

VARIACIONES HIDROGEOQUÍMICAS DE PERIODICIDAD ANUAL EN SURGENCIAS KÁRSTICAS. EJEMPLO DEL MANANTIAL DE LA YEDRA (MÁLAGA)

A.Pulido-Bosch (1) y J.C.Cerón-García (1)

(1) G.I. Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Dpto. de Geodinámica e IAGM. Universidad de Granada-CSIC. Facultad de Ciencias. 18071 Granada.

RESUMEN

A partir de 44 análisis químicos de las aguas del manantial de La Yedra, correspondientes al período 1984 principios de 1988, y sobre la base de la aplicación de los análisis cluster y factorial, se ponen de manifiesto las notables variaciones estacionales existentes; dicho manantial está ligado al acuífero kárstico de la Sierra de Las Cabras. Las variaciones del quimismo de las aguas se relacionan con la fluctuación de la precipitación y los diferentes tiempos de tránsito del agua en el acuífero.

Durante el estiaje las aguas tienen una mineralización muy alta y las precipitaciones ocasionales caídas no originan variaciones importantes en ellas. Las primeras lluvias provocan la salida de aguas con más tiempo de residencia en el acuífero, al tiempo que pueden producir el arrastre de sales de la superficie del terreno procedentes de la evaporación de precipitaciones estivales que no llegan a infiltrarse en el acuífero, registrándose los valores máximos de conductividad. Con el inicio del período de mayor pluviosidad la mineralización desciende rápidamente. Al disminuir las lluvias la mineralización empieza a aumentar paulatinamente hasta alcanzar los valores más frecuentes del año hidrológico.

Palabras clave: Hidrogeoquímica, hidrodinámica, acuífero kárstico, periodicidad, análisis cluster y factorial.

ABSTRACT

From 44 chemical analysis of La Yedra spring's waters, collected between 1984 and the beginning of 1988, and after applications of cluster and factorial analysis, the remarkable seasonal variations are showed; this spring is related to the karstic aquifer of the Sierra de Las Cabras. The chemical variations of the water have a direct relationship with the rainfall fluctuations and the different circulation times of the water in the aquifer.

At the low water, the waters have a very high mineralization and the occurrence of accidentally rainfall don't causes important variations in them. The first rains causes the emergence of the waters with more permanence time in the aquifer, and at the same time they can produce the drag of salts from the surface originated by the summer rain evaporation that don't infiltrate in the aquifer, recording the highest quantity of conductivity. The mineralization comes down quickly with the start of the major rainship time. When the rain diminishes, the mineralization begins to increase until it reaches the more frequent values in the hydrological year.

Key words: Hydrogeochemistry, hydrodynamic, karstic aquifer, periodicity, cluster and factorial analysis.

Pulido-Bosch, A. y Cerón García, J.C. (1991): Variaciones hidrogeoquímicas de periodicidad anual en surgencias kársticas. Ejemplo del manantial de La Yedra (Málaga). *Rev. Soc. Geol. España*, 4: 51-59.

Pulido-Bosch, A. and Cerón-García, J.C. (1991): Hydrogeochemistry variations of annual time in karstic springs. Example of La Yedra spring (Málaga). *Rev. Soc. Geol. España*, 4: 51-59.

1. INTRODUCCIÓN

La variación espacial y temporal de las características físico-químicas de las aguas de un acuífero es un hecho sobradamente conocido, tanto para el caso de los acuíferos detríticos como para los kársticos (Pulido-Bosch, 1975, 1979). En el caso de los acuíferos kársticos su estudio constituye una metodología de aproxi-

mación al conocimiento hidrodinámico del sistema (Bakalowicz, 1979; Barón *et al.*, 1984; Mudry y Blavoux, 1986; Antigüedad, 1986, 1988, 1989; Aguayo *et al.*, 1988), debido esencialmente a que las variaciones de concentración son susceptibles de interpretarse según diversos modelos de flujo.

Las variaciones citadas pueden tener una componente aleatoria y otras de periodicidad muy variable,

normalmente asociadas a las variaciones de la función de entrada (la lluvia, esencialmente). Las variaciones de largo periodo -únicas deducibles cuando las muestras se encuentran muy separadas en el tiempo- deben guardar una estrecha relación con el funcionamiento del sistema, aunque en muchos casos se ha tratado de asociar con unidades acuíferas de gran extensión (Moral *et al.*, 1984) en donde el volumen acumulado constituiría un elemento amortiguador de variaciones de corto período.

En el estudio que presentamos la periodicidad anual es manifiesta, aunque la superficie ocupada por el sistema es más bien reducida. Se trata del manantial de La Yedra, situado a una cota de 760 m s.n.m., el cual drena parte del acuífero de la Sierra de Las Cabras. Dicho acuífero ocupa una superficie aproximada de 28 km² (figura 1) y se extiende desde el puerto de La Boca del Asno (extremo NW), por la carretera de Antequera al Torcal, hasta el puerto de La Fresneda por el Este, pasando por el puerto de Las Pedrizas. Destacan como cotas más altas los vértices Cabras (1284 m), Lastonares (1263 m) y Cerro Prieto (1083 m).

El clima del área es de tipo mediterráneo. La precipitación media es de 626 mm (estación de la Yedra) y la temperatura media anual es del orden de 16,5 °C (16,2 °C en la estación de Archidona y 16,9 °C en la de Cortijo de Robledo).

2. EL MARCO GEOLÓGICO

Desde el punto de vista geológico el área se sitúa en el dominio Subbético, Conjunto de Las Cabras (Barba *et al.*, 1979). Dentro de los materiales preorogénicos aflorantes se pueden diferenciar, de techo a muro (Peyre, 1974; Barba *et al.*, 1979) siete unidades diferentes (figura 2). La "Unidad de Colmenar" (Mioceno inferior), que aflora al Sur del área estudiada, está formada por materiales margosos con areniscas que local-

mente engloban klipmes sedimentarios. La "Unidad de Rosario-Saucedo" (Jurásico-Oligoceno) comprende dos unidades diferentes, aunque su descripción puede hacerse de forma conjunta. Está constituida por margas rojas con brechas carbonatadas intercaladas y flysch de margas rojas y areniscas; aflora en la mitad nororiental del área.

El "Conjunto de Las Cabras" (Trías superior-Jurásico) comprende una serie estratigráfica que incluye varios tramos de los que sólo dos afloran en este área. Se trata de dolomías y calizas oolíticas hacia el techo. Los materiales dolomíticos, con una potencia aproximada de 700 m, se encuentran bien estratificados, aunque existen sectores brechoides y masivos. Son microcristalinos y generalmente de color gris claro a beige-amarillento. Ocasionalmente presentan intercalaciones de calizas de poca entidad, margas o niveles detríticos rojos con rocas volcánicas. Los materiales calizos se apoyan sobre las dolomías. En general son masivos, porosos y con escaso contenido en terrígenos. Los oolitos son abundantes (50 % - 80 %) y tienen matriz micrítica o cemento esparítico. Poseen intercalaciones de sílex y calizas con nódulos de sílex.

La "Unidad de Buitreras" (Eoceno inferior-medio) aflora en la mitad noroccidental del área estudiada; en este caso sólo la forman margas blancas, rosas y violetas. La "Unidad de Alhajueta-Águila" (Cretácico-Paleoceno) está formada por una serie rítmica monótona de margas y areniscas rojas con microconglomerados intercalados. Además afloran las "Series de Malaceite y Colorín" (Cretácico inferior-Eoceno inferior) que constituyen la mayor parte del borde meridional de la Sierra de Las Cabras. Ambas series son esencialmente margosas de colores abigarrados, con finas intercalaciones de calizas y niveles arenosos. Finalmente los materiales del "Trías de Antequera" afloran en un pequeño sector. Están formados por margas y arcillas con yesos, de típica facies Keuper, y lechos de areniscas.

Los depósitos postorogénicos están representados por los materiales cuaternarios. Afloran coluviones cementados, pobres en matriz y tamaño de clastos grande; coluviones actuales con abundante matriz arcillosa que engloba los cantos, que al pie de grandes cortados están desprovistos de matriz (canchales); arcillas de descalcificación originadas por disolución y acumuladas en las zonas llanas recubriendo el fondo de dolinas, de reducidas dimensiones en general; conos de deyección y coladas de soliflucción.

Desde el punto de vista tectónico, el conjunto de las Cabras tiene una disposición arqueada, convexa hacia el Sur, y se caracteriza por presentar pliegues simétricos más o menos apretados. Debido a esto los buzamientos mayores de 45 grados y casi verticales o verticales son frecuentes. Toda la estructura está cortada transversalmente por fracturas subverticales que dibujan la cizalla, encontrándose entre las más importantes la del Puerto de La Fresneda que ha determinado su desplazamiento a ambos lados. La base se encuentra seccionada por un gran cabalgamiento que se observa claramente en el área estudiada. Se apoya sobre las unidades de Colmenar, Alhajueta-Águila, Colorín-

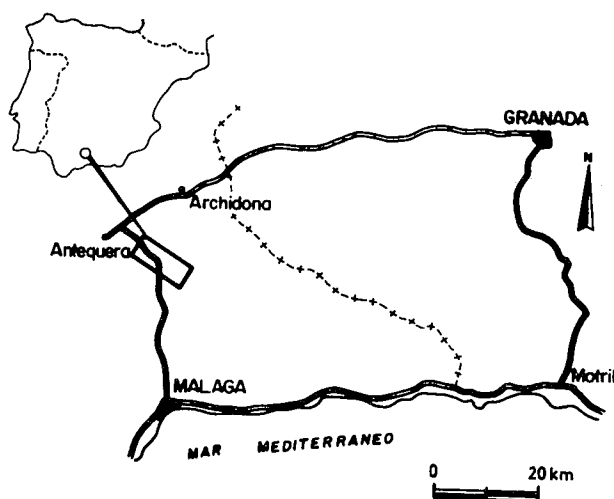


Fig. 1.- Situación geográfica del área estudiada.

Fig. 1.- Location map of the studied area.

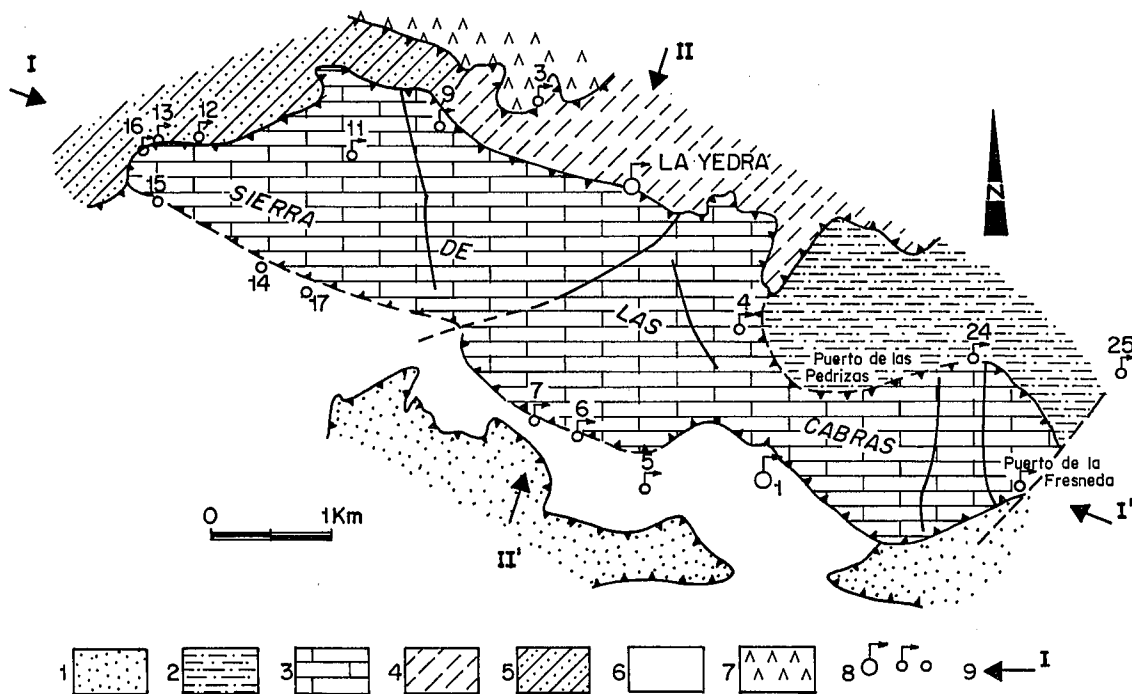


Fig. 2.-Mapa hidrogeológico del área estudiada (1: Unidad de Colmenar; 2: Unidad de Rosario-Saucedo; 3: Conjunto de Las Cábras; 4: Unidad de Buitreras; 5: Unidad de Alhajuela-Aguila; 6: Series de Malaceite y Colorín; 7: Trías de Antequera; 8: puntos acuíferos; 9: corte hidrogeológico esquemático).

Fig. 2.-Hydrogeological map of the studied area (1: Unity of Colmenar; 2: Unity of Rosario-Saucedo; 3: Unity of Las Cabras; 4: Unity of Buitreras; 5: Unity of Alhajuela-Aguila; 6: Malaceite and Colorín Series; 7: Trias of Antequera; 8: spring, well; 9: schematic hydrogeological cross-section).

Malaceite, Rosario-Saucedo y, posiblemente, Buitreras.

3. RASGOS HIDROGEOLÓGICOS

De los materiales presentes en el área estudiada sólo tienen comportamiento acuífero las calizas y dolomías de la Unidad de Las Cabras y los materiales detríticos cuaternarios. Estos últimos adquieren muy poco desarrollo y suelen estar en conexión hidráulica con los dos primeros.

El contacto de los materiales calizos y dolomíticos con las unidades inferiores, con comportamiento acuífero, es mecánico y los aíslan totalmente, tanto en la base como lateralmente. La geometría del sustrato impermeable resulta más difícil de establecer, debido a la ausencia de datos de sondeos mecánicos; no obstante, sí está aceptado que las calizas y dolomías "flotan" sobre las diferentes unidades margosas, sin que se conozca con precisión el espesor de material acuífero existente por debajo de la cota de las surgencias principales. Sí parece claro que aproximadamente a la altura del Puerto de Las Pedrizas se produce el levantamiento del sustrato que debe individualizar la extremidad oriental (subunidad de Cerro Prieto) del resto.

En la figura 3 se muestran dos cortes hidrogeológicos esquemáticos que ayudan a comprender la disposición de los materiales acuíferos en el contexto geo-

lógico, así como la posible individualización del tercio oriental (Cerro Prieto) del conjunto de la unidad como consecuencia del levantamiento local del sustrato aproximadamente a lo largo del Puerto de Las Pedrizas.

La principal fuente de alimentación, y prácticamente única, es la procedente de la infiltración directa de las precipitaciones caídas sobre el afloramiento permeable. Aunque no se tienen datos foronómicos continuados, la constancia de los caudales en la salida principal apoyaría la hipótesis de que se trata de un sistema con cierta inercia y poder regulador; en el caso del Torcal de Antequera (unidad muy cercana a ésta y de características litológicas muy similares) este aspecto ha podido ser suficientemente constatado (Mangin y Pulido-Bosch, 1983; Pulido-Bosch *et al.*, 1987). Otra posible entrada de difícil identificación y peor cuantificación es la procedente de la infiltración de precipitaciones ocultas (condensación en cavidades, conductos, superficie del macizo, etc.). En este sentido hay que reseñar que las nieblas son relativamente frecuentes en el área.

La lluvia útil, estimada a partir del método de Thornthwaite, está comprendida entre 275 y 373 mm, con unas capacidades de campo de 50 mm para la primera y 100 mm para la segunda; se puede estimar, pues, una media del orden de 325 mm. Dado que la superficie permeable aflorante es de 10 km², la alimentación por este concepto, a la escala del macizo, alcanza 3,2

Hm³/año, equivalente a un caudal continuo próximo a 100 l/s. Si se considera el método de Kessler, se obtiene una infiltración de 370 mm/año, equivalente a 3,7 Hm³/año (algo más de 115 l/s de caudal continuo).

Las salidas del sistema tienen lugar, de forma casi exclusiva, por manantiales, dado que los bombeos son inexistentes y no se detecta ninguna salida lateral oculta; éstas son muy poco probables debido a la buena individualización de la Unidad de Las Cabras. Una de sus surgencias principales es la denominada manantial de La Yedra (figura 2), objeto principal del estudio hidrogeológico realizado.

4. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LAS AGUAS

4.1. Conjunto del Sistema

Las características físico-químicas generales de las aguas de la Sierra de Las Cabras son: conductividad comprendida entre 347 y 1.000 micromhos/cm; pH básico, comprendido entre 7,06 y 7,72 y temperatura muy próxima a 15 °C. En cuanto a la concentración iónica,

el cloruro varía entre 14,2 mg/l y 56,8 mg/l; el sulfato está comprendido entre 1,6 mg/l y 100,8 mg/l; el calcio varía entre 40,9 mg/l y 112,2 mg/l, y finalmente el magnesio, cuyos valores oscilan entre 5,1 mg/l y 49,6 mg/l.

4.2. El manantial de La Yedra

Para estudiar las variaciones estacionales del químico de las aguas y tratar de estimar el grado de organización de este acuífero kárstico se tomaron muestras mensuales del manantial desde octubre de 1984 hasta enero de 1988, con lo cual se puede considerar que todas las fases hidrodinámicas se encuentran representadas (crecida, decrecida y agotamiento). Los parámetros físico-químicos determinados fueron: conductividad, temperatura y los iones cloruro, sulfato, bicarbonato, carbonato, nitrato, magnesio y calcio. Los principales rasgos hidroquímicos se representan en la figura 4. Las aguas son de facies bicarbonatada cálcica y conductividad baja, inferior a 416 micromhos/cm.

Si se representa la evolución temporal (figuras 5 y 6) de las características hidroquímicas, se observa que

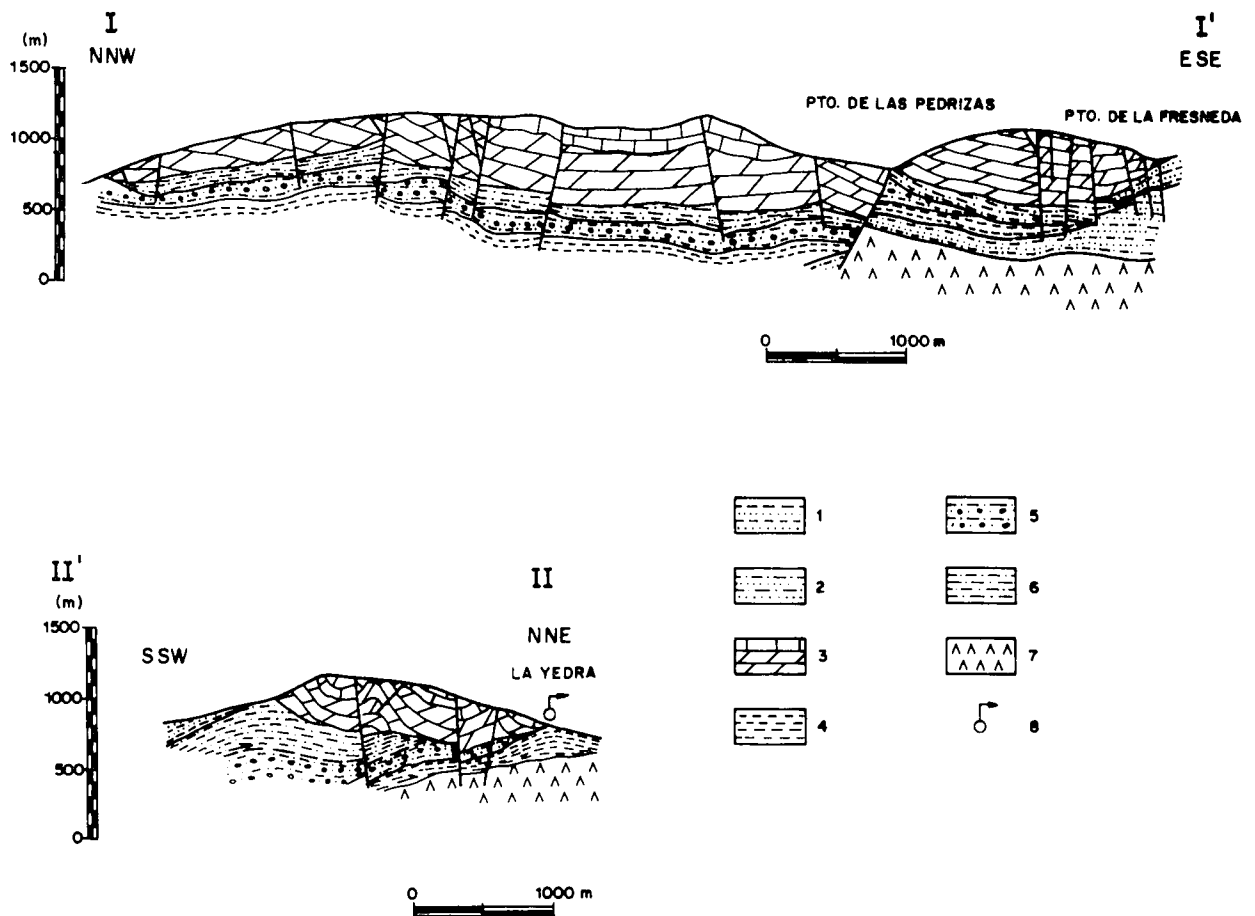


Fig. 3.-Cortes hidrogeológicos esquemáticos indicados en la figura 2; leyenda similar a la figura 2.

Fig. 3.-Schematic hydrogeological cross-sections; key similar to figure 2.

la máxima concentración salina se registra en los meses secos (verano) y de inicio de las lluvias, y la mínima en los meses húmedos.

La periodicidad es especialmente visible en los iones Cl^- y Mg^{2+} y, lógicamente, en la conductividad y residuo seco. La estrecha relación del quimismo con las precipitaciones tiene su explicación en procesos de dilución, ataque químico y aporte salino de las precipitaciones. En efecto, durante el período más húmedo se registra la mayor alimentación de agua con baja concentración salina, la cual circula de forma relativamente rápida, como pone de manifiesto el menor valor de la relación $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$, caracterizadora del tiempo de contacto agua-roca (tabla 1).

| 1 | 2 | 3 | 1 | 2 | 3 |
|----|----------|------|----|----------|------|
| 1 | 22-12-87 | 0.29 | 24 | 13-11-85 | 0.42 |
| 2 | 28-04-87 | 0.32 | 25 | 15-10-85 | 0.62 |
| 3 | 25-05-87 | 0.53 | 26 | 09-09-85 | 0.61 |
| 4 | 29-06-87 | 0.50 | 27 | 25-03-85 | 0.44 |
| 5 | 30-07-87 | 0.52 | 28 | 16-04-85 | 0.33 |
| 6 | 14-08-87 | 0.59 | 29 | 06-08-85 | 0.59 |
| 7 | 26-01-88 | 0.34 | 30 | 15-07-85 | 0.54 |
| 8 | 21-10-87 | 0.61 | 31 | 10-06-85 | 0.51 |
| 9 | 30-11-87 | 0.40 | 32 | 13-05-85 | 0.50 |
| 10 | 20-01-87 | 0.26 | 33 | 08-02-84 | 0.25 |
| 11 | 11-12-86 | 0.29 | 34 | 28-03-84 | 0.44 |
| 12 | 17-11-86 | 0.61 | 35 | 23-04-84 | 0.33 |
| 13 | 15-10-86 | 0.60 | 36 | 14-05-84 | 0.53 |
| 14 | 10-09-86 | 0.60 | 37 | 08-06-84 | 0.51 |
| 15 | 19-08-86 | 0.52 | 38 | 23-07-84 | 0.52 |
| 16 | 21-07-86 | 0.51 | 39 | 29-08-84 | 0.58 |
| 17 | 11-06-86 | 0.51 | 40 | 10-09-84 | 0.55 |
| 18 | 20-05-86 | 0.54 | 41 | 16-10-84 | 0.57 |
| 19 | 11-04-86 | 0.33 | 42 | 28-11-84 | 0.42 |
| 20 | 19-03-86 | 0.45 | 43 | 10-12-84 | 0.30 |
| 21 | 26-02-86 | 0.25 | 44 | 14-01-85 | 0.34 |
| 22 | 28-01-86 | 0.34 | 45 | 14-02-85 | 0.25 |
| 23 | 09-12-85 | 0.28 | | | |

Tabla 1.- Valores de la relación $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$ (3) de las muestras analizadas; 1: número de muestra; 2: fecha de muestreo.

Tabla 1.- Relation values of $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$ (3) of analyzed samples; 1: number of sample; 2: date of sampling.

El flujo más lento de la época primaveral y estival hace aumentar el tiempo de contacto agua-roca y de ahí el mayor contenido salino. Los valores bajos en la concentración de Cl^- inducen a pensar que su origen debe ser esencialmente externo al sistema, heredados de las precipitaciones; el origen de la variación en su concentración puede deberse esencialmente a la combinación de tres factores, señalados ya por otros autores en estudios relativos a otras áreas kársticas (Bakalowiez, 1979, 1986; Blavoux y Mudry, 1986; Custodio 1983, 1986; Antigüedad, 1988): procedencia de las masas nubosas, poder evaporante del medio en la época de precipitación y contenido salino del suelo al producirse la lluvia. Las concentraciones más elevadas deben corresponder a las precipitaciones procedentes de frentes marinos, caídos en la época calurosa y estando el suelo con alto contenido salino; este contenido salino tendría su origen en precipitaciones pequeñas que se evaporan en la práctica totalidad, precipitando las sales en disolución formando una pátina sobre la roca.

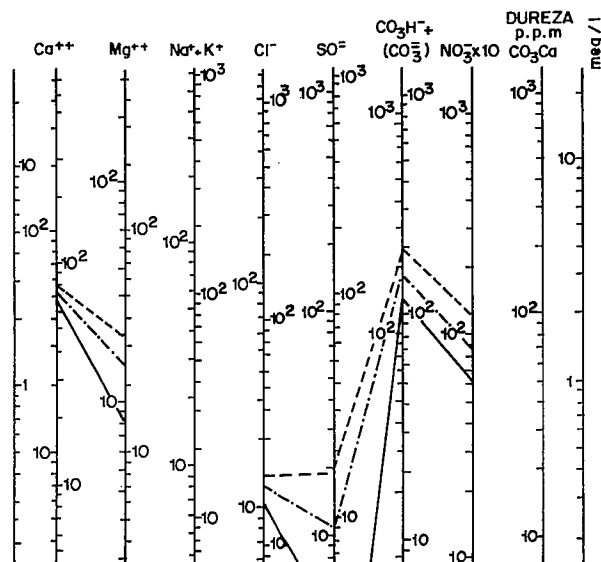


Fig. 4.- Diagrama de Shoeller-Berkaloff de las aguas del manantial de La Yedra.

Fig. 4.- Shoeller-Berkaloff diagram of La Yedra spring's waters.

La escasez en el ión sulfato hace pensar en un origen similar al cloruro, aunque superponiendo el posible aporte de la propia roca almacén que, como la mayor parte de las rocas carbonatadas, pueden contener algo de yeso y piritita fácilmente disuelto, en el primer caso, y oxidable en el segundo. Los nitratos, también presentes en valores muy bajos, pueden tener origen similar (Sanchis, 1990), aunque debe ser la materia orgánica presente en el suelo la mayor fuente de suministro. Ambos iones evolucionan de manera sensiblemente similar a como lo hace el conjunto de la mineralización, aunque presenta mayor variabilidad el ion sulfato. De todas formas, en ningún caso se superan los 20 mg/l de contenido total. Los iones magnesio, calcio y bicarbonato tienen su origen, lógicamente, en los procesos de ataque químico y disolución de la roca acuífera; mientras que el primero fluctúa de manera notable, los dos restantes mantienen una gran constancia. Recordemos que la cinética de la disolución de la dolomía es mucho más lenta que la de la calcita (Thraillkill, 1977), de ahí que las aguas de mayor contenido en Mg^{2+} sean indicativas de haber tenido un mayor tiempo de contacto agua-roca.

5. INTERPRETACIÓN

La elaboración y tratamiento de los resultados se realizó mediante el paquete de programas estadísticos (Padilla *et al.*, 1986). Los tratamientos han consistido fundamentalmente en la aplicación de análisis cluster, de casos y de variables, y análisis factorial a todas las muestras.

En lo relativo al análisis cluster, en el dendrograma de las variables (figura 7) se puede ver cómo la conductividad está correlacionada con los iones magnesio y cloruro con un valor de r mayor de 0,74. Este hecho

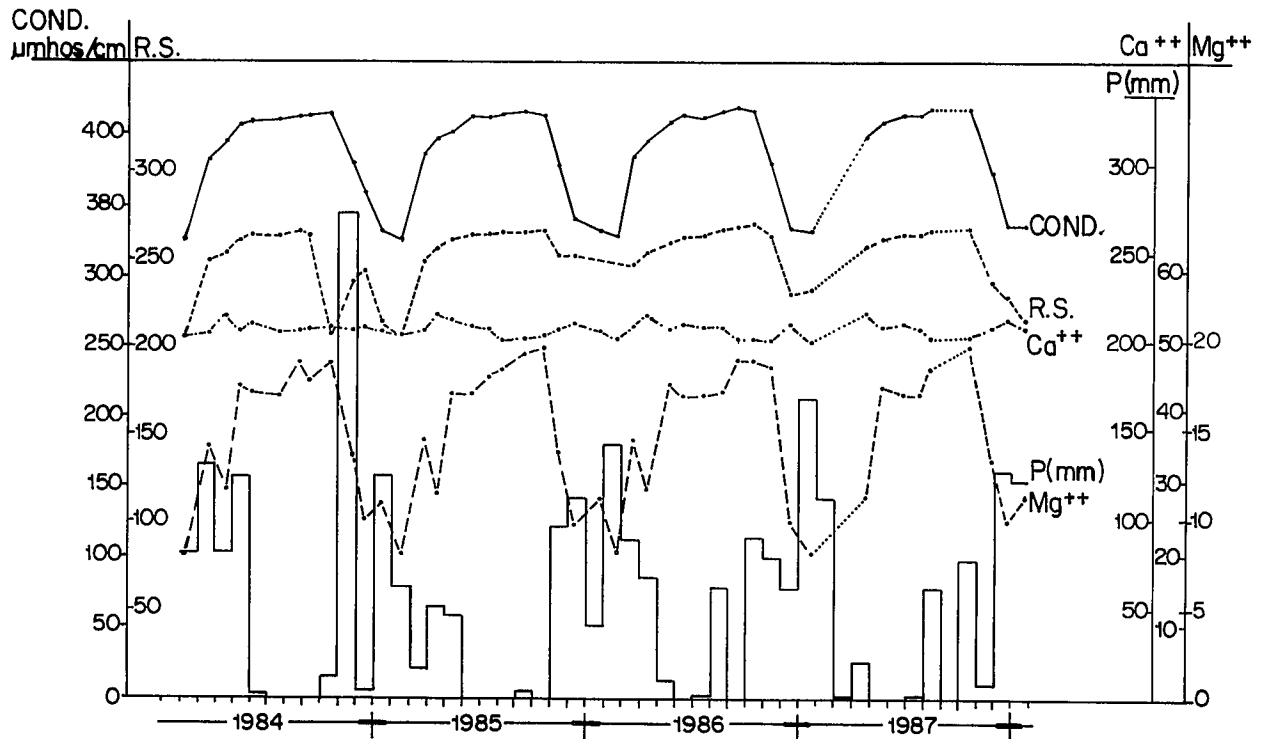


Fig. 5.-Variación temporal de la conductividad, residuo seco, calcio y magnesio (mg/l) en las aguas del manantial de La Yedra. Se superpone la precipitación medida en las estaciones cercanas al manantial.

Fig. 5.-Time variation of conductivity, dry residuum, calcium and magnesium (mg/l) of La Yedra spring's waters. It superposes the rainfall measured at the near meteorological stations to the spring.

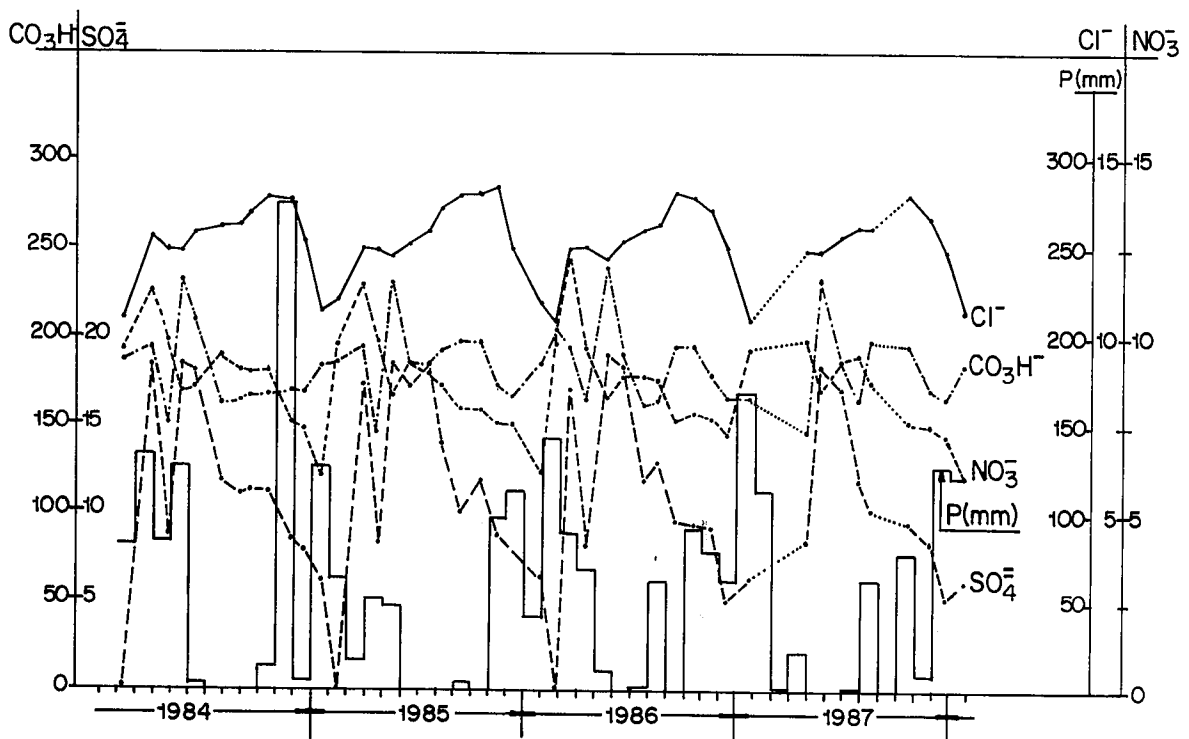


Fig. 6.-Variación temporal de la concentración aniónica de las aguas del manantial de La Yedra (mg/l); los datos de precipitación son los mismos de la figura 5.

Fig. 6.-Time variation of anionic concentration of La Yedra spring's waters (mg/l); the rainfall data are the same of figure 5.

se interpreta como debido a que los procesos de enriquecimiento salino del agua (procesos de disolución, ataque químico y aporte de sales de la superficie, previamente precipitadas y concentradas en el suelo y el epikarst, a partir del agua de lluvia, por procesos de evapotranspiración), son similares para los dos iones citados, condicionando ambos directamente al valor de la conductividad.

Para la obtención del dendrograma de la figura 8 se utilizó como criterio de individualización las distancias euclídeas. De acuerdo con esto, a una distancia menor de 25 se individualizan dos grandes familias: la primera incluye las muestras 1, 11, 10, 23, 7, 44, 22, 21, 33 y 45, con valores de mineralización mínimos correspondientes a los meses de invierno, cuando las lluvias son más abundantes (ver figuras 5 y 6). La segunda, con el mayor número de muestras, reúne a todas las que han sido tomadas al final del período de lluvias e inicio, desarrollo y final del estiaje, cuando la mineralización comienza a aumentar progresivamente (muestras 20, 27, 34, 2, 28, 19, 35, 3, 36, 32, 18, 37, 30, 5, 38, 16, 15, 39, 40 y 41), comienzo del período de lluvias, cuando se produce el máximo de mineralización (muestras 8, 14, 13, 26 y 25), y por último, poco después del inicio de la época de lluvias, a partir de la cual se produce el descenso de la mineralización (muestras 9, 43, 12, 24 y 42).

Estas familias de muestras serían resultado de las variaciones de la pluviosidad y de los diferentes tiempos de tránsito del agua, condicionado por la circulación de recarga y activación temporal de los circuitos de flujo rápido existentes en el acuífero, lo cual hace que el agua de descarga del manantial tenga unas características químicas particulares a consecuencia de la mezcla de aguas con desigual tiempo de residencia. Este

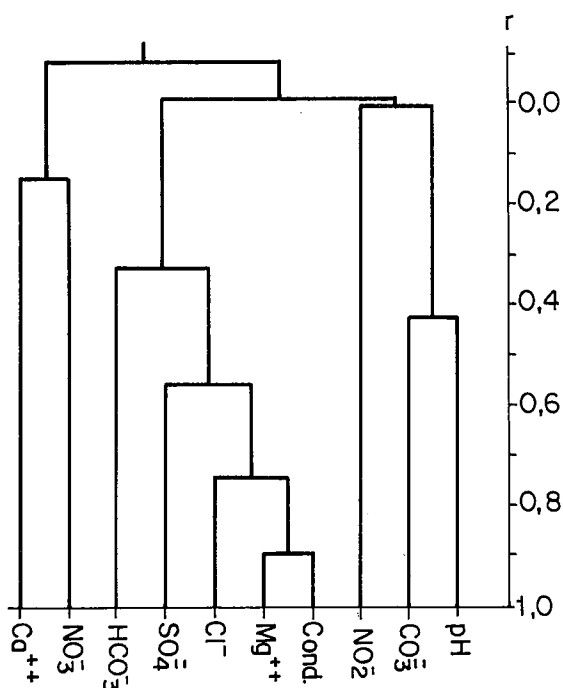


Fig. 7.-Dendrograma de las variables (manantial de La Yedra).
Fig. 7.-Variables dendrogram (La Yedra spring).



Fig. 8.-Dendrograma de los casos (manantial de La Yedra). Se indica el número de la muestra.
Fig. 8.-Observations dendrogram (La Yedra spring). The number of sample is indicated.

hecho ha sido también puesto de manifiesto en otros acuíferos kársticos por diversos autores (Király y Müller, 1979; Mudry *et al.*, 1979; Mudry, 1982; Bakalowicz, 1986; Antigüedad, 1986; 1988).

Realizado el análisis factorial de las variables, se observa que los tres primeros factores explican el 79,3 % de la varianza muestral (F1: 39,7 %, F2: 23,8 % y F3: 15,8 %). La representación binaria de estos factores (figuras 9 y 10) pone de manifiesto que el factor I está condicionado claramente por las variaciones de la conductividad y de los iones magnesio y cloruro. Se trata, por tanto, de un factor "de mineralización".

La posición del ión sulfato, casi intermedia entre los factores I y II, sería indicativo de su doble origen, externo (consecuencia del proceso de concentración salina durante el estiaje) e interno, adquirido en las franjas no saturadas y saturadas del acuífero, como resultado de la oxidación de sulfuros asociados a los materiales dolomíticos del acuífero o por disolución de sulfatos (Martinet, 1980; Custodio, 1983, 1986).

El factor II responde únicamente a las variaciones de los iones bicarbonato y carbonato; el ión calcio no tiene una relación importante con el factor II, debido quizá a que su presencia está condicionada por otros procesos geoquímicos además de los propios de éste factor; en efecto, el yeso debe ser una fuente de este ion, además de la propia caliza y dolomía.

La variabilidad del factor III aparece casi exclusivamente condicionada por la variación del ion calcio; ello viene a apoyar la existencia de procesos geoquímicos más complejos asociados únicamente con el calcio, tales como los ya citados de ataque químico y posterior disolución de la caliza, disolución de yeso y eventuales procesos de intercambio catiónico.

En todos los casos el ión nitrato aparece desligado de los tres factores, lo que implicaría un origen geoquímico diferente respecto del resto de las variables. Es un elemento de procedencia externa al sistema, posiblemente resultado de aportes orgánicos existentes en la superficie o aportados por las propias precipitaciones, tal y como ya indicamos.

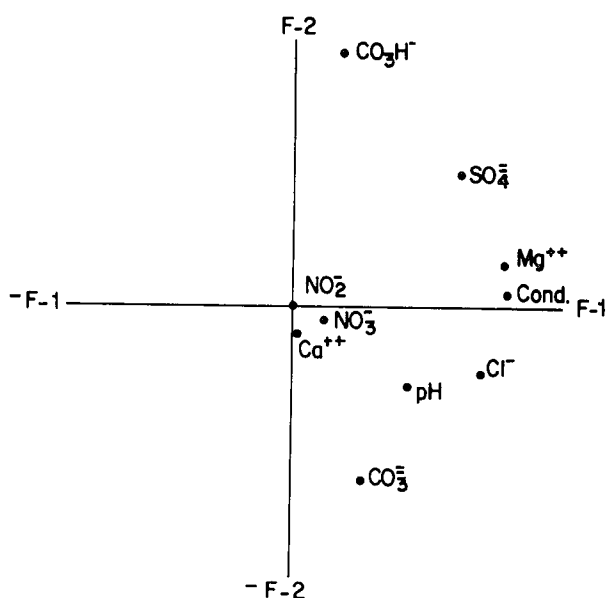


Fig. 9.- Representación en el plano factorial 1-2 de las variables fisico-químicas originales de las aguas del manantial de La Yedra.
Fig. 9.- Graphic representation on the factorial plane 1-2 of original physico-chemical variables of La Yedra spring's waters.

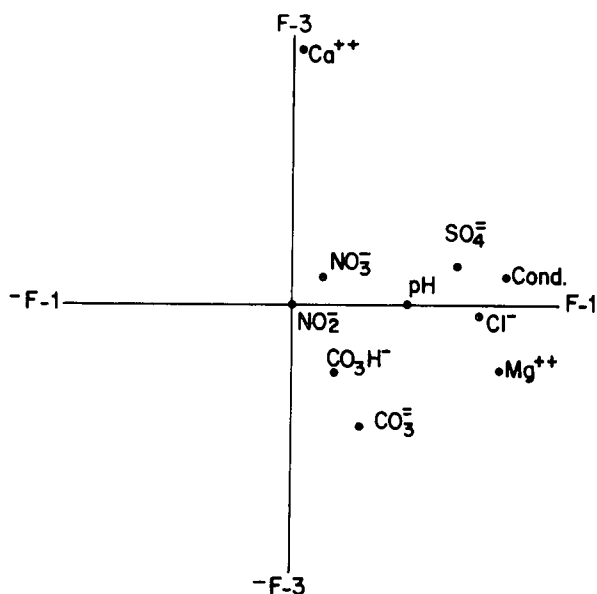


Fig. 10.- Representación en el plano factorial 1-3 de las variables fisico-químicas originales de las aguas del manantial de La Yedra.
Fig. 10.- Graphic representation on the factorial plane 1-3 of original physico-chemical variables of La Yedra spring's waters.

6. DISCUSIÓN FINAL

El conocimiento de la evolución hidrogeoquímica y su relación con las precipitaciones, durante el período de tiempo estudiado en el manantial de La Yedra, aporta información sobre el funcionamiento hidrodinámico del acuífero. Se puede inferir que las variaciones en la mineralización aumentan con el volumen, la

intensidad y la heterogeneidad de las infiltraciones; en todo ello, debe jugar un papel importante, aunque de difícil cuantificación con los datos disponibles, la organización del flujo dentro de la masa acuífera.

Dentro de la evolución iónica temporal se pueden diferenciar aquellos iones cuyo origen es interno de los que tienen una procedencia esencialmente externa al sistema. Entre los primeros se tienen el bicarbonato y los cationes calcio y magnesio. La variación temporal de los dos primeros iones es prácticamente despreciable, lo que se interpreta como debido a que el agua alcanza pronto su saturación en ambos, siendo escasos los cambios cualitativos posibles. El ion magnesio, cuya puesta en disolución requiere un mayor tiempo de contacto agua-roca, tiene unas variaciones muy acusadas y su análisis permite deducir aspectos relativos a la hidrodinámica del manto kárstico. En idéntico sentido apuntan las evoluciones temporales de los aniones cloruro, sulfato y nitrato, aunque estos iones deben tener una procedencia esencialmente externa al sistema.

Durante el estiaje, período previo a las lluvias de otoño e invierno, las aguas tienen una mineralización muy alta, la cual se pone de manifiesto por los elevados valores de la conductividad, residuo seco, y de los iones magnesio y cloruro, y en menor cuantía por los aniones sulfato y nitrato. Las precipitaciones ocasionales habidas durante el estiaje no originaron variaciones importantes en la mineralización de las aguas, apreciables con el intervalo de muestreo. Esto se puede interpretar como debido a la falta de dilución, o ausencia de mezcla importante entre las aguas preexistentes, más mineralizadas, y las aguas de origen meteórico de reciente infiltración, débilmente mineralizadas, y posiblemente debido a la escasa o nula infiltración que deben generar las ocasionales precipitaciones estivales.

Coincidiendo con el comienzo de la época de lluvias se registran los valores máximos de conductividad de las aguas del manantial, debido a que las aguas rápidamente infiltradas determinan un aumento repentino de los potenciales hidráulicos y provocan un empuje hacia la surgencia ("efecto pistón") de las aguas con más tiempo de residencia en el acuífero, y por lo tanto con una mayor mineralización. Otra posible explicación a este hecho -quizá complementaria de la anterior- se tendría en que estas primeras lluvias arrastran las sales depositadas en el medio tras las lluvias estivales, evaporadas en su práctica totalidad. Dichas lluvias aportarían Cl^- y SO_4^{2-} y NO_3^- en menor cuantía, en lo que a los iones analizados se refiere.

Poco después del inicio del período de mayor pluviosidad, se produce un descenso brusco de la mineralización de las aguas, puesto de relieve por la disminución acusada de la conductividad, residuo seco y de los iones magnesio y cloruro. Este descenso se puede interpretar como resultado de la mayor dilución de las aguas a consecuencia de la infiltración de las altas precipitaciones que originarían una mezcla importante con las aguas preexistentes, más mineralizadas.

Cuando las lluvias empiezan a disminuir, la mineralización de las aguas comienza a aumentar hasta alcanzar los valores más frecuentes a lo largo del año hi-

drológico. Este ascenso de la mineralización puede deberse al aumento del tiempo de contacto agua-roca, favorecido por la disminución de la velocidad de tránsito al reducirse los gradientes hidráulicos.

AGRADECIMIENTOS

A D. Ángel Martín Reyes, del Ilustre Colegio de Farmacéuticos de Málaga, autor de los muestreos y responsable de la analítica posterior. Este trabajo ha sido elaborado en el marco del proyecto de investigación PB87-0245, financiado por la DGICYT.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguayo, J., Antigüedad, I., Eraso, A., García De Cortazar, A. y Tamés, P. (1988): Respuesta hidroquímica en el tránsito aguas bajas-altas en las principales surgencias de la unidad hidrogeológica Gatzume-Zestoa (Gipúzcoa) (implicaciones sobre la organización del drenaje kárstico). *Hidrogeología*, 3: 35-49.
- Antigüedad, I. (1986): Aportación al conocimiento de las características hidrodinámicas del macizo de Aramotz (Bizkaia) a partir del control hidroquímico temporal en sus surgencias. *Jorn. Karst en Euskadi, San Sebastián*, I: 221-235.
- Antigüedad, I. (1988): Estudio de acuíferos kársticos a partir de sus respuestas naturales. Aplicación a dos sistemas del país Vasco. *Rev. Soc. Geol. España*, 1: 211-227.
- Antigüedad, I. (1989): Funcionamiento hidrodinámico de los acuíferos kársticos estatales. *Soc. Esp. de Geomorfología*, 4: 309-319.
- Bakalowicz, M. (1979): *Contribution de la géochimie des eaux a la connaissance de la l'aquifère karstique et de la karstification*. Tesis Univ. París VI, 269 p.
- Bakalowicz, M. (1986): De L'hydrogeologie en karstologie. *Jorn. Karst en Euskadi, San Sebastián*, II: 105-129.
- Barba, M., Martín, A., y Piles, E. (1979): Mapa y memoria explicativa de la Hoja 1030 (Colmenar) del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000, IGME
- Barón, A., Fayas, J. A. y Gozalez, C. (1984): Estudio hidrogeológico de un manantial cárstico intermitente: Las Ufanos de Gabellí (Mallorca). Las unidades de regulación. *I Congr. Geol. Esp., Segovia*, VI, 41-51.
- Blavoux, B. y Mudry, J. (1986): Impact des pluies estivales sur la qualite des reserves de l'aquifère karstique: le role du sol et de l'epikarst dans la concentration des chlorures. *Bull. Soc. géol. France*, (8), 2: 667-674.
- Custodio, E. (1983): Calidad del agua y protección de los acuíferos kársticos ante la contaminación. *Reun. Mon. Karst-Larra 82, Navarra*, II: 291-327
- Custodio, E. (1986): Hidroquímica del Karst. *Jorn. Karst en Euskadi, San Sebastián*, II: 131-175.
- Kiraly, L. y Muller, I. (1979): Hétérogénéité de la perméabilité et de l'alimentation dans le karst: effect sur la variation du chimisme des sources karstiques. *Bull. Centre Hydrogeol. Neuchâtel*, 3: 237-285.
- Mangin, A. y Pulido-Bosch, A. (1983): Aplicación de los análisis de correlación y espectral en el estudio de acuíferos kársticos. *Tecniterrae*, 51: 53-65.
- Martinet, C. (1980): *Etude hydrochimique et isotopique des rapports entre les nappes souterraines et le réseau de surface en fonction des débits écoulés: cas du bassin du Thérain et de la Haute Vallée de L'Eure*. Tesis Univ. París VI, 159 p.
- Moral, S., Pulido-Bosch, A. y Valenzuela, P. (1984): Aplicación de los análisis 'Cluster' al estudio de características fisicoquímicas de aguas subterráneas. *Estudios Geol.*, 40: 193-200.
- Mudry, J. (1982): Etude du fonctionnement hydrodynamique de l'aquifère karstique de la Fontaine de Vaucluse (S.E. de la France) partir des analyses physico-chimiques hebdomadaires (cycle 1981-82). *Ann. Sci. Univ. Besançon. Géologie*, mémoire 1, 191-203.
- Mudry, J. y Blavoux, B. (1986): Utilisation de l'analyse en composantes principales (sur variables centrées réduites) pour l'étude du fonctionnement hydrocinématique de trois aquifères karstiques du Sud-Est de la France. *Hydrogéologie*, 1, 53-59.
- Mudry, J., Kiraly, L. y Muller, I. (1979): Analyse multivariée du chimisme de quelques sources karstiques du Jura suisse et Franc-Comtois. *Bull. Centre Hydrogeol. Neuchâtel*, 3: 183-221.
- Padilla, A., Pulido-Bosch, A. y Benavente, J. (1986): Programas para elaboración y tratamiento de datos físico-químicos de interés en hidrogeología. *El agua en Andalucía*. Granada, I, 437-448.
- Peyre, Y. (1974): *Géologie d'Antequera et de sa région (Cordillères Bétiques, Espagne)*. Tesis Univ. París VI (Publ. Inst. Nat. Agronomique de Paris), 528 p.
- Pulido-Bosch, A. (1975): Los manantiales salinos de la Sierra de Mustalla. *V Jorn. Min. Met.*, Bilbao, III, 117-128.
- Pulido-Bosch, A. (1979): Contribución al conocimiento hidrogeológico del Prebético noroccidental (provincias de Valencia y Alicante). *Mem. Inst. Geol. Min. España*, Madrid, 95, 410 p.
- Pulido-Bosch, A., Marsily, G. de y Benavente, J. (1987): Análisis de la descarga del Torcal de Antequera mediante deconvolución. *Hidrogeología*, 2: 17-28.
- Sanchis, 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, Univ. Barcelona, 323 p.
- Thraillkill, J. (1977): Relative solubilities of limestone and dolomite. In: *Karst hydrogeology* (J.S.Tolson and F.C. Doyle, Eds.), VAH Press, Alabama, 491-500.

Entregado el 29 de noviembre 1990
Aceptado el 20 de febrero de 1991