *et al.*, 1986).

Lo que hace en esencia el análisis cluster es establecer grupos y clasificar. «La ventaja de este procedimiento sobre otros más sofisticados como el análisis factorial es su simplicidad matemática que implica pocas hipótesis sobre los datos iniciales. Este hecho permite que pueda ser de utilidad en la mayoría de los casos» (Moral *et al.*, 1984). El fundamento teórico de este análisis se puede encontrar en Dixon (1975).

El cluster de variables ha sido aplicado a los ocho iones más representativos del acuífero, concretamente cloruros, sulfatos, bicarbonatos, nitratos, calcio, sodio, magnesio y potasio. El dendograma obtenido se refleja en la figura 13, donde se comprueba que hay una correlación extremadamente elevada entre los iones cloruro y sodio, con un coeficiente de 0,99. También es elevada la correlación entre estos dos iones y el magnesio, con el que se forma un nuevo «taxón» de coeficiente $\rho=0,90$. Otra familia forman el bicarbonato y sulfato, con $\rho=0,86$. Ello expresa que cualquiera de las variables citadas puede obtenerse con bastante exactitud por el simple análisis de una de ellas. A este cluster se le une el calcio con una correlación ya baja, de 0,45. Este último cluster presenta una correlación negativa ($-0,04$) con los nitratos, lo cual es indicativo de que el aumento de nitratos supone una disminución de los otros dos iones y viceversa.

Para el cluster de casos hemos tomado como observaciones los puntos muestreados en el delta junto con el muestreo que se hizo en los manantiales de Marbella en fecha similar, también en el marco del proyecto LUCDEME. El objetivo de este «cluster» ha sido doble: en primer lugar, cuantificar la relación de las aguas del acuífero con las aguas de los manantiales y, además, encontrar «familias de tipos de aguas en el acuífero», suceso que ya se había puesto de manifiesto por otros procedimientos. Los iones que se han tomado como variables para establecer el cluster han sido los mismos que los propuestos en el de variables. Los resultados son muy expresivos y corroboran lo propuesto en el apartado anterior: se presentan dos familias de facies, una de las cuales ofrece relación

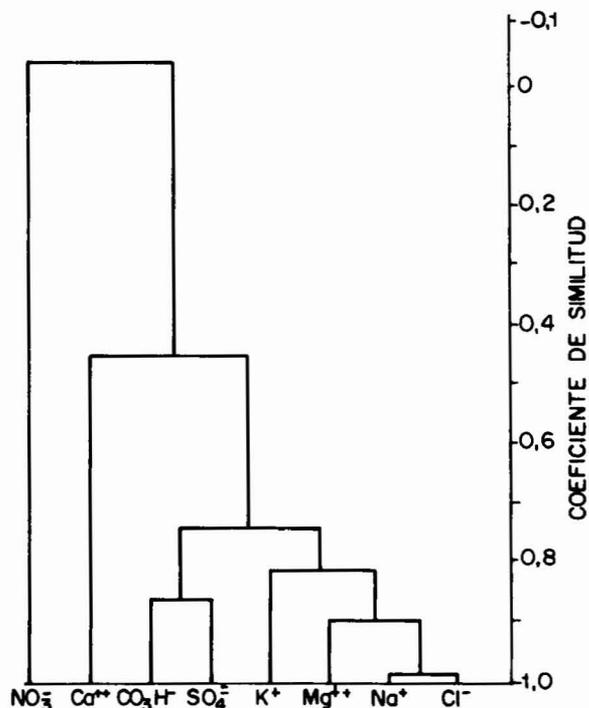


Fig. 13.—Dendrograma de variables.

muy estrecha con las aguas procedentes de los manantiales (fig. 14).

En definitiva, este análisis pone nuevamente de manifiesto la existencia de dos familias de aguas en el delta, que, a grandes rasgos, coinciden con la mitad oriental y occidental del mismo y son de facies cloruradas sódicas y sulfatadas cálcicas, respectivamente. Cada una de las familias tiene correlaciones con ρ igual o superior a 0,90, lo cual es un dato importante, ya que expresa que, en cada uno de los dos grandes taxones diferenciados, cualquiera de las variables antes citadas podría obtenerse con el simple análisis de una de ellas por correlación.

Calidad de las aguas

Para establecer la calidad química de las aguas subterráneas para abastecimiento y uso agrícola utilizare-



Fig. 14.—Dendrograma de casos.

Tabla 1.—Porcentaje de muestras que superan el límite de tolerabilidad establecido en cada uno de los iones mayoritariamente analizados

Iones	Límite máximo reglamentario (mg/l)	% de muestras que sobrepasan el límite de tolerabilidad	Contenidos en dichas muestras (mg/l)	
			Máximos	Mínimos
Cl ⁻	350	57,9	1.028,1	354,5
SO ₄ ⁼	400	42,1	1.054,2	484,3
Mg ⁺⁺	50	100,0	241,5	60,6
Na ⁺	175	68,4	641,3	126,9
Ca ⁺⁺	200	31,6	348,7	205,6
R.S.	1.500	63,2	3.857,1	1.707,8
NO ₃ ⁻	50	42,1	120,4	51,8
NO ₂ ⁻	0,10	52,6	1,59	0,11

mos los resultados del muestreo de 1985. Obviamente, la evolución que han seguido las aguas del acuífero ha llevado consigo un deterioro paralelo de la calidad de las mismas, con una ligera mejoría en el último año, más lluvioso.

Uso doméstico

Hemos establecido la calidad química de las aguas en base a los valores máximo de tolerabilidad admitidos para cada ion, en la reglamentación vigente (Real Decreto del 18 de julio de 1982 del Código Alimentario Español). De acuerdo con ésta, las aguas de este acuífero no son aptas para el consumo humano, pues la totalidad de los puntos presentan concentraciones en magnesio superiores a las estipuladas como recomendables. En la tabla 1 se expresa el porcentaje de muestras que sobrepasa el límite de tolerabilidad establecido en cada uno de los iones mayoritarios analizados. Si se consideran los límites establecidos por la O.M.S., menos estrictos, algunas de las aguas del extremo más occidental del acuífero son potables.

Uso agrícola

Aunque son varias las clasificaciones existentes para conocer la aptitud de un agua para riego, hemos utilizado la propuesta por la United States Salinity Laboratory Staff, por ser una de las más completas de las actualmente vigentes (Catalán, 1981). Según se deduce de la figura 15, las aguas subterráneas extraídas en la unidad pertenecen a las categorías siguientes con los porcentajes que se expresan: C₃-S₁ (42%), C₄-S₁ (10%), C₄-S₂ (32%), C₄-S₃ (15%). Se desprende que más de la mitad de los puntos muestreados registran valores muy altos de salinidad. No son aguas apropiadas para el riego en condiciones ordinarias, por lo que requieren —además de cultivos tolerantes al respecto— sue-

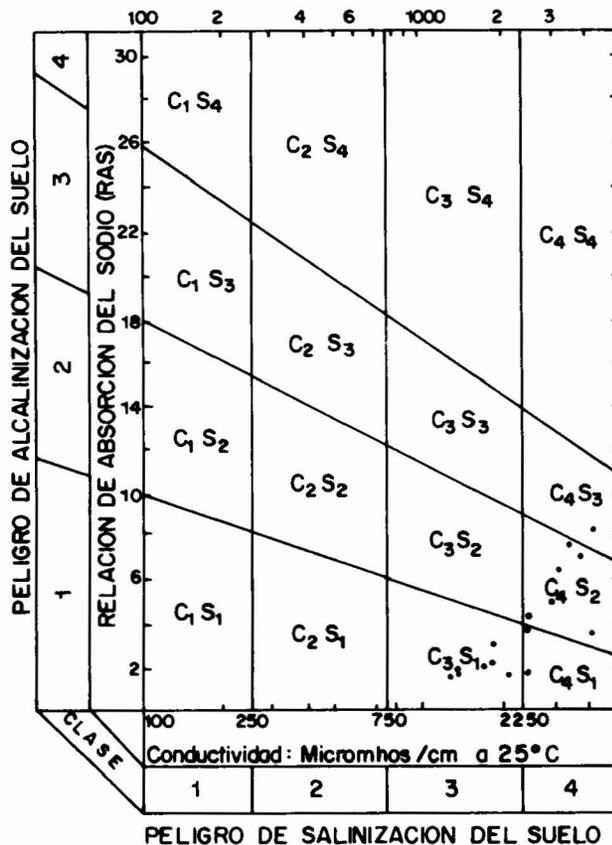


Fig. 15.—Aptitud de las aguas para el riesgo (normas U.S.S.L.S.).

los de elevada permeabilidad en los que se aplique el agua en exceso, para que se propicie un lavado suficiente de los mismos. Además, el 80% de tales aguas presentan contenidos medios y altos en sodio intercambiable, lo que plantea riesgos de alcalinización de los suelos sobre los que se emplean —sobre todo si presentan elevada capacidad de intercambio catiónico— si no se aplican medidas específicas correctoras, tales como lavados intensos, adición de materia orgánica y calcio, etcétera.

Comportamiento hidrogeológico de las albuferas

Las albuferas —áreas de interés ecológico por constituir puntos de hibernada de diferentes especies de aves migratorias procedentes del norte de Europa— se sitúan en el sector más oriental del delta. Su extensión es reducida, pues las tres, en conjunto, no superan un kilómetro cuadrado de superficie. Se originan a partir de los materiales costeros que los vientos del tercer cuadrante arrastran, formando barras o cordones litorales. Estos cordones son claramente visibles en las fotos a escala aproximada 1:18.000 del vuelo realizado por TASA. Están compuestos por materiales

gravosos poligénicos groseros sin consolidar. La más pequeña de las tres, de nombre Albufera Chica, se originó a partir de las inundaciones que se produjeron en el sector en el año 1973; la enorme cantidad de aportes que arrastró el río a su antigua desembocadura fue remodelada posteriormente hasta formar esta pequeña laguna que parece tener en la actualidad un claro proceso de subsidencia.

Para conocer las posibles fuentes de alimentación más o menos puntuales de las mismas se realizó, en enero de 1985, una campaña de medida de valores de conductividad en las albuferas, en perfiles previamente establecidos. El muestreo se realizó con conductímetro Crison. Tomamos también medidas de temperatura del agua en puntos de los perfiles convenientemente fijados.

Los resultados del muestreo de conductividad en la albufera Honda fueron los más expresivos. A partir del mismo se hizo un plano de isoconductividades (fig. 16) en el que se observa una disminución de la conductividad desde el centro hacia los bordes. La disminución en el borde occidental se debe, con toda probabilidad, a la alimentación de la albufera por parte del río. La disminución en el otro extremo puede tener su origen en una ligera alimentación por parte de las calcarenitas de Dalías, que están en comunicación con las del delta.

Funcionamiento del sistema

El delta del río Adra constituye un acuífero cuyos límites están bastante bien definidos. La principal fuente de recarga está constituida por las entradas superficiales procedentes de dicho río. De menor envergadura son las entradas subterráneas del mismo, el retorno de regadíos y la alimentación procedente de la infiltración del agua de lluvia. También cabe considerar un posible aporte lateral de las calcarenitas miopliocenas del sector, aunque de magnitud muy reducida. La descarga se efectúa principalmente mediante bombeos en las captaciones, también por alimentación oculta al mar a través del borde costero

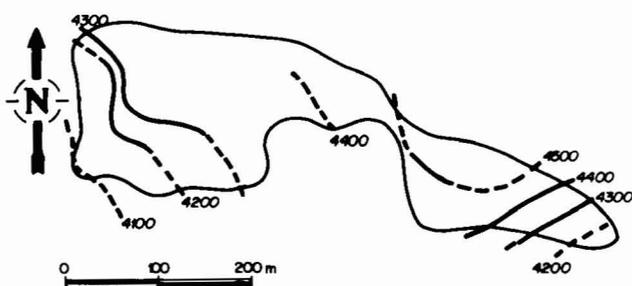


Fig. 16.—Variación espacial de la conductividad en la albufera Honda (26-7-1985).

y por evapotranspiración directa del agua del acuífero a la atmósfera.

Recarga

Entradas superficiales procedentes del río

La infiltración procedente de las aguas superficiales del río Adra es la suma de las infiltraciones del caudal de su cauce y del caudal de las cinco derivaciones que del mismo se forman para regadío, todos ellos sin revestir.

El río Adra debe la mayor parte de su caudal al aporte de los manantiales de Marbella, emergencias naturales que se producen por descarga del macizo calizo-dolomítico de la ventana de Turón (Manto de Lújar). El caudal medio de dichos manantiales es de 700 l/s (Carrasco *et al.*, 1981). A su paso por el delta, el río adquiere un régimen discontinuo debido a las pérdidas de caudal que le suponen las acequias citadas. El cauce tan sólo lleva agua durante los meses de invierno y ésta raramente llega al mar, pues se infiltra en su totalidad a lo largo de su recorrido por el acuífero.

La ausencia de una estación de aforo a la entrada del río en el delta ha impedido recopilar datos que hubieran sido de interés para conocer más profundamente el funcionamiento del sistema, tales como el retardo con que se manifiestan las lluvias en el caudal del río, tiempo de concentración, variaciones estacionales del caudal, etcétera. Respecto a las derivaciones, los escasos datos de aforo existentes ponen de manifiesto fluctuaciones de caudal notorios de los meses húmedos a los secos. De esta fuente de recarga habría que deducir la que se evapora directamente del cauce del río y derivaciones, aunque esta pérdida debe ser mínima, porque las superficies implicadas son muy pequeñas. En el río, además, los meses que hay escorrentía son precisamente los de invierno, en los que la evapotranspiración es menor.

Entradas subterráneas procedentes del río

El río, subterráneamente, es también una fuente de alimentación de agua al acuífero. El trazado de las líneas isopiezas y la caracterización hidroquímica expuesta reflejan que existen dos direcciones preferentes de flujo subterráneo: una coincide a grandes rasgos con el cauce actual del río y, la otra, de mayor envergadura, que coincide con la antigua posición del río antes de que su cauce fuera desviado. Del estudio hidrogeoquímico se deducía que la alimentación que, procedente del río, llega subterráneamente al tercio oriental del acuífero, es mínima.

Retorno de regadíos

Los regadíos existentes en la unidad se efectúan superficialmente a partir de las derivaciones de riego del río Adra y subterráneamente a partir de las aguas bombeadas de la misma unidad. En esta última el retorno de regadíos no es una entrada sino una «no salida», ya que las aguas no tienen su origen en fuente ajena. El caudal que se deriva de las tomas es igual al volumen utilizado por las plantas (C_p), infiltración (I_r) y vertido al mar (V_m); se puede tener de antemano un orden de magnitud de vertido al mar planteando las dotaciones de consumo de regadíos.

En el sector de Adra ha predominado el cultivo enarenado al aire libre, pues posee una temperatura muy favorable para su implantación. Sin embargo, en los últimos años ha habido una recesión de dicho cultivo, en favor del realizado en invernadero con riego por goteo, dada la mayor productividad y ahorro de agua en este último sistema. Desde 1974 a 1984 la superficie de enarenados se ha mantenido prácticamente invariable, ya que las nuevas parcelas puestas en cultivo para este tipo de explotación tienen una superficie equivalente a las transformadas de enarenado a invernadero (Soler *et al.*, 1981).

En el año 1985 la superficie cubierta por cultivos a suelo desnudo en el delta era de 110 ha, los enarenados suponían un total de 800 ha y los invernaderos 450 ha (datos de la Cámara Agraria de Adra); actualmente, la superficie útil cultivada debe ser ligeramente superior, puesto que se tiende a cubrir de invernaderos toda la superficie que por sus condiciones topográficas es accesible a ello y no hay ningún tipo de control que lo impida, como es el caso de Campo de Dalías.

Los principales cultivos intensivos que se producen en el área se indican en la tabla 2.

La dotación anual que necesitan estos cultivos, en condiciones bajo plástico, con sistema de riego por goteo, según los datos procedentes de la Finca Experimental Las Palmerillas (1984), resulta ser de 6.700 m³/ha/año. A esta cifra debe deducirse normalmente de 75 a 100 mm, que es la aportación estimada por las lluvias estacionales que penetran por el plástico perforado de los invernaderos. Las necesidades de riego de las 450 ha cultivadas en invernadero, con riego por goteo, en el delta son, según esta dotación, de 3 hm³/año.

Tabla 2.—Principales cultivos intensivos en la vega de Adra

Cultivos otoño	% superficie	Cultivos verano	% superficie
Tomate ciclo corto .	30	Judía verde	30
Judía verde	20	Melón	20
Pimiento italiano . . .	30	Sandía	50
Calabacín	20	—	—

En el resto de la vega se riega principalmente «por surco», aunque en algunos enarenados se utilizan sistemas diferentes, como el goteo o el riego «a manta»; en este caso hemos estimado una dotación para el cultivo al aire libre del orden de 8.400 m³/ha/año. Con este dato las necesidades anuales para el cultivo al aire libre resulta ser de 7,6 hm³. Por otro lado, aunque carecemos de medidas precisas al respecto, estimamos que el 25% del agua aplicada en regadío se infiltra en el acuífero.

Aportación pluviométrica

La aportación pluviométrica consiste en la porción de lluvia útil procedente de la pluviosidad que se infiltra al acuífero. Se considera también dentro de esta aportación el agua que penetra en el acuífero procedente de la escorrentía generada por la precipitación en los bordes del mismo.

Hemos estimado la infiltración procedente de la precipitación como porcentaje por exceso de agua para el balance hídrico obtenido por la fórmula de Thornthwaite a nivel mensual: si el exceso de agua calculado mes a mes queda comprendido entre 0 y 30 mm, la escorrentía se considera nula, del 10% para un exceso entre 30-50 mm, el 20% para un exceso comprendido entre 50 y 100 mm, el 30% para excesos entre 100 y 140 mm y el 40% cuando el exceso es mayor de 150 mm. Los resultados obtenidos alcanzan 118 mm en el año 1976-77 (36,3%) y 150 mm en 1977-78 (30,0%). Dicho método ya fue utilizado para la simulación matemática del acuífero de la plana de Gandía-Denia (Bodega *et al.*, 1976), obteniendo resultados considerados como bastante satisfactorios.

En cuanto a la infiltración procedente de las aguas de escorrentía superficial, en los sectores impermeables vertientes al delta, la escorrentía total se realiza de forma exclusiva como escorrentía superficial. En estas áreas metapelíticas hay una fuerte alteración de las capas más superficiales de roca y se genera un suelo arcilloso de alta capacidad de retención específica por las plantas. Para estos suelos hemos considerado una reserva de agua útil de 100 mm. Toda la lluvia útil producida con esta reserva se ha asignado a escorrentía superficial, que se convierte en infiltración al llegar al delta.

Hemos calculado la lluvia útil para un año hidrológico medio, por correlación de los datos de pluviosidad y lluvia útil del período 73/74-79/80. La recta de regresión obtenida tiene por ecuación $y = -19,2 + 0,63x$, con un coeficiente de correlación de 0,74. El valor de lluvia útil para un año medio resulta ser de 67 mm.

El agua de lluvia que escurre por los materiales calizos poco karstificados superficialmente debe ser

también, aunque en pequeña proporción, una fuente de alimentación del acuífero. Al no existir datos concretos sobre escurrentía en calizas, por considerarse que generalmente toda la lluvia útil se convierte en infiltración en el karst, hemos considerado un coeficiente de escurrentía comprendido entre el 10 y el 20% de la lluvia útil, que suponemos se convierte en infiltración al llegar al delta. La infiltración resulta tener un valor entre 7 y 15 mm/año, que, para una cuenca vertiente de 18 km², supone unos aportes prácticamente despreciables.

Alimentación lateral oculta

El único aporte que el acuífero puede recibir por alimentación lateral es el de las calcarenitas mio y pliocenas que afloran en el límite suroriental del sistema y que comunican este acuífero con el de Dalías, de mayor importancia. Este hecho parece deducirse del mapa de isoconductividad efectuado en la Albufera Honda. En cualquier caso, por la propia morfología de este plano, los gradientes deben ser mínimos, lo que unido a la reducida franja a través de la que se produce la alimentación (400 m de longitud), es de esperar que suponga unos aportes mínimos.

Descarga

Bombeos

La salida de mayor importancia en el delta la constituyen los bombeos, que satisfacen parte de la demanda urbana y agrícola del sector. Una parte del agua bombeada en el delta se utiliza para satisfacer las necesidades agrícolas de sectores adyacentes; así, por ejemplo, anualmente se extraen 2 hm³, que se derivan al sector de Guainos. El Canal de San Fernando, alimentado por el pozo 3001 y, eventualmente, 3026 y 3025, transporta 4,3 hm³/año, de los que 3,2 son conducidos al Campo de Dalías y el resto se utiliza en el delta. Aunque predominan las captaciones con escaso caudal extraído, algunas llegan a bombear más de 1 hm³/año (número 3021 con 1,8 hm³/año).

Salidas ocultas al mar y evapotranspiración directa

Se han puesto de manifiesto a partir del estudio de la superficie piezométrica del acuífero. Están constituidas por los aportes ocultos del acuífero al mar, a través del borde costero, que tiene una longitud total de 10,6 km. Se comprueba que los aportes al mar son máximos en la antigua desembocadura del río y mínimos en el tercio oriental del acuífero. En lo refe-

rente al gradiente hidráulico se podría dividir el sistema en sectores, uno con longitud de 2,8 km para el delta antiguo, que en las proximidades de la costa presenta un gradiente hidráulico del 0,5; otro para el sector terminal del delta que se ha originado al desviar y encauzar el río, con 2,5 km de longitud y gradiente hidráulico del 0,2%; por último, otro para el resto del delta, con 5,3 km de longitud y un gradiente hidráulico del 0,1%. La transmisividad estimada para estos sectores está comprendida entre 100 y 400 m²/día, teniendo en cuenta la mayor abundancia de finos a lo largo de la franja litoral.

Las salidas por evapotranspiración directa de las aguas del acuífero afectan a aquellos sectores en que el nivel freático está a menos de 2 m de profundidad. Existe del orden de 1 km², superficie a la que hay que añadir la ocupada por las marismas y albuferas, 2,4 km².

Balance hídrico

Entradas

El balance hídrico, en tanto que expresión cuantificada de los elementos considerados en el funcionamiento, hay que referirlo a un período determinado; en este caso vamos a considerar un año hidrológico, lo más parecido posible al año medio.

Como ya indicamos, dentro de las entradas hay que contabilizar las procedentes de la infiltración en el cauce del río Adra y de todas sus derivaciones dentro del acuífero, las entradas laterales ocultas a través de los aluviones del río, el retorno de los regadíos realizados con aguas ajenas al sistema, la infiltración de la lluvia caída sobre el acuífero o sobre los bordes impermeables, pero que se incorpora posteriormente al flujo subterráneo y las entradas laterales ocultas a través de su único borde permeable.

El cálculo del volumen de agua que supone la infiltración de las aguas procedentes del río y sus derivaciones se podría hacer por diferencia entre las entradas de agua del río en el delta y las salidas al mar, una vez deducido para las acequias, el uso consuntivo de las plantas sobre las que se aplica el agua. La ausencia de estaciones de aforos sobre el río Adra a su entrada en el delta y a su salida al mar no permite conocer con precisión los caudales de entrada y salida de este río. En cuanto a los caudales derivados en las cinco acequias, según los datos de aforos realizados en cuatro períodos diferentes, resulta un caudal de 18 hm³/año.

Las entradas ocultas a través del lecho permeable del río Adra y de su continuidad lateral han sido estimadas en 7 hm³/año, a partir de los datos de transmisividad deducidos de las captaciones existentes al sur de la Alquería, los gradientes hidráulicos medios y las secciones filtrantes.

La alimentación procedente de la infiltración de parte del agua superficial aplicada en regadío y de las pérdidas en las acequias sin revestir, se estima en 4,5 hm³/año de los 18 que circularían por ellas. Las entradas procedentes de la infiltración directa del agua de lluvia y de la escorrentía procedente de los bordes metapelíticos se puede estimar en 4 hm³/año como valor medio. Por último, la alimentación lateral a través del borde oriental debe ser escasa dado que el flujo es prácticamente paralelo al límite y bajos los gradientes; no obstante consideramos que puede existir un caudal medio de 0,5 hm³/año.

Así pues, las entradas medias anuales del sistema alcanzan la cifra de 16 hm³, sin contar la aportación del río, por infiltración en su lecho, a lo largo de su recorrido dentro del delta.

Salidas

La descarga mayor más fácilmente cuantificable, mediante encuesta directa y posterior sustracción del retorno al acuífero, corresponde a los bombeos netos, que alcanzan 12,5 hm³, según datos obtenidos en 1985. Siguen en importancia las salidas ocultas al mar, estimadas por sectores de transmisividad y gradiente hidráulico diferentes, y que se aproximan a 7 hm³/año. Las pérdidas por evaporación directa en las áreas de escasa profundidad del nivel piezométrico, albuferas y marismas, se han considerado equivalentes a la evapotranspiración potencial, por lo que alcanzarían unos 3 hm³/año.

Resultan, pues, unas salidas de 22,5 hm³/año como media, por lo que si no existe variación de la reserva, las entradas deben ser del mismo orden de magnitud, de donde deducimos que el río podría alimentar al acuífero, en un año medio, en algo más de 6 hm³/año.

De todo ello se deduce que este sistema es excedentario en un año de tipo medio y susceptible, por tanto, de una mayor y mejor regulación. No obstante, la entrada en funcionamiento del embalse de Benínar, situado aguas arriba del delta, va a afectar a la hidrogeología del área y, de manera más concreta, a la alimentación a partir del lecho del río, reduciéndola sensiblemente. Será preciso comenzar a tomar una serie de datos tendentes a determinar y cuantificar la influencia precisa que tal realización antrópica tendrá sobre el delta del Adra.

Referencias

Aldaya, F. *et al.* (1983). Memoria y Hoja Geológica de Adra (21-44). 1:50.000 MAGNA. IGME. Madrid.
 Alméjida, C. (1984). Investigación hidrogeológica de la Cuenca de la Rambla de Padul (término municipal de Albuñol, Granada). Tesis Licen. Univ. Granada. Inédita, 285 págs.
 Anónimo (1984). *Necesidades de riego en invernadero bajo plástico en la costa de Almería*. Finca Experimental «Las Palmerillas». 14 págs. C.R.P.A.
 Benavente, J.; Pulido Bosch, A. y Morales, G. (1987). Princi-

pales rasgos hidrogeoquímicos del delta del río Adra. *Hidrogeol. y Rec. Hidrául.*, 11, 131-140. Mallorca.
 Bodega, M. A.; Pulido Bosch, A. y Trac, N. Q. (1976). Modelo matemático del acuífero detrítico de la Plana de Gandía-Denia. *Hidrogeol. y Rec. Hidrául.*, 2, 25-29, Valencia.
 Capel Molina, J. J. (1977). *El clima de la provincia de Almería*. Dep. Geogr. Univ. Granada (Colegio Univ. de Almería).
 Carrasco, D.; Carrasco, F.; Ruiz-Tagle, M. y Thauvin, J. P. (1981). *Características hidrogeológicas del acuífero calizodolomítico de la unidad Gádor-Lújar en el sector de Berja Benívar (Almería) y su relación con las fuentes de Marbella*. Simposio sobre el Agua en Andalucía, 249-268. Granada.
 Carrasco, F. (1986). *Contribución al conocimiento de la cuenca alta del río Guadalhorce. El medio físico. Hidrogeoquímica*. Tesis Doct. (inéd.). Univ. Granada, 287 págs.
 Carulla, N. (1981). *Variaciones interanuales de pluviometría y tiempos de residencia: dos variables a considerar en la gestión de aguas*. I Simp. Agua Andalucía, 269-278. Granada.
 Castillo, A. (1985). *Estudio hidroquímico del acuífero de la vega de Granada*. Tesis Doct. Univ. Granada. Serv. Public. Univ. Granada, 653 págs.
 Catalán, J. (1981). *Química del agua*. Ed. Blume, Madrid, 423 págs.
 Degallier, R. (1969). *Interprétation des variations naturelles du niveau des nappes*. *Bull. du BRGM* (2.^a serie). Sección III, número 2, 7-56.
 Dixon, W. J. (edit.) (1975). *Biomedical Computers Programs (BMDP)*. Univ. Calif. Press, 791 págs. Berkeley.
 Fourniguet, J. (1975). *Néotectonique et Quaternaire marin sur le littoral de la Sierra Nevada (Andalousie, Espagne)*. Tesis Univ. Orleáns, 234 págs.
 García, A.; Ramos, J. I. y Giráldez, J. V. (1986). Posibilidades de la agricultura de secano en el sureste de la provincia de Almería. *II Siaga*, 1, 125-134.
 Ibáñez, V. y Sanchis, E. (1983). Utilización de modelos estadísticos multivariantes en Hidrogeoquímica. *Hidrogeol. y Rec. Hidrául.*, 9, 263-275, Madrid.
 IGME (1982). Síntesis de datos hidrogeológicos y de calidad de aguas subterráneas destinado al plan hidrogeológico nacional. Cuenca sur, sector oriental. Tomo 2. Ind. Com. En. Rec. Nat.
 Martínez Gil, F. J.; Pablo, F. y Sánchez, J. A. (1986). *Estudio hidrogeoquímico de los acuíferos carbonatados del Macizo de Guara (prov. de Huesca)*. Jornadas sobre el Karst en Euskadi. San Sebastián, 253-274.
 Moral, S.; Pulido Bosch, A. y Valenzuela, P. (1984). Aplicación de los análisis «cluster» al estudio de características físico-químicas de aguas subterráneas. *Estudios. Geol.*, 40, 193-200.
 Morell, I. (1985). *Caracterización hidroquímica de la intrusión marina en la plana de Oropesa-Torreblanca (prov. Castellón)*. Tesis Doct. Univ. Granada, 253 (inéd.).
 Padilla, A. y Pulido Bosch, A. (1986). El programa «Evadía» para estimación automática de la lluvia útil a nivel diario. *II SIAGA*, 2, 631-636. Granada.
 Pulido Bosch, A.; Benavente Herrera, J.; Castillo Martín, A. y Padilla Benítez, A. (1986). *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Río Adra*. Dpto. Hidrog. Univ. Granada (memoria inédita).
 Soler, M.; García, A. y Alonso, P. (1981). *Los cultivos forzados en Almería. Inventario Agronómico y caracterización productiva de los cultivos forzados*. Minist. Agricult., Pesca y Alim. Dirección Gen. Prod. Agraria. Madrid, 162 págs.

Recibido el 8 de abril de 1988
 Aceptado el 1 de diciembre de 1988.