

CONSIDERACIONES SOBRE LA HIDROQUIMICA DEL ACUIFERO DE LA CUBETA DE PULPI (ALMERIA)

J. C. Cerón García * y A. Pulido Bosch *

RESUMEN

Se estudian las principales características fisicoquímicas de las aguas subterráneas del acuífero de acuerdo con los datos obtenidos en diferentes puntos. Las aguas tienen un contenido salino elevado, con valores de conductividad comprendidos entre 2.500 y 4.500 micromhos/cm y son de facies sulfatada cálcico-sódica-magnésica. Se complementa el estudio con el análisis cluster y factorial de las variables y de las observaciones. El origen de los iones encontrados está relacionado con la presencia de rocas evaporíticas y silicatadas, con la existencia de posibles mineralizaciones y con la contaminación urbana y agrícola. El uso de las aguas del acuífero en regadío puede producir salinización y alcalinización del suelo. Las principales fuentes de contaminación son los residuos urbanos, líquidos y sólidos, y los producidos por la ganadería estabulada, y los fertilizantes usados en la agricultura; se encuentran concentraciones de ion nitrato superiores a 50 mg/l y de ion amonio mayores de 0,5 mg/l. La temperatura y composición química de las aguas indican que existe una anomalía térmica relacionada con la actividad tectónica del área.

Palabras clave: *acuífero detrítico, hidrogeoquímica, análisis cluster y factorial, contaminación.*

ABSTRACT

From data obtained in different points of the cubeta de Pulpí aquifer, the principal physicochemical characteristics of ground waters are studied. The waters have a high salinity, with of conductivity between 2,500 and 4,500 micromhos/cm, and are calcium-sodium-magnesium sulphate water types. The study is complemented with cluster and factorial analysis of variables and observations. The origin of ions have a direct relationship with the evaporitic and siliceous rocks, possible mineralisations, and urban and agricultural pollution. The use of aquifer waters for irrigation causes the salinity and alkalinity of the soil. The liquid and solid wastes from urban and cattle raising activities, and the fertilizers of the agriculture are the principal contamination sources; the nitrate concentration is higher than 50 mg/l and the amonium concentration is above 0,5 mg/l. The temperature and the chemical composition of the water shows a thermic anomaly directly related with the tectonic activity in the area.

Key words: *detrital aquifer, hydrogeochemistry, cluster and factor analysis, contamination.*

Introducción

El área estudiada se encuentra comprendida entre el extremo suroccidental de la provincia de Murcia, dentro del término municipal de Lorca, y el extremo nororiental de la provincia de Almería, en el término municipal de Pulpí (fig. 1). El sector estudiado

tiene una superficie aproximada de 35 km² y su cuenca vertiente alrededor de 75 km².

Desde el punto de vista de la utilización del agua, durante los últimos quince años se desarrolló una importante agricultura de invierno, extratemprana, y de «primor», siendo ambas de un gran valor económico. Esto ocasionó un aumento tan elevado de la de-

* G.Í. Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Departamento de Geodinámica e IAGM. Universidad de Granada-CSIC. Facultad de Ciencias. 18071 Granada.

glomerados, arenas, limos e intercalaciones de arcillas arenosas. Los sedimentos que rellenan la cubeta corresponden a depósitos de piedemonte, abanicos aluviales, llanuras de inundación y facies de canal. Al Sur, la cubeta de Pulpí está conectada con la cuenca neógena de Vera (Veeken, 1983; Montenat *et al.*, 1988).

Comportamiento hidrogeológico de los materiales

Las unidades pertenecientes al Complejo Nevado-Filábride están compuestas fundamentalmente por cuarcitas, micasquistas y mármoles. Los dos primeros materiales pueden incluirse dentro de las denominadas «rocas cristalinas» caracterizadas de una manera general por un bajo valor de la permeabilidad global y por la discontinuidad del medio. La roca sana tiene muy escaso poder de almacenamiento y transmisión del agua lo que la aproxima al comportamiento de acuífugo; a efectos prácticos se la podría considerar «impermeable». La existencia de discontinuidades, tales como fracturas, fisuras, esquistosidades, etc., y la acción sobre ellas de los procesos de alteración, traen consigo la aparición de huecos que confieren a estos materiales un cierto poder acuífero.

Los mármoles, con un comportamiento acuífero, se pueden encontrar en la serie formando intercalaciones de escasa potencia; a techo, donde sí tienen un cierto desarrollo, pueden almacenar volúmenes importantes de agua. Es conveniente recordar la existencia de niveles de yesos en la base de los mármoles que, si bien tienen un comportamiento acuífero, al no ocupar una extensión importante, su capacidad de almacenamiento es reducida, pero lo suficiente para afectar a las características fisicoquímicas de las aguas, como se indicará más adelante.

La Unidad Sierra de Enmedio, perteneciente a las Unidades Intermedias, presenta en el área escaso desarrollo, formada fundamentalmente por pizarras, filitas, diabasas, metabasitas y cuarcitas; tiene un comportamiento acuífugo, salvo la excepción señalada anteriormente para los tramos cuarcíticos.

Los materiales de Messiniense-Plioceno inferior, constituidos por una alternancia de margas y areniscas margosas, tienen en general un funcionamiento hidrogeológico de acuífugo, pudiendo comportarse como acuífugo, con variaciones de permeabilidad en la vertical y en la horizontal, en aquellos tramos donde la fracción arenosa es mayor o existen intercalaciones de niveles conglomeráticos. Las rocas volcánicas, formadas por riolacitas, están fracturadas y por tanto pueden almacenar agua, aunque sin llegar a constituir un volumen importante, dado que ocupan una superficie pequeña.

El conjunto Plioceno-Pleistoceno, constituido por

conglomerados de matriz arenosa o limosa, aparece formando canales anastomosados y abanicos aluviales; tiene un comportamiento hidrogeológico de acuífero, con variaciones de permeabilidad según predomine un tipo u otro de matriz. Los materiales del Cuaternario, formados por conglomerados, arenas y limos e intercalaciones de arcillas arenosas, tienen un funcionamiento hidrogeológico de acuífero. Estos dos últimos conjuntos forman el relleno principal de la cubeta y constituyen el acuífero propiamente dicho.

En lo que se refiere a la naturaleza del fondo del acuífero o sustrato, éste se supone impermeable y formado por materiales metamórficos paleozoicos y arenas margosas y margas del Terciario. El espesor del relleno pliocuaternario varía entre 30 y 100 m, y su litología (fig. 3), de acuerdo con los valores de resistividad, corresponde fundamentalmente a gravas con arenas y arenas con gravas, y, en menor medida, arcillas y limos (Cerón y Pulido Bosch, 1991).

Así pues, la cubeta de Pulpí constituye un acuífero detrítico libre; los materiales de borde son de naturaleza impermeable, integrados por esquistos y filitas del Paleozoico del Complejo Nevado Filábride y Unidades Intermedias al Noroeste, Oeste y Este, y margas miocenas al Suroeste y Sur, a excepción del afloramiento de mármoles de la Cuerda de las Palomas (extremo Sureste) perteneciente al Complejo Nevado Filábride y que puede estar conectado con el acuífero.

Funcionamiento general

El volumen de materiales detríticos, según datos del IGME (1980), es de aproximadamente 1.700 hm³. La mayor potencia de éstos, en la parte Norte, se encuentra al Este de La Cuesta de la Escarihuela y de La Campana, con más de 120 m en ambos sectores; en la zona Sur, corresponde a su parte meridional, y dentro de ésta en el Sureste, próximo al contacto con materiales paleozoicos, donde se superan los 150 m.

La recarga de este acuífero proviene de la infiltración de las precipitaciones, de la escorrentía superficial de las numerosas ramblas que vierten hacia la cubeta cuando llueve, de los posibles aportes subterráneos, no evaluados, de los mármoles situados en su borde Noroeste y extremo Sureste, y por último, en menor grado, de las aguas residuales urbanas. El retorno de riego se considera despreciable porque el sistema principal de riego es por goteo, de alta eficiencia.

Los bombeos se realizan de forma intermitente y de acuerdo con las necesidades agrícolas y «económicas» del momento; además, éstos no se realizan de

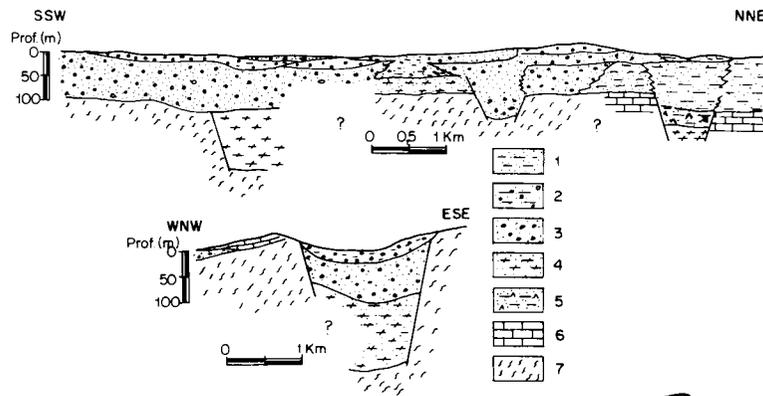


Fig. 3.—Perfiles geológicos del área estudiada (modificado de Cerón y Pulido Bosch, 1991). 1, 2 y 3: relleno pliocuaternario (1: arcillas y limos esencialmente; 2: arcillas, limos, arenas y gravas; 3: gravas y arenas); 4 y 5: Terciario (4: arenas margosas y margas; 5: margas con yesos); 6 y 7: sustrato (6: mármoles; 7: filitas y esquistos).

forma homogénea en el espacio y en el tiempo; así, se pueden encontrar áreas en donde la explotación es nula debido a que los sondeos han sido abandonados por tener caudales muy pobres o salinidad excesiva (área central) y sectores en donde la calidad todavía permite su uso, si bien no directamente, sí mezclada con agua del trasvase Tajo-Segura y del acuífero del Alto Guadalentín (áreas Norte, Sur y Sureste del acuífero). En la tabla 1 se esquematizan las posibles entradas y salidas del acuífero.

Según datos recientes de piezometría parece ser que el descenso continuado del nivel piezométrico, del orden de 1,5 a 2 m/año y más acusado en el extremo Sureste (Castillo *et al.*, 1989), está estabilizado posiblemente producto de las lluvias caídas en los dos últimos períodos hidrológicos y de la disminución del volumen de explotación de los pocos sondeos que todavía están en funcionamiento, a la vez que se registra la llegada de un volumen mayor de agua del trasvase Tajo-Segura y del acuífero del Alto Guadalentín.

Las salidas se producen para cubrir la demanda agrícola y urbana (realizada esta última por el punto

Tabla 1.—Esquematización de los elementos del balance del acuífero ($\text{hm}^3/\text{año}$)

Concepto	Entradas	Salidas
Infiltración directa	0,4 - 0,7	
Infiltración superficial.....	0,4 - 0,8	
Infilt. aguas residuales.....	0,1 - 0,2	
Bombeos netos		2,5 - 3,0 *
Totales	0,9 - 1,7	2,5 - 3,0

* Castillo *et al.* (1989).

acuífero n.º 9 para el abastecimiento ocasional del municipio de Pulpí, y de forma casi continua por el punto acuífero n.º 10 para el abastecimiento del núcleo costero de Terreros).

Resulta difícil hacer una estimación del volumen extraído por no disponer de todos los datos necesarios; por su parte, el IGME (1980) da un valor comprendido entre 3,5 y 4 $\text{hm}^3/\text{año}$; Castillo *et al.* (1989) estiman la explotación comprendida entre el 175 y 230 % de los recursos, lo que supone un volumen de entre 2,5 y 3,0 $\text{hm}^3/\text{año}$; estos porcentajes parecen no estar de acuerdo con datos recientes de algunos niveles piezométricos dado que muestran una tendencia a la estabilización; de ser ciertas las cifras citadas, los niveles mantendrían un descenso continuado.

Características fisicoquímicas de las aguas

Aspectos generales

Los parámetros fisicoquímicos determinados a partir de las muestras obtenidas en septiembre de 1989 (13) y enero de 1990 (10) se muestran en las tablas 2 y 3; no se pudieron tomar más muestras en ambas campañas debido a la imposibilidad de acceder a un número mayor de sondeos en funcionamiento; no obstante, se ha muestreado con una densidad de una muestra cada 2,6-3,5 km^2 , que consideramos suficiente como para poder representar las características del acuífero estudiado.

En relación con los valores de conductividad (tablas 2 y 3), éstos varían entre 2.310 y 9.900 micromhos/cm en el muestreo de septiembre de 1989, y entre 1.640 y 9.000 micromhos/cm en el muestreo de

Tabla 2.—Resultados de las variables fisicoquímicas analizadas (septiembre, 1989)

N.º Ref.	Temp.	pH	Cond.	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	NH ₄ ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	K ⁺
1	28,5	6,85	4.160	664	1.080	510	10	0,0	0,5	442	211	300	7,6
2	28,7	7,22	2.750	383	709	360	9	0,0	0,6	350	122	156	8,6
3	27,3	6,53	4.370	557	1.694	663	14	0,0	0,5	426	301	380	7,7
4	28,4	7,98	2.550	412	626	360	6	0,0	0,7	330	124	156	8,0
5	24,4	7,07	3.140	549	921	541	0	0,0	0,5	400	160	225	9,1
6	26,3	6,55	4.580	667	1.675	641	3	0,0	1,6	564	309	324	16,0
7	26,1	6,88	3.490	379	1.129	480	5	0,0	0,6	400	190	224	13,8
8	22,5	7,32	4.330	724	1.253	221	46	0,0	4,8	540	185	248	19,3
9	23,9	7,01	4.860	902	1.662	343	10	0,0	0,6	725	282	268	18,3
10	29,2	6,69	2.310	121	927	316	6	0,1	1,0	150	100	276	6,1
11	27,2	6,81	4.020	319	1.279	621	5	0,0	0,8	400	153	348	22,0
12	21,2	7,09	9.900	1.302	4.469	305	69	0,0	0,7	1.350	709	439	22,1
13	23,2	6,29	4.250	200	1.693	801	8	0,0	1,0	300	260	338	6,6

Temperatura en °C, conductividad en micromhos/cm (25°C) e iones en mg/l. El número de referencia coincide con el número de punto acuífero de la figura 2.

Tabla 3.—Resultados de las variables fisicoquímicas analizadas (enero, 1990)

N.º Ref.	Temp.	pH	Cond.	Co ²⁺	Cr ⁶⁺	Cu ²⁺	Mn ²⁺	Ni ²⁺	Cd ²⁺	Pb ²⁺	Zn ²⁺	Fe ²⁺	Al ³⁺	F ⁻	Li ⁺	B ⁻
2	28,9	6,95	2.860	< 1	2,5	3,7	16,5	< 1	1,4	< 10	25,7	490	10,8	250	0,53	0,587
3	27,3	6,32	4.420	< 1	17,5	14,9	36,2	< 1	2,4	26	16,7	8.700	3,9	243	0,60	0,405
4	27,6	7,04	2.800	< 1	< 1,0	9,2	64,5	< 1	1,7	< 10	13,8	3.320	8,4	243	0,42	0,339
5	27,9	7,22	3.090	< 1	< 1,0	78,9	16,8	< 1	< 1,0	< 10	12,7	3.300	24,3	273	0,58	0,389
6	24,9	6,40	5.270	< 1	< 1,0	21,3	40,1	< 1	2,6	< 10	26,7	9.000	9,3	212	1,18	0,923
7	24,1	6,76	3.611	< 1	< 1,0	5,0	48,3	< 1	4,1	< 10	22,1	4.520	3,4	273	0,88	0,697
9	23,8	6,96	3.611	< 1	3,3	1,9	19,3	< 1	3,2	28	17,3	7.840	10,2	259	1,08	1,000
10	28,2	6,76	1.639	< 1	< 1,0	2,3	6,8	< 1	2,4	< 10	25,1	425	30,2	794	0,47	0,185
11	27,2	6,73	4.100	< 1	< 1,0	2,0	7,7	< 1	2,3	< 10	73,1	642	67,6	371	1,36	1,397
12	27,0	7,75	9.380	< 1	4,4	2,0	4,4	< 1	< 1,0	< 10	20,1	611	44,2	454	1,30	0,108

Variables en µg/l, excepto Li y B (mg/l); límite de detección 1 µg/l, excepto el Pb (10 µg/l). Temperatura en °C, conductividad en micromhos/cm (25°C). El número de referencia coincide con el número de punto acuífero de la figura 2.

enero de 1990 (los máximos se localizaron en el extremo Suroeste de la cubeta, en el punto n.º 12); el descenso observado sería producto de una mayor dilución de las aguas por efecto de las lluvias de otoño (octubre y noviembre). Las temperaturas medias están comprendidas entre 21,2 y 29,2° C para el primer muestreo, y entre 23,8 y 28,9° C para el segundo. Los valores de pH registrados variaron entre 6 y 8.

Considerando los iones mayoritarios (tabla 2), la concentración de sulfatos está comprendida entre 625 y 4.470 mg/l y presenta una distribución espacial similar a la de la conductividad. El contenido en cloruros varía entre 120 y 1.300 mg/l y su distribución espacial es muy parecida a las de la conductividad y sulfatos. Los bicarbonatos tienen una concentración comprendida entre 220 y 800 mg/l; los valores máximos se encuentran en puntos situados muy próximos a afloramientos de mármoles (n.ºs 1 y 13). Los con-

tenidos en calcio fluctúan entre 150 y 440 mg/l. El magnesio tiene una concentración comprendida entre 100 y 710 mg/l y presenta una distribución espacial semejante a la de los sulfatos. La concentración de sodio varía entre 150 y 1.350 mg/l y su distribución espacial es bastante parecida a las de la conductividad y cloruros. Los contenidos en potasio están comprendidos entre 6 y 22 mg/l. Finalmente, el nitrato tiene una concentración comprendida entre 0 y 70 mg/l; los valores máximos se encuentran en el extremo suroeste, en los puntos n.ºs 8 (45 mg/l) y 12 (70 mg/l).

En relación con los iones minoritarios y trazas (tabla 3), el amonio está comprendido entre 0,5 y 5 mg/l; la concentración de hierro varía entre 425 y 9.000 µg/l; el manganeso tiene un contenido comprendido entre 5 y 64,5 µg/l; la concentración de cobre varía entre 2 y 79 µg/l, teniendo el valor máximo

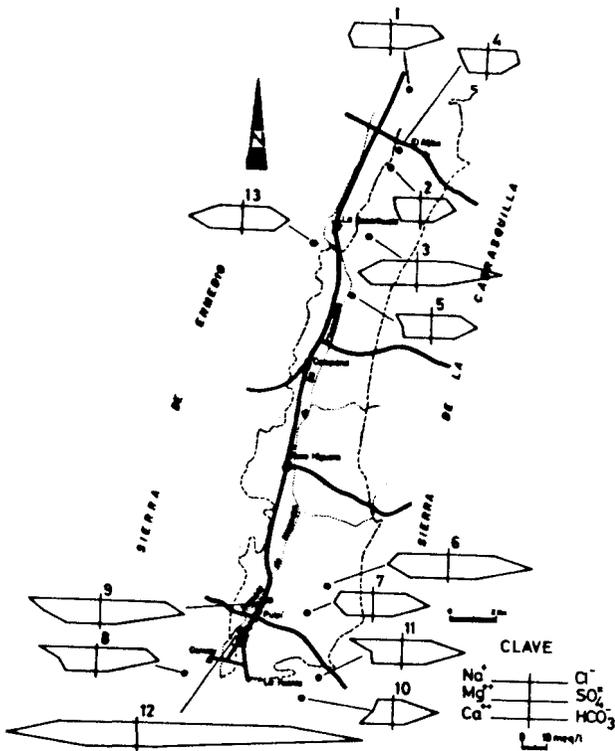


Fig. 4.—Diagrama de Stiff (modificado) con las concentraciones iónicas registradas en la cubeta de Pulpí (septiembre, 1989).

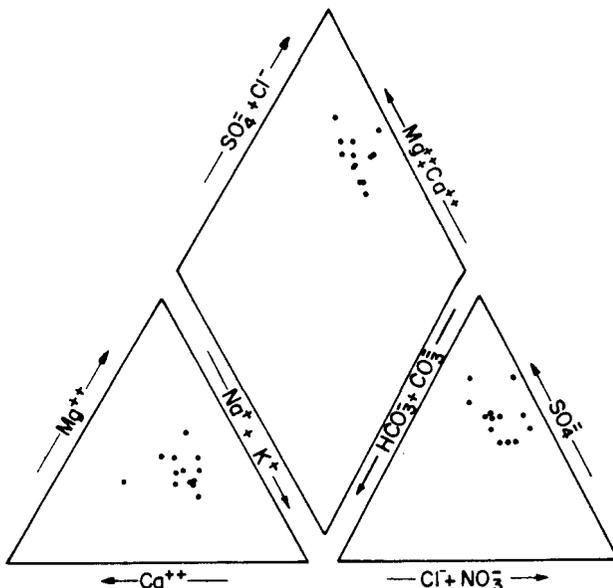


Fig. 5.—Diagrama de Piper con las proporciones iónicas registradas en la cubeta de Pulpí (septiembre, 1989).

en el punto n.º 5; el cinc tiene un contenido comprendido entre 13 y 73 $\mu\text{g/l}$, teniendo el punto n.º 11 el valor máximo; el contenido de aluminio varía entre 3 y 68 $\mu\text{g/l}$, estando el valor máximo en el punto n.º 11; el flúor tiene una concentración comprendida entre 212 y 794 $\mu\text{g/l}$; la concentración de boro varía entre 0,1 y 1,4 $\mu\text{g/l}$; por último, el litio tiene un contenido comprendido entre 0,4 y 1,5 $\mu\text{g/l}$.

Para poder apreciar los principales rasgos hidroquímicos de las muestras analizadas y sus variaciones espaciales, se han representado los resultados de los análisis del muestreo de septiembre de 1989 en diagramas de Stiff (modificado, fig. 4) y triangular (fig. 5).

En la figura 5, y en relación con los aniones, casi todos los puntos se encuentran dentro del campo de la facies sulfatada (muestras 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 y 13) y el resto (muestras 1, 2 y 4) se sitúan en el límite de las facies sulfatada y mixta. Si se consideran los cationes, todos los puntos se encuentran dentro de las facies mixta, cálcico-sódica, magnésica, excepto la muestra 13 que se sitúa dentro del dominio de la facies magnésica.

Relaciones entre las características fisicoquímicas: Análisis multivariante

Para estudiar las relaciones entre las diferentes variables fisicoquímicas de las muestras analizadas se han utilizado los análisis «cluster» y factorial. Aunque el número de muestras utilizado no es elevado, debido a las dificultades anteriormente comentadas, la aplicación de ambos análisis no carece de validez, toda vez que lo que se pretende es llegar a determinar las relaciones entre los parámetros analizados y su contribución relativa a la explicación de la variación hidrogeoquímica en el área, sin tratar en ningún caso de hacer inferencia estadística sobre la población; es bien sabido que para esto último, el muestreo tendría que haber sido aleatorio, insesgado y con un número de observaciones muy superior al aquí utilizado.

Los análisis cluster no tienen aplicaciones inferenciales en ninguno de los tratamientos que llevamos a cabo, por lo que la limitación del escaso número de muestras no afecta en nada. Algo diferente puede ser el caso del análisis factorial cuya aplicación precisaría siempre de un número mayor de observaciones que de variables. En este caso va a existir obligatoriamente combinaciones lineales de las variables (en el muestreo de enero de 1990 son dieciséis las variables —de ellas, cuatro no alcanzan una precisión que permitan su utilización— y nueve las observaciones) al ser el espacio vectorial de dimensión nueve. No obstante, se puede concluir de manera similar al aná-

lisis cluster: este análisis factorial quedaría invalidado para hacer inferencias sobre la población, aunque su aplicación no plantea ningún problema al momento de discutir y comparar las muestras estudiadas.

Análisis cluster

a) «Cluster» de variables

En la figura 6 se puede ver el dendrograma que relaciona las variables fisicoquímicas; en la 6a (septiembre de 1989) se distinguen dos agrupaciones principales: la primera está formada por las variables temperatura, nitrito y bicarbonato, y la segunda constituida por el resto de las variables. La inclusión del ion bicarbonatado dentro del primer grupo puede responder a un cierto origen común; en efecto, en aguas con contaminación orgánica, procedente de la actividad agrícola y urbana, los procesos de descomposición orgánica generan CO_2 (que origina una mayor agresividad del agua y por consiguiente un aumento en el contenido de bicarbonatos), nitratos y nitritos (Pulido Bosch *et al.*, 1980; Custodio, 1986; Adam De Villiers, 1988; Paranthoine, 1988; Sanchís, 1990). Los bajos coeficientes de correlación obtenidos entre el pH y el resto de las variables (inferior a 0,50) indicarían que las variaciones del pH, dentro de los rangos encontrados, no afecta a la concentración de los demás iones.

El segundo grupo de variables sería el responsable de la mineralización de las aguas. Dentro de éste, la conductividad, y los iones sulfato, magnesio, cloruro y sodio se agrupan con un coeficiente de correlación superior a 0,89; a ellos se une el ion nitrato con un coeficiente de correlación bastante alto (mayor de 0,78); luego los iones calcio y potasio con coeficientes de correlación bajos (0,61 para el primero, y 0,50 para el segundo); y finalmente, el ion amonio con un coeficiente de correlación muy bajo (0,20). El origen de todos estos iones estaría relacionado con la existencia de materiales evaporíticos miocenos en el área y procesos de contaminación urbana y agrícola, y los normales de adquisición de sales en un acuífero de este tipo.

En la figura 6b (enero de 1990) se puede ver la relación existente entre las otras variables fisicoquímicas; en ella se distinguen tres agrupaciones principales: la primera está formada por las variables temperaturas, fluoruro y pH; la segunda la componen las variables conductividad, litio, boro, cinc y aluminio; y por último, la tercera está constituida por las variables hierro, manganeso y cobre. Salvo las relaciones existentes entre el litio y la conductividad ($r = 0,7$) y el aluminio y el cinc ($r = 0,75$), el resto alcanza valores muy poco significativos, indicativos de la escasa correlación entre los valores que se han medido.

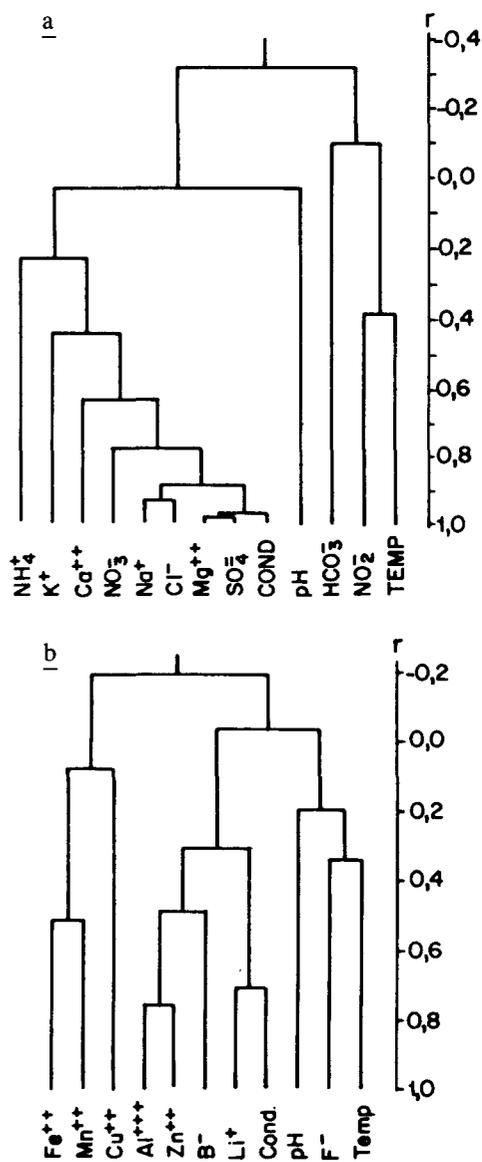


Fig. 6.—Dendrograma de las variables fisicoquímicas (correlación); a: septiembre de 1989 y b: enero de 1990.

b) «Cluster» de observaciones

La figura 7 muestra el dendrograma de las observaciones; en la 7a (septiembre de 1989) queda claro que existe una alta correlación entre todas las observaciones y, además, con un margen de variación mínimo (entre 0,98 y 1 para el valor de r). En ella se identifica un primer grupo (r superior a 0,99) formado por la 1, 2, 4, 5, 3, 6, 7, 11, 8 y 9; a éste se le une la 12 con un coeficiente de correlación más bajo (próximo a 0,985) debido a que tiene una salinidad muy superior. Finalmente, separadas de este grupo

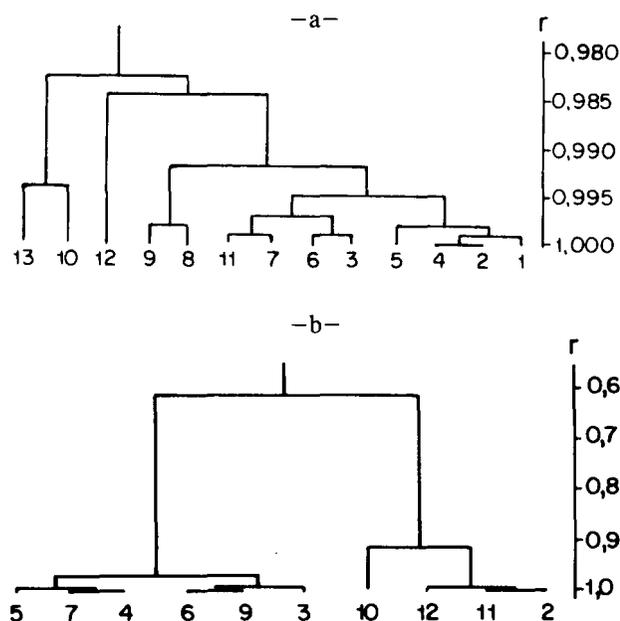


Fig. 7.—Dendrograma de las observaciones (correlación); a: septiembre de 1989 y b: enero de 1990.

principal, están las observaciones 10 y 13 con un coeficiente de correlación más bajo (inferior a 0,983), que puede deberse al contenido más bajo en cloruros, sodio, potasio (menor de 200, 300 y 7 mg/l, respectivamente).

En la figura 7b (enero de 1990) se pueden diferenciar claramente dos agrupaciones principales: la primera formada por la 2, 11, 12 y 10 (r superior a 0,90) y la segunda constituida por la 3, 9, 6, 4, 7 y 5 (r superior a 0,95). La primera familia reuniría a las muestras con bajos contenidos en hierro y manganeso (inferiores a 650 y 16,5 $\mu\text{g/l}$ respectivamente), mientras que la segunda estaría formada por aquéllas en donde los contenidos en estos iones son superiores (mayores de 3.000 y 16,8 $\mu\text{g/l}$). Desde el punto de vista geográfico, y considerando el primer grupo, todas han sido tomadas próximas a los bordes, las tres primeras cerca de afloramientos de mármoles y la última sobre materiales evaporíticos; para el segundo grupo, se observa que han sido tomadas lejos de los límites de la cubeta, excepto la muestra 4 que se encuentra en el límite Noroeste y próxima a un afloramiento de mármoles.

Análisis factorial

a) Estudio de las variables

En la figura 8 se representan los resultados del análisis factorial de las variables; en la 8a (septiembre

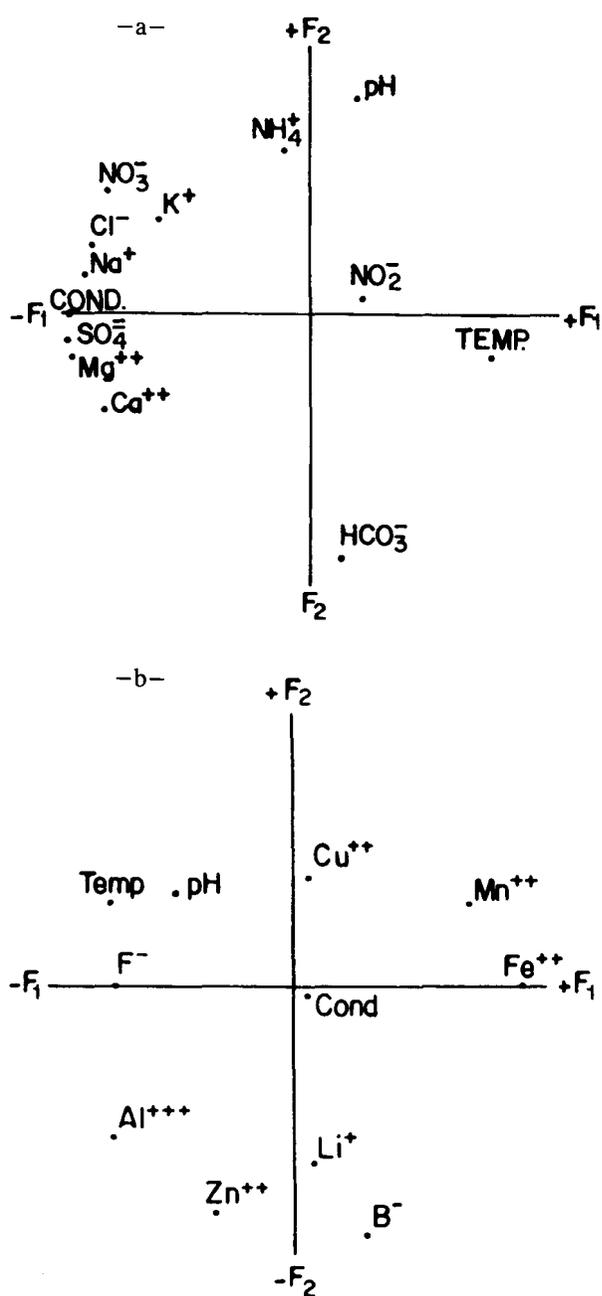


Fig. 8.—Representación de las variables fisicoquímicas en el plano factorial F_1 - F_2 ; a: septiembre de 1989 y b: enero de 1990.

de 1989), la distribución de las variables muestra que el 72,4 % de la variabilidad total espacial explicada se hace en términos de salinidad total (F_1 , 54,2 %) e indicios de contaminación (F_2 , 18,2 %). El primer factor está formado por las variables conductividad, sodio, cloruro, magnesio, sulfato, calcio y nitrato; por tanto, este factor está asociado fundamentalmente con los procesos naturales que determinan la con-

ductividad eléctrica de las aguas subterráneas en el área, como por ejemplo la disolución de materiales evaporíticos presentes en el sector y, en menor medida, los procesos de contaminación antrópicos (urbana y agrícola). Esta agrupación ya fue puesta de manifiesto anteriormente en el análisis «cluster» de las variables.

El segundo factor está formado principalmente por las variables pH y bicarbonatos, y en menor medida por la variable amonio. Este factor señala la independencia de éstas en los procesos de enriquecimiento salino del agua y refleja las relaciones existentes entre ellas, ya señaladas en el epígrafe del análisis «cluster» de variables.

En la figura 8b (enero de 1990), la distribución de las variables muestra que casi el 77 % de la variabilidad total espacial explicada se hace en términos de posibles mineralizaciones (F_1 , 33 %) y disolución de rocas silicatadas (F_2 , 27 %) y salinidad total (F_3 , 17 %). El primer factor está formado por las variables flúor, aluminio, hierro y manganeso; este factor parece asociado con la existencia de posibles mineralizaciones, las cuales existen en áreas próximas a la de estudio.

El segundo factor está compuesto principalmente por las variables cinc y boro y, en menor medida, litio; éste parece estar relacionado con los procesos de disolución de rocas silicatadas existentes en el área. Finalmente, en el tercer factor, la variable de mayor peso es la conductividad por lo que éste estaría condicionado por los principales procesos de enriquecimiento salino del agua (disolución de rocas evaporíticas principalmente).

b) Estudio de las observaciones

La figura 9 refleja la situación de las observaciones en el plano factorial F_1 - F_2 ; en la 9a (septiembre de 1989) éstas aparecen agrupadas y situadas en una posición equidistante respecto de los ejes F_1 y F_2 , debido posiblemente a la alta correlación que existe entre ellas.

La figura 9b (enero de 1990) muestra, en el plano factorial F_1 - F_2 , cómo las observaciones forman dos grupos, los mismos que fueron puestos de manifiesto anteriormente en el análisis cluster; en este caso, teniendo en cuenta los elementos minoritarios y traza, sí existe la posibilidad de diferenciar dos familias de aguas.

En el primer factor se agrupan aquellas observaciones con altos contenidos en hierro, manganeso y flúor, mientras que en el segundo se reúnen aquellas en donde estos iones tienen concentraciones más bajas. La distribución de las variables muestra que casi el 99 % de la variabilidad total espacial explicada se hace en términos de circulación del agua por áreas

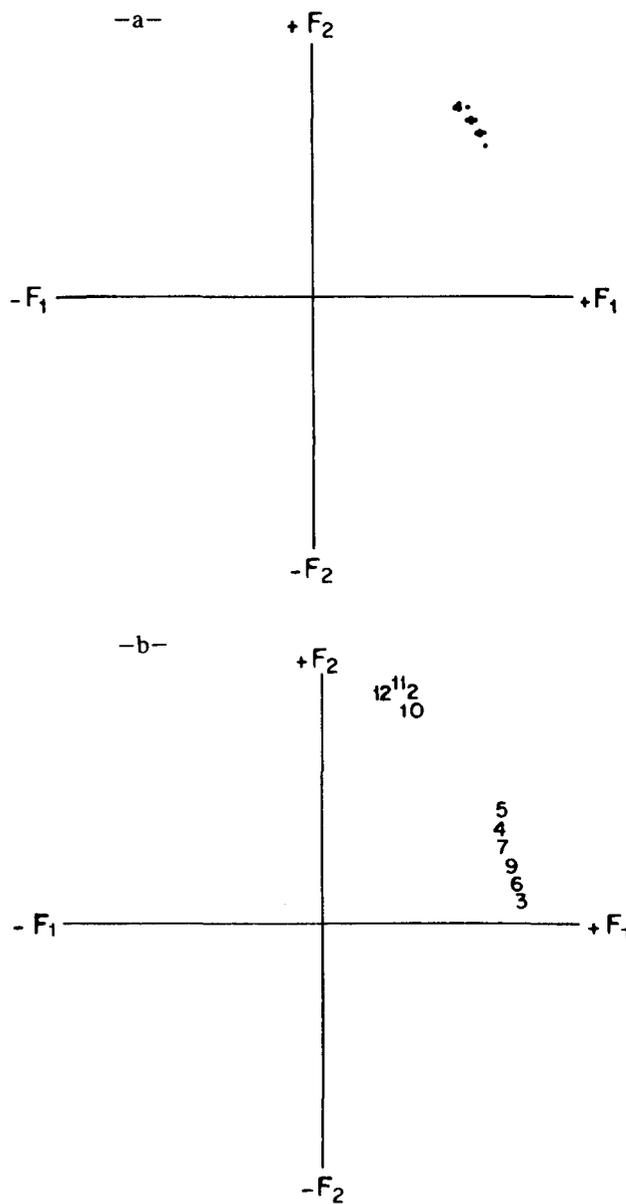


Fig. 9.—Representación de las observaciones en el plano factorial F_1 - F_2 ; a: septiembre de 1989 y b: enero de 1990.

de posibles mineralizaciones (F_1 , 81 %) y otras por donde éstas parecen no existir (F_2 , 18 %).

Calidad y contaminación de las aguas

En la figura 10 se ha representado la situación de los puntos muestreados de acuerdo con los criterios de calidad, según la Reglamentación española («BOE», 1990). En ella se puede ver que todos los

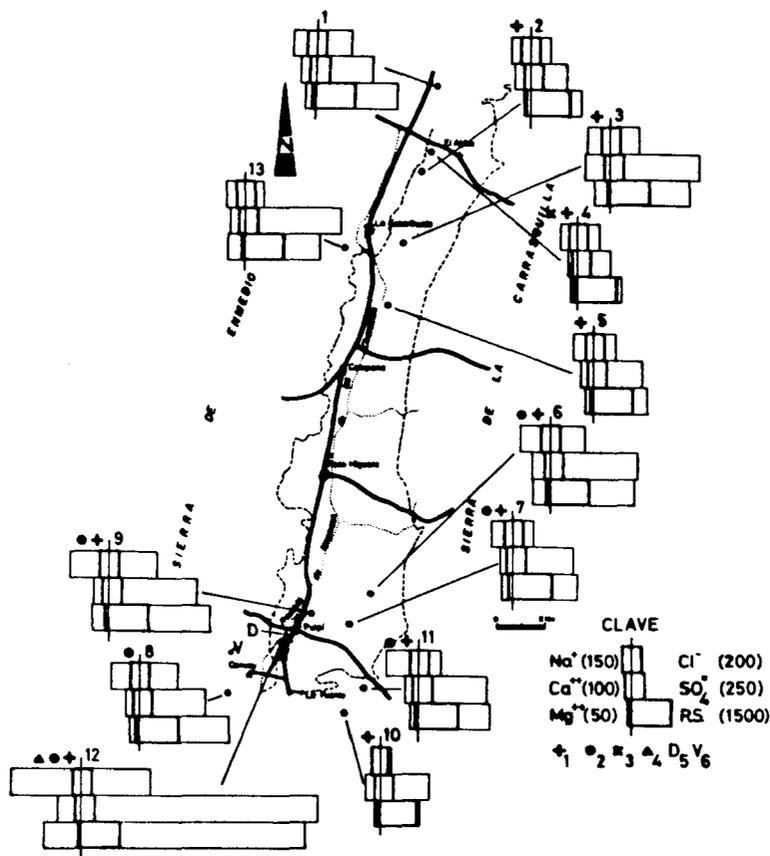


Fig. 10.—Mapa de diagramas de concentración máxima admisible (en mg/l) de las aguas de la cubeta de Pulpí, excepto para el Ca^{++} y el Cl^- cuya concentración es la recomendada, de acuerdo con la Reglamentación española (BOE, 1990). 1: sobrepasa el límite de Fe^{2+} ; 2: sobrepasa el límite de K^+ ; 3: sobrepasa el límite de Mn^{2+} ; 4: sobrepasa el límite de NO_3^- ; 5: depuradora; 6: vertedero.

puntos superan la concentración máxima admisible en los parámetros sodio, magnesio, sulfato y residuo seco, y la recomendada en los parámetros calcio y cloruro. En cuanto a la concentración del ion nitrato, sólo el punto n.º 12 sobrepasa el máximo establecido por la legislación vigente (50 mg/l). De acuerdo con esto todos los puntos muestreados, o casi todos, superan los valores índice de potabilidad del agua.

En relación con la calidad del agua para uso agrícola, se trata de aguas cuya utilización implica un riesgo alto o muy alto de salinización del suelo, por lo que es aconsejable su uso en cultivos seleccionados (muy tolerantes a las sales), en suelos permeables, bien drenados y con exceso de agua para producir un buen lavado. En relación con el riesgo de alcalinización, casi todos los puntos, excepto los n.ºs 2 y 13, presentan altos contenidos en ion sodio (siendo máximo en el punto n.º 9) por lo que es necesario que exista un buen lavado del suelo y, donde

se alcancen valores altos, el uso de medidas correctoras (adición de materia orgánica) para no alcanzar el límite de toxicidad del sodio intercambiable.

El contenido de boro en todos los puntos muestreados, excepto los n.ºs 10 y 12, sobrepasa el límite de concentración recomendable para cultivos de 0,3 mg/l (Custodio y Díaz, 1983), aunque sólo se supera el valor máximo para cultivos sensibles de 0,75 mg/l (Catalán, 1981) en los puntos n.ºs 9 y 11.

En la cubeta de Pulpí existe una gran concentración de las actividades antrópicas, la cual diversifica ampliamente las posibles fuentes o focos de contaminación. Como fuentes puntuales se encuentran los residuos líquidos urbanos, originados por el vertido de las aguas residuales de la depuradora y de las fosas sépticas, pozos negros u otras variantes al propio acuífero, pudiendo producir una contaminación orgánica y biológica.

Este hecho se refleja claramente en la existencia

de ion amonio en todas las muestras analizadas y en las cuales se obtienen valores de concentración superiores al máximo admisible por la legislación (0,5 mg/l). Le siguen los residuos sólidos urbanos (alrededor de 1.600 Tm/año) los cuales se acumulan en el aluvial de la Rambla del Pinar (situada 2 km al Oeste de la población de Pulpi) y la ganadería estabulada que genera residuos líquidos (purines, vertidos directamente sin ningún tratamiento previo sobre el acuífero) y materia orgánica sólida (acumulada en lugares inadecuados para ser utilizada posteriormente como abono).

Como fuente extensiva de contaminación se tiene a la agricultura. La intensa actividad agrícola desarrollada en este área utiliza una amplia gama de productos que contienen una gran variedad de agentes contaminantes. Los efectos contaminantes sobre las aguas por el uso de fertilizantes, naturales o artificiales, se ven disminuidos en aquellos sectores donde se emplea el riego por goteo.

La acción depuradora de la franja no saturada en relación con la posible eliminación de algunos constituyentes de estos efluentes (Lind, 1977; MOPU, 1988; Porras, 1989) resulta poco efectiva en el sector estudiado puesto que el vertido se realiza directamente sobre materiales permeables del acuífero, y en algunos casos, en lugares donde el nivel piezométrico se encuentra relativamente cerca de la superficie.

Conclusiones

Las muestras analizadas presentan un contenido salino elevado, con valores de conductividad comprendidos entre 2.500 y 4.500 micromhos/cm (excepto el punto n.º 12, con más de 9.900 micromhos/cm); éstas son de facies sulfatada cálcico-sódica-magnésica. Datos recientes de piezometría parecen indicar que el descenso continuado del nivel piezométrico está estabilizado, posiblemente debido a las lluvias caídas en los dos últimos períodos hidrológicos y a la disminución del volumen de explotación de los pocos sondeos que todavía están en funcionamiento, a la vez que se registra la llegada de un volumen mayor de agua del trasvase Tajo-Segura y del acuífero del Alto Guadalentín.

El análisis cluster de las diferentes variables analizadas en las muestras, reúne a los iones sulfato, magnesio, cloruro, sodio, potasio y nitrato, los cuales contribuyen principalmente a la mineralización de las aguas; también agrupa, por una parte a los iones litio, boro, cinc y aluminio, y por otra a los iones hierro, manganeso y cobre. El origen de todos ellos estaría relacionado con la presencia de rocas evaporíticas y silicatadas, con la existencia de posibles mi-

neralizaciones y con procesos de contaminación urbana y agrícola. El análisis cluster de las observaciones agrupa a éstas de acuerdo con la concentración en cloruros, sodio y potasio (inferiores a 200, 300 y 7 mg/l respectivamente) y con el contenido en hierro (menores a 600 µg/l y mayores de 3.000 µg/l) y manganeso (inferiores a 16,5 µg/l y superiores a 16,8 µg/l).

En el análisis factorial de las variables de septiembre de 1989, el primer factor está asociado con los procesos que determinan la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas del área (disolución de materiales evaporíticos y, en menor medida, contaminación urbana y agrícola) y el segundo factor indica las relaciones que existen entre el pH, bicarbonatos y amonio. Considerando el análisis factorial de las variables de enero de 1980, el primer factor está relacionado con la existencia de posibles mineralizaciones de hierro y manganeso; el segundo factor parece estar asociado a procesos de disolución de rocas silicatadas; por último, el tercer factor se encuentra condicionado por los principales procesos de enriquecimiento salino del agua (disolución de rocas evaporíticas principalmente).

El análisis factorial de las observaciones, no discrimina a éstas si se consideran los iones mayoritarios; en cambio teniendo en cuenta los elementos minoritarios y traza, diferencia dos grupos de familias de aguas de acuerdo con el contenido, mayor o menor, en hierro, manganeso y flúor. El primer factor parece asociado a la circulación del agua por áreas de posibles mineralizaciones y el segundo factor a sectores donde éstas posiblemente no existan.

La utilización de estas aguas en regadío puede producir salinización y alcalinización del suelo si no se toman medidas de prevención adecuadas; además éstas presentan concentraciones de boro superiores a la recomendable para cultivos sensibles.

Las principales fuentes de contaminación en el acuífero son los residuos líquidos y sólidos urbanos, los residuos líquidos y sólidos generados por la ganadería estabulada y, por último, los fertilizantes utilizados en la agricultura. Se encuentran concentraciones elevadas de ion nitrato en el extremo sureste; la concentración de ion amonio es superior a la admitida por la legislación vigente (0,5 mg/l).

Finalmente las temperaturas medidas en campo y la composición química de las aguas muestreadas (existe un enriquecimiento en determinados oligoelementos, al igual que sucede en aguas termales de otras áreas de las Cordilleras Béticas) indican que hay una anomalía térmica, la cual parece estar en relación con la actividad tectónica que afecta al área estudiada.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. L. García-Rosell, investigador principal del proyecto «Dinámica del geosistema de la cuenca del río Almanzora (Almería). Cuantificación de los procesos de desertización» (LUCDEME), quien hizo posible la financiación necesaria para los análisis de elementos minoritarios y trazas incluidos en este trabajo, y a la DGICYT (proyecto PB87-0245). Nuestro reconocimiento al Profesor Dr. M. R. Llamas por su revisión crítica del original inicialmente enviado.

Referencias

- Adam de Villiers, C. (1988). *Contribution à l'étude des nitrates dans l'aquifère alluvial de la Basse Durance*. Mémoire, Université d'Avignon, 94 págs.
- Castillo, E.; Lupiani, E.; Hidalgo, J.; González, A. y Aranda, J. A. (1989). Sobreexplotación de acuíferos en la cuenca del Almanzora (Almería). *La sobreexplotación de acuíferos*. Almería, 35-41.
- Catalán, J. (1981). *Química del agua*. Madrid, 423 págs.
- Cerón, J. C. y Pulido Bosch, A. (1991). Consideraciones sobre la geometría de un sector del acuífero de la Cubeta de Pulpí (Almería). *III Simp. sobre el agua en Andalucía*. Córdoba, tomo I, 325-337.
- Custodio, E. y Díaz, E. (1983). Calidad del agua subterránea. En: *Hidrogeología Subterránea*. Barcelona, 2.347 págs.
- Custodio, E. (1986). Hidroquímica del Karst. *Jorn. Karst en Euskadi*. San Sebastián, tomo II, 131-175.
- IGME (1980). Informe hidrogeológico de la Cubeta de Pulpí, n.º 30.540 (Almería).
- Lind, A. (1977). Nitrate reduction in the subsoil. *Progress in water technology*, 8, 119-128.
- Montenat, C.; Ott d'Estevou; Larouzière, F. D. y Bedu, P. (1988). Originalité géodynamique des bassins néogènes du domaine bétique oriental (Espagne). *Notes et Mémoires-Total, Compagnie Française des Pétroles*, 21, 11-49.
- MOPU (1988). El subsuelo como agente depurador de vertidos líquidos contaminantes. *Servicio Geológico*, 49, 71 págs.
- Paranthine, L. (1988). *Bilan de l'azote et estimation du temps de réponse sur 2 bassins versants en région de socle (Plouvorn, Massif Armoricaín)*. Thèse 3.º cycle. Université du Montpellier, 218 págs.
- Porras, J. (1989). Incidencia de los vertidos de residuos tóxicos y peligrosos en la calidad de las aguas subterráneas. *Tomo homenaje a Jorge Porras Martín*, Asociación Española de Hidrología Subterránea, Madrid, 13-35.
- Pulido Bosch, A.; García Gómez, J. y Benavente, J. (1980). Las fuentes potenciales de contaminación en los acuíferos de Salobreña (Granada). *Tecniterrae*, 33: 31-38.
- Sanchís, E. (1990). *Estudio de la contaminación por nitratos de las aguas subterráneas de la provincia de Valencia. Origen, Balance y evolución espacial y temporal*. Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, 323 págs.
- Veeken, P. (1983). Stratigraphy of the Neogene-quaternary Pulpi basin, provinces Murcia and Almería (SE Spain). *Geologie en Mijnbouw*, 62, 255-265.

Recibido el 7 de octubre de 1991
Aceptado el 4 de marzo de 1992