

IMPLICACIONES DEL FUNCIONAMIENTO DE UN ACUIFERO CARBONATADO FISURADO COMPLEJO (SIERRA DE LUJAR, GRANADA) EN LA VARIABILIDAD HIDROQUÍMICA DE SU DESCARGA NATURAL

J. Cardenal *, J. Benavente *, J. J. Cruz-Sanjulián * y A. Sanroma *.

RESUMEN

Se ha llevado a cabo un estudio hidroquímico en un acuífero carbonatado triásico localizado en una cadena montañosa costera en el Sur de la provincia de Granada (Sierra de Lújar, Complejo Alpujárride, Cordillera Bética). Este acuífero está constituido por calizas y dolomías con intercalaciones margosas y/o pelíticas y yeso diseminado. Aunque el área es semiárida, la recarga por la precipitación (bien por la lluvia o por el agua de fusión nival) es relativamente elevada (superior a 600 mm/año) debido a su naturaleza montañosa, cercana a los 1.900 m s.n.m. Además, el río Guadalfeo recarga al acuífero al perder parte de su caudal cuando atraviesa los afloramientos permeables. Las rocas carbonatadas presentan una densa microfisuración; el régimen de flujo es predominantemente difuso. Las formas kársticas están, por lo general, poco desarrolladas tanto en superficie como a nivel de redes espeleológicas. Estas características influyen en la química del agua subterránea, por lo que la variabilidad de los diferentes parámetros físico-químicos del agua es reducida, con gráficos de distribución de frecuencias de dichos parámetros de formas, generalmente, unimodales. Sin embargo, se ha encontrado una mayor variabilidad en aquellos puntos en los que existe mezcla con aguas superficiales procedentes del río Guadalfeo.

Palabras clave: *Hidroquímica, acuífero carbonatado fisurado, Complejo Alpujárride, Cordillera Bética.*

ABSTRACT

A hydrochemical study was carried out in a triassic carbonate aquifer located in a coastal mountain chain in the southern part of the Granada province (Sierra de Lújar, Alpujárride Complex, Betic Cordillera). This aquifer is made up of limestones and dolomites with marly and/or pelitic intercalations and some gypsum scattered or interbedded. Though the area is semi-arid, recharge by precipitation—rain or snow melt—is relatively high (over 600 mm/year) because of its mountainous nature up to near 1.900 m. The recharge of the aquifer also comes from the Guadalfeo river which crosses the permeable outcrops losing part of its stream flow. The carbonate rocks present dense microfissuration; the ground water regime is predominantly diffuse. The karstic forms are, in general, poorly developed either in the surface or at the level of speleological networks in the carbonate material. These characteristics influence the ground water chemistry, so the variability of physical-chemical parameters of water is very low, with single shaped histograms of these parameters. Although, in some points a larger variability was found related to mixing with streamwaters from the Guadalfeo river.

Key words: *Hydrochemistry, Carbonate fissured aquifer, Alpujárride Complex, Betic Cordillera.*

* Instituto del Agua de la Universidad de Granada. Rector López Argüeta, s/n. 18071- GRANADA.

Introducción

El objetivo general de este estudio ha sido determinar las principales características hidroquímicas del acuífero carbonatado de la Sierra de Lújar (Sur de la provincia de Granada), a partir de un número de datos sensiblemente superior al utilizado en investigaciones previas (Benavente, 1982; Cardenal, 1991). En particular, en este trabajo se ha puesto especial énfasis en relacionar dichas características tanto con el comportamiento hidrodinámico del acuífero como con el origen de los distintos flujos subterráneos que alimentan las áreas de descarga del acuífero, aspectos acerca de los que investigaciones recientes han arrojado nueva luz (Cardenal, 1993).

Los datos analíticos empleados corresponden a diversos muestreos realizados entre los años 1990 y 1992 en las principales surgencias del acuífero (Cardenal, 1993). Un resumen de los datos y la localización de los puntos aparecen en la tabla 1 y figura 1, respectivamente. Además, se incluyen en este trabajo los valores medios del contenido en isótopos ambientales estables, Oxígeno-18 (^{18}O) y Deuterio (D), calculados a partir de 35 muestras, tanto de aguas subterráneas como superficiales (tabla 2, resumen de datos de Benavente *et al.*, 1990 y Cardenal, 1993).

Hay que indicar que el interés de las investigaciones hidrogeológicas en este acuífero y sus bordes es elevado, debido a carecer en la actualidad de explotaciones significativas y a su situación estratégica en un sector con gran demanda de agua (Costa del Sol granadina). Además, existen posibilidades de uso conjunto, dadas sus relaciones con el río Guadalfeo que bordea al acuífero por sus bordes N y W. De hecho, en el sector de la confluencia entre los ríos Guadalfeo e Izbor está en construcción una presa de regulación (presa de Rules).

Métodos analíticos

Las muestras, sin acidificar, fueron recogidas en frascos de polietileno de 500 cc para el análisis de los componentes principales y de 125 cc para el de isótopos. Por otro lado, se recogieron muestras acidificadas (con HNO_3 al 0,3 %) para la determinación de algunos elementos minoritarios (F, Fe y Mn). Las medidas de temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto se realizaron *in situ*, para lo que se emplearon equipos de campo portátiles. Las determinaciones analíticas fueron efectuadas en el laboratorio del Instituto del Agua de la Universidad de Granada, procurando que, al menos, los iones Ca^{2+} y HCO_3^- se determinasen en la misma semana (antes de las 24 h cuando fue posible) en que se recogió la muestra, para evitar la posible precipitación de éstos. El HCO_3^- se determinó por medida de la alcalinidad total por valoración con HCl 0,05N y Naranja de Metilo como indicador. Los cationes se analizaron por espectrometría de absorción (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Sr^{2+} y Fe) y emisión (Na^+ y K^+) atómica. Se utilizó un espectrofotómetro de luz visible para

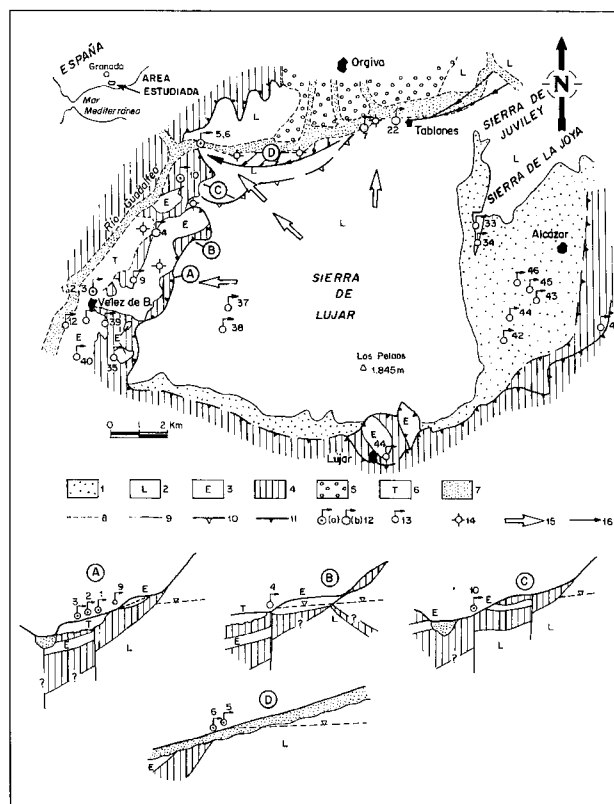


Fig. 1.—Localización, cartografía hidrogeológica y cortes esquemáticos (sin escala) de alguno de los principales sectores de surgencia. Base geológica modificada de Aldaya *et al.* (1979), Estévez *et al.* (1985), Estévez y Martín Algarra (1989) y APLITEG (1989). 1. Formación metapelítica (filitas y cuarcitas) de la unidad de Los Pelaos (manto de Lújar); 2. Formación carbonatada de la unidad de Los Pelaos (manto de Lújar); 3. Formación carbonatada de la unidad de Escalate (manto de Lújar—Estévez *et al.*, 1985— o Alcázar—Aldaya *et al.*, 1979—); 4. Materiales metapelíticos (esquistos, filitas y cuarcitas) de unidades alpujarrides superiores, indiferenciadas; 5. Neógeno (Pliocuatenario de Orgiva); 6. Travertinos; 7. Aluvial del río Guadalfeo; 8. Contacto discordante; 9. Contacto concordante o mecánico indiferenciado; 10. Falla inversa; 11. Cabalgamiento; 12. Surgencia significativa del acuífero de Sierra de Lújar; a) a cota 180-200 m, b) a cota 300-310 m; 13. Otras surgencias; 14. Piezómetros; 15. Dirección aproximada de flujo en el acuífero de la Sierra de Lújar; 16. Infiltración del río Guadalfeo.

determinar el SO_4^{2-} (por turbidimetría) y la SiO_2 (por colorimetría). El ion F^- fue determinado por potenciometría directa y un electrodo específico para ese ion. La mayor parte de los análisis de Cl⁻ se realizaron por volumetría (argentometría) con AgNO_3 0,01N como agente valorante y K_2CrO_4 al 5 % como indicador (algunos muestreos de 1992 se analizaron también por potenciometría directa). Por último, se empleó un espectrofotómetro de absorción atómica con cámara de grafito (tipo THGA), con corrector de fondo por efecto Zeeman, para la determinación de cantidades traza de Fe y Mn en algunos de los puntos.

Los análisis de isótopos estables han sido realizados mediante espectrometría de masas por el Dr. L. Araguás, en el Laboratorio de Hidrología Isotópica del Organismo Internacional de Energía Atómica con sede en Viena.

Tabla 1.—Resumen de los principales datos hidroquímicos de surgencias del sector de la Sierra de Lújar

	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ⁻	SiO ₂	F ⁻	Sr ²⁺	Fe	Mn	O ₂	Cond	T	pH
Vélez de Benaudalla (n.^{os} 1, 2 y 3)																
Media.....	72	22	9	0,6	16	287	35	7,1	0,47	1,2	0,04	0,8	9,2	531	18,6	7,32
STD.....	3,8	0,89	0,43	0,16	0,6	10,1	3,48	0,33		0,07			0,73	12,8	0,17	0,14
CV%.....	5,3	4,1	4,8	3,0	3,8	3,5	9,9	4,7		6,0			7,9	2,4	0,9	1,9
N.....	57	57	53	56	54	57	57	57	4	19	4	4	22	54	51	57
Rules (n.º 5)																
Media.....	150	47	119	14	236	310	257	10,8	0,61	2,2	0,1	10	7	1.484	18,6	7,20
STD.....	13,3	5	13,2	1,2	18,6	11,2	21,3	0,3						35,1	0,48	0,15
CV%.....	8,8	10,8	11,1	8,3	7,8	3,6	8,3	3,0						2,4	2,6	2,1
N.....	20	22	22	22	22	19	22	7	1	1	1	1	4	15	15	14
La Colorá (n.º 10)																
Media.....	652	94	145	16,5	321	298	1.719	16,9	2,15	13,1	2,4	60	0,4	2.847	25,9	6,74
STD.....	18,4	7,1	11,2	0,7	23,9	10,2	50,1	1,5		0,5				83,7	0,2	0,1
CV%.....	2,8	7,6	7,7	4,3	7,4	3,4	2,9	9,1		3,7				2,9	7,0	1,9
N.....	17	17	17	17	17	17	17	16	1	14	1	1	5	16	17	17
El Algarrobo (n.º4)																
Media.....	62	21	9	0,5	15	268	23			0,6			7,0	450	18,1	7,22
STD.....	4,39	2,09	0,81	0,08	0,87	6,89	2,06							8,38	0,43	0,14
CV%.....	7,1	9,8	9,1	18,0	5,7	2,6	8,8							1,9	2,4	2,0
N.....	12	15	15	15	14	12	15			1			2	10	10	6
El Castillejo (n.º 7)																
Media.....	48	24	22	2,1	51	219	20	7,6	0,38	0,7	0,1	2,4	8,1	530	17,5	7,47
STD.....	3,2	1,3	1	0,2	3,7	9,3	2	0,6		0,05				7,3	0,1	0,12
CV%.....	6,7	5,4	4,6	8,1	7,3	4,3	10,0	8,5		6,7				1,4	1,4	1,6
N.....	23	23	23	23	23	23	23	9	1	13	1	1	7	17	16	18
Tablones-La Raja (n.º 22)																
Media.....	67	27	65	10	152	227	55	8,6	0,57	1,0	0,2	9,6	7,9	856	15,7	7,64
STD.....	3,8	1,3	7,2	0,4	11,9	8,8	3,5	0,9		0,1				16	0,8	0,08
CV%.....	5,7	4,6	11,0	4,1	7,8	3,9	6,3	10,4		8,3				1,9	5,1	1,0
N.....	10	10	10	10	10	10	10	8	1	8	1	1	4	10	10	9
Otras surgencias de facies bicarbonatadas																
Media.....	45	20	13	1,2	22	199	17	7,4	0,11	0,14	0,09	8,5		405	15,0	7,97
Max.....	85	45	22	7	39	275	58	10,3	0,23	0,40	0,35	54		569	19,2	8,47
Min.....	25	8	4	0,2	7	137	7	2,8	0,00	0,00	0,02	0,4		222	7,2	7,47
N.....	16	16	16	16	16	15	16	11	11	14	7	7		16	16	12

Nota: Las concentraciones están expresadas en mg/l, salvo el Mn en µg/l. La conductividad se expresa en µS/cm a 25° C. STD: desviación típica; CV%: coeficiente de variación (100 x STD/media); N: número de medidas.

Síntesis hidrogeológica del acuífero de la Sierra de Lújar

La Sierra de Lújar se localiza al sur de la provincia de Granada, entre el macizo de Sierra Nevada y el Mar Mediterráneo. Tiene una superficie ligeramente inferior a 100 km², ocupada mayoritariamente por materiales carbonatados triásicos pertenecientes al Complejo Alpujárride (Zonas Internas de la Cordillera Bética). El relieve es abrupto, alcanzándose a 10 km de la costa altitudes superiores a los 1.800 m (fig. 1).

La formación carbonatada que constituye el acuífero de la Sierra de Lújar, de una potencia próxima

a los 2.000 m, conforma un conjunto permeable por fisuración y, en menor medida, karstificación. Compuesta, principalmente, por calizas y dolomías, presenta una gran heterogeneidad, con intercalaciones margosas y evaporíticas, y contiene mineralizaciones de fluorita y galena (Ovejero *et al.*, 1982) que en el siglo pasado fueron objeto de una intensa explotación minera. En el detalle, los tramos en los que predominan los materiales pelíticos pueden alcanzar hasta 200 m de espesor (Delgado *et al.*, 1981; Estévez y Martín-Algarra, 1989). Esta heterogeneidad litológica unida a la gran complejidad de la estructura, que corresponde, a grandes rasgos, a un pliegue sinclinal tumbado (Estévez *et al.*, 1985;

Campos y Simancas, 1989; Estévez y Martín Algarra, 1989), condicionan un funcionamiento hidrogeológico notablemente menos simple que el planteado en investigaciones previas (Benavente, 1982; IGME, 1983). Otros materiales permeables existentes en el área son la formación carbonatada triásica de la Unidad de Escalate y el aluvial del río Guadalfeo, así como una potente formación travertínica en las inmediaciones del pueblo de Vélez de Benaudalla. Los materiales de comportamiento impermeable corresponden a las formaciones metapelíticas (esquistos, cuarcitas y filitas, con ocasionales intercalaciones evaporíticas) de la base de las unidades alpujarrides de Lújar y Escalate y del manto de Murtas. En la figura 1 se incluyen, de manera simplificada, los principales rasgos geológicos e hidrogeológicos del área estudiada.

La descarga visible del acuífero se realiza hacia los bordes N y W del mismo, aunque podría existir también una conexión en profundidad con otros acuíferos situados más al E, en concreto con el acuífero de Albuñol (Nieto, 1974; Benavente *et al.*, 1990; Cardenal *et al.*, 1992a; Cardenal, 1993).

El borde occidental del acuífero, en las inmediaciones del pueblo de Vélez de Benaudalla, es un límite de descarga, jalonado por materiales impermeables cabalgantes que confinan a aquél. El borde septentrional corresponde al contacto de los materiales carbonatados con los aluviones del río Guadalfeo. La relación río-acuífero es relativamente compleja y ha sido tratada en trabajos previos (Morell, 1976; Carrasco, 1981; Benavente, 1982; IGME, 1983, 1985; ITGE, 1988; INTECSA, 1990; Cardenal *et al.*, 1992b; Cardenal, 1993) y se comentará con detalle más adelante.

Investigaciones recientes, llevadas a cabo en el marco del proyecto del citado embalse de Rules, han puesto de manifiesto la compartimentación del acuífero en dos sectores de diferente nivel piezométrico (INTECSA, 1990; Benavente *et al.*, 1993; Cardenal, 1993). De acuerdo con ello, la descarga tiene lugar en los siguientes intervalos de altitud:

— Entre 180-190 m. Corresponde al área de surgencias de Vélez de Benaudalla (n.ºs 1, 2 y 3; caudal medio de 250 l/s), Rules (5 y 6; caudal medio visible de 130 l/s, aunque la descarga oculta hacia el río Guadalfeo es del orden de 300 l/s, como se deduce de los aforos diferenciales realizados: Cardenal, 1993) y una surgencia termal: La Colorá (n.º 10; caudal entre 5-10 l/s).

— Entre 300-320 m. La descarga corresponde a las surgencias de El Algarrobo (n.º 4; caudal entre 0 y 200 l/s), El Castillejo (caudal medio de 25 l/s) y La Raja-Tablones (n.º 22; caudal visible inferior a 10 l/s, pero la descarga oculta hacia el río Guadal-

Tabla 2.—Valores medios de los contenidos en isótopos ambientales estables (^{18}O y D) en puntos del sector de la Sierra de Lújar. Valores en δ respecto del patrón de referencia V-SMOW (Gonfiantini, 1981). +: Aguas superficiales (río Guadalfeo muestreado en los sectores de Tablones y Orgiva). N: Número de muestras. d: Exceso en Deuterio ($d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$)

Ref.	Lugar	^{18}O ‰	N	D ‰	N	d ‰
1	F. Nueva	-7,95	4	-49,6	3	14,03
2	Nacimiento	-7,94	5	-50,4	3	13,44
3	Torchal	-7,94	4	-51,8	3	11,80
4	Algarrobo	-7,72	1	-46,1	1	15,66
5	Rules prin.	-9,10	3	-63,1	2	9,54
6	Rules peq.	-9,23	3	-61,7	2	12,03
7	Castillejo	-7,98	3	-52,0	2	12,04
9	F. Rafael	-6,40	2	-41,2	2	11,98
10	La Colorá	-7,84	4	-50,5	2	10,05
12	Paco Vito	-8,60	1	-52,7	1	16,10
+	Guadalf. Org.	-9,48	3	-63,8	2	11,88
+	Guadalf.Tabl.	-9,38	2	-65,6	2	9,45

feo a través de los aluviones supera los 500 l/s, como se ha puesto de manifiesto mediante aforos diferenciales: Cardenal, 1993).

No todos los puntos aparecen en relación directa con el acuífero carbonatado. De hecho, al estar confinado el acuífero en su borde occidental, algunos manantiales surgen, en relación con fracturas, en el seno de los materiales metapelíticos o travertínicos, o en el acuífero carbonatado de la unidad de Escalate, conectado lateralmente con la Sierra de Lújar (fig. 1).

Las formas kársticas son escasas. La descarga de los manantiales es muy regular, con un comportamiento marcadamente inercial en su respuesta a la recarga por precipitación (Cardenal, 1993). La abundancia de material dolomítico con gran desarrollo de la microfisuración puede contribuir a este comportamiento.

En el estudio de este acuífero, de gran complejidad, han resultado muy eficaces las técnicas isotópicas. Se han realizado análisis de ^{18}O y D de una serie de muestras, cuyos resultados se exponen resumidamente en la tabla 2. El amplio rango de variación en el contenido isotópico del conjunto de muestras se ha interpretado como una respuesta al efecto altitud, lo que permite distinguir los acuíferos recargados a baja cota de aquellos cuya recarga se produce a cotas más elevadas (Siegenthaler y Oeschger, 1980).

En efecto, como se observa en la figura 2, los valores de ^{18}O y D más negativos (esto es, más empobrecidos en especies pesadas) corresponden a las muestras del río Guadalfeo; estos contenidos son propios del drenaje de áreas altas (Sierra Nevada en este caso, con cumbres que superan los 3.000 m

s.n.m.). Por el contrario, los valores menos negativos son los de un pequeño manantial (n.º 9) que surge a 335 m s.n.m. de cota y drena un acuífero carbonatado de reducida extensión (perteneciente a la unidad de Escalate) cuyo afloramiento presenta una altitud media cercana a los 500 m s.n.m.

En la figura 2 también se aprecia una agrupación de puntos con valores isotópicos muy similares, que pertenecen a las tres surgencias de Vélez de Benaudalla (agrupadas en el gráfico con el n.º 1), La Colorá (n.º 10) y El Castillejo (n.º 7); a este conjunto de manantiales hay que atribuirle, pues, una cota similar del área de recarga; este área, dada la magnitud de la descarga, no puede ser otra que la del acuífero de la Sierra de Lújar, para el que se estima una cota media de afloramientos permeables en torno a los 1.100 m s.n.m. El agua correspondiente al manantial de El Algarrobo (n.º 4) resulta ligeramente más enriquecida en especies pesadas que las muestras anteriores; esto requiere un flujo más superficial al producirse la infiltración a una cota algo inferior, ya que esta surgencia, que aparece en materiales de la unidad de Escalate, recibe una parte de sus aportaciones de la precipitación caída sobre el acuífero principal, con el que aquél está conectado lateralmente, como se comentará más adelante.

Los puntos 5 y 6 (Rules) y 12 (Paco el Vito) constituyen otros tantos casos particulares en los que existen evidencias de procesos de mezcla de aguas de diferente origen como será analizado posteriormente con más detalle. La surgencia n.º 12 tiene un caudal muy variable (entre 0 y 120 l/s), probablemente como consecuencia de la explotación a que está sometido el acuífero aluvial del río Guadalfeo (Benavente *et al.*, 1991); este manantial drena materiales carbonatados de la unidad de Escalate, al S del pueblo de Vélez de Benaudalla, que afloran a cotas inferiores a los 400 m, por lo que le correspondería una composición isotópica, al menos, del mismo orden que la surgencia n.º 9; sin embargo, estos contenidos isotópicos tan negativos indican una mezcla con agua del río Guadalfeo. Esta verosímil aportación del río Guadalfeo al acuífero carbonatado de la unidad de Escalate en el sector del azud de Vélez de Benaudalla, al Sur del área estudiada, ha sido sugerida en estudios previos (Cardenal *et al.*, 1991).

Características hidroquímicas del acuífero de la Sierra de Lújar

Sistema de Vélez de Benaudalla-Rules

Surgencias de Vélez de Benaudalla (n.ºs 1, 2 y 3)

Estas surgencias constituyen uno de los puntos más significativos del drenaje del acuífero de la Si-

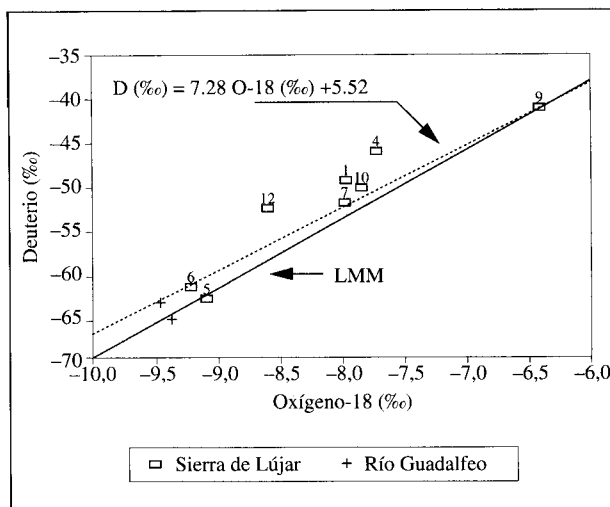


Fig. 2.—Relación de los contenidos medios de ^{18}O y D en aguas subterráneas y superficiales (río Guadalfeo) en el sector de la Sierra de Lújar. Se ha representado la Línea Meteorológica Mundial [LMM: $\delta\text{D} (\text{‰}) = 8\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) + 10$] y la línea calculada para las aguas subterráneas y superficiales del sector Sierra de Lújar, Albuñol y Sierra de Gádor (Benavente *et al.*, 1990). Ver texto para más detalles.

erra de Lújar y serán consideradas conjuntamente. En las tres surgencias los valores de la mineralización total son bajos (inferiores a 0,5 g/l), con un coeficiente de variación muy reducido, inferior al 3 %. La facies hidroquímica es bicarbonatada cálcica. Los iones HCO_3^- y Ca^{2+} representan unas proporciones de más del 80 % y de cerca del 60 % del total de aniones y cationes, respectivamente. El ion Mg^{2+} se presenta también con una relativamente alta concentración, cercana al 35 % del total de cationes. Estas concentraciones son propias de surgencias que drenan materiales calizo-dolomíticos. De hecho, en los acuíferos carbonatados alpujárrides la principal reacción que controla la composición química de las aguas subterráneas de facies bicarbonatada es la disolución incongruente de dolomita (Cardenal, 1993; Cardenal *et al.*, 1994a). Los coeficientes de variación de los distintos iones se mantienen bajos, en torno al 5 %, salvo el K^+ y SO_4^{2-} .

Se ha controlado *in situ* la temperatura y la conductividad de forma periódica. Para el período 1991-1992, la variación de la temperatura ha sido muy escasa, entre 18,1 y 18,7 °C, con un valor medio en torno a 18,6 °C. Puede apreciarse una distribución de frecuencias marcadamente unimodal (fig. 3). La temperatura del agua en estas surgencias es próxima a la temperatura media del sector (en torno a los 17 °C), lo que no resulta coherente con el flujo relativamente profundo que habitualmente se ha atribuido a la descarga de estos manantiales.

De hecho, en registros térmicos en piezómetros del entorno del río Guadalfeo (INTECSA, 1990; Cardenal, 1993) se alcanzan temperaturas de 20 y 22° C entre los 80 y 100 m de profundidad. Dado que el acuífero en el sector de las surgencias de Vélez de Benaudalla debe de estar a una profundidad mayor, no alcanzada por sondeos de investigación, es necesario invocar la existencia de fracturas transversales a la estructura principal de la sierra y ocultas bajo los travertinos (esquema A: fig. 1), que darían cuenta de una circulación menos profunda y, consecuentemente, de una temperatura relativamente baja de los manantiales.

Son coherentes con esta hipótesis otras observaciones relativas a la composición química y el contenido en oxígeno disuelto. Cuando el flujo entra en contacto, más o menos prolongado, con el material metapelítico de la base de la secuencia carbonatada, es frecuente que adquiera ciertas cantidades de SO_4^{2-} y Fe, como sucede en La Colorá y otros puntos próximos en el acuífero de la Sierra de Lújar, o en el cercano acuífero de Albuñol (Cardenal, 1993); además, el contenido en oxígeno disuelto suele descender por debajo del 1 % de saturación. En las surgencias de Vélez de Benaudalla, en cambio, el agua alcanza una saturación próxima al 100 % en oxígeno y los contenidos en Fe no superan los 50 $\mu\text{g/l}$.

Se han representado distribuciones de frecuencias de las medidas de conductividad y los resultados analíticos de los principales componentes iónicos obtenidos en el período de control (fig. 3), que comprende diferentes situaciones hidrodinámicas del sistema, tanto de crecida como de estiaje. Bakalowicz (1979) estableció un método de clasificación de distintos sistemas kársticos (según el grado de karstificación) y no kársticos (porosos o fisurados), utilizando para ello una representación de la distribución de frecuencias de la conductividad o de la mineralización total a lo largo de un ciclo o una decrecida. Si se considera un período que englobe todas las fases del sistema (al menos una crecida y su posterior decrecida) y se obtiene una curva unimodal, se concluye que predomina un solo modo de circulación, lo que es propio de acuíferos fisurados y no karstificados. Las distribuciones de frecuencias plurimodales indican la existencia de una red kárstica jerarquizada, por lo que se dan varios modos de circulación con diferentes características hidroquímicas. Los gráficos obtenidos permiten clasificar el acuífero de la Sierra de Lújar, de acuerdo con los criterios descritos, como fisurado o débilmente karstificado.

Por otro lado, es de destacar la escasa variabilidad observada en estos manantiales de la conductividad eléctrica del agua, reflejo de la mineralización total, en torno al 2 %. Según Shuster y White

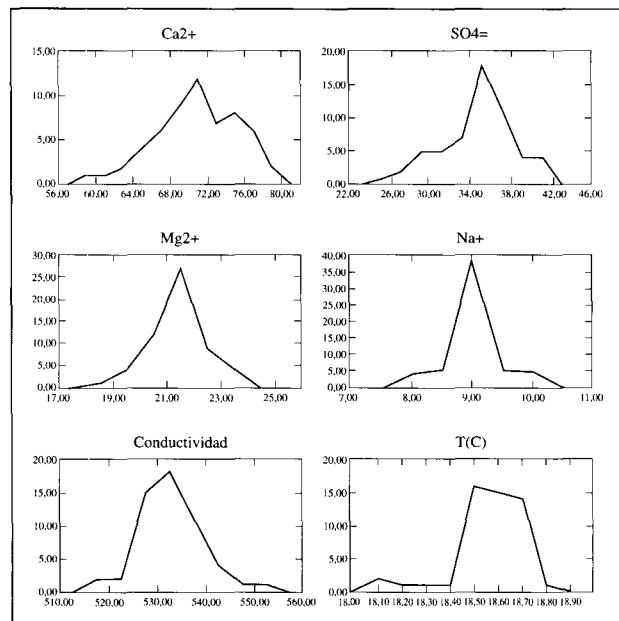


Fig. 3.—Distribución de frecuencias de los principales parámetros físico-químicos de las surgencias de Vélez de Benaudalla (n.ºs 1, 2 y 3).

(1971), valores del coeficiente de variación de la dureza o de la mineralización inferiores al 5 % son indicativos de una surgencia que drena un acuífero fisurado («diffuse flow system»). En un acuífero bien karstificado, en el que la circulación se realiza preferentemente a través de amplios conductos («conduit flow system»), dicho coeficiente sería superior al 10 %. Los citados autores aplican este método a surgencias muestreadas con paso mensual o quincenal durante un período de aproximadamente un año. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que este último método se puede aplicar si la distribución de frecuencias de la conductividad es unimodal, ya que la desviación típica no tiene sentido cuando dicha distribución es plurimodal (Bakalowicz, *op. cit.*).

Las surgencias de Rules (n.ºs 5 y 6)

Este área de surgencias difusas presenta una facies hidroquímica mixta (clorurada-sulfatada cálcico-sódica). Los datos que a continuación se expondrán se refieren en su mayor parte a la surgencia principal (n.º 5).

La presencia de filoncillos de yeso en los materiales carbonatados de Sierra de Lújar ha sido reconocida en sondeos efectuados por el SGOP (Carrasco, 1981) en el borde N de la Sierra. Es posible que a través de estos tramos se produzca el flujo que

parcialmente alimenta estas surgencias. Ello condiciona una salinidad ligeramente superior a 1 g/l y altas concentraciones en los siguientes iones: Cl⁻ y SO₄²⁻, superiores a 200 mg/l, y Ca²⁺ y Na⁺, más de 100 mg/l. Los iones HCO₃⁻ y Mg²⁺ están presentes también con una concentración relativamente alta, reflejo de los materiales calizo-dolomíticos del acuífero de la Sierra de Lújar.

Se ha controlado de forma periódica la conductividad eléctrica del agua, que presenta un valor medio de 1.415 µS/cm y valores extremos de 1.330 y 1.479 µS/cm. El coeficiente de variación es inferior al 4 %. La evolución temporal de este parámetro aparece representada, junto con el caudal, en la figura 4a. En líneas generales se aprecia una relación inversa entre la conductividad y el caudal. Esta relación también se observa en la figura 4b, donde se representa el caudal frente a los valores disponibles del TSD (obtenido a partir de la suma de los contenidos en aniones más cationes, expresados en mg/l). Ello pondría de manifiesto la influencia de las aportaciones del río Guadalfeo en la descarga de esta área de surgencias, que se hace más patente en los momentos de mayor caudal del río. Durante el deshielo, la conductividad del agua del río presenta unos valores mínimos, inferiores a 200µS/cm, comparados a los que presenta durante el estiaje, superiores a 700 µS/cm (Cardenal *et al.*, 1992b).

Se han representado las distribuciones de frecuencias de los principales componentes iónicos (fig. 5). A diferencia de lo observado en las surgencias de Vélez de Benaudalla, las curvas obtenidas no son unimodales, a excepción del contenido en HCO₃⁻, y reflejarían la contribución de aguas de distinto origen al caudal de las surgencias.

Esta influencia del río se hace también evidente a partir del análisis del contenido en isótopos estables (Benavente *et al.*, 1990; Cardenal, 1993). Así, en la figura 2 se aprecia cómo estas surgencias presentan un contenido isotópico intermedio (-9,10 y -63,1 por 1.000, valores medios de la surgencia principal —n.º 5— en ¹⁸O y D, respectivamente) entre el agua del río Guadalfeo (-9,48 y -63,8 por 1.000, muestreado a la altura de Orgiva) y otros puntos de drenaje del acuífero (valores medios de Vélez, La Colorá y El Castillo: -7,94 y -50,9 por 1.000), lo cual sería indicativo de un proceso de mezcla, al infiltrarse el río en el acuífero a su paso por el borde N de la Sierra. El porcentaje de esta mezcla puede calcularse por medio de un balance de masas, dado el carácter conservativo de los isótopos estables. Así, si se considera una combinación lineal de los miembros extremos de la mezcla, resulta:

$$\delta^{18}O_{RULES} = x\delta^{18}O_{RIO} + (1-x)\delta^{18}O_{Ac.LUJAR}$$

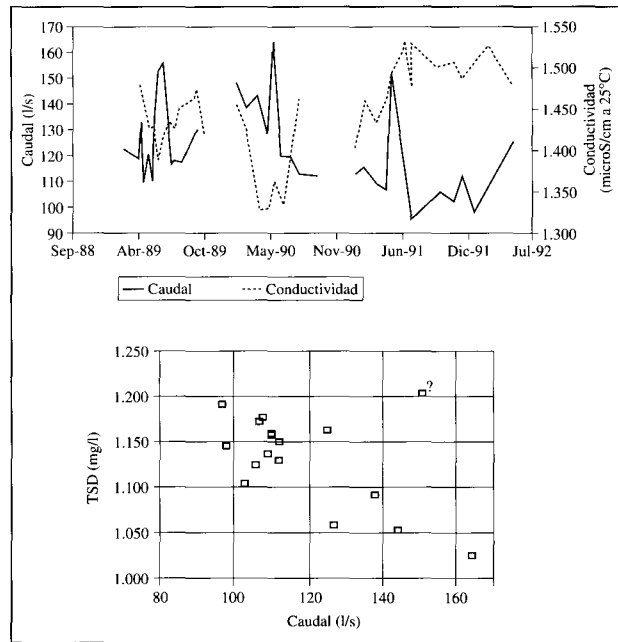


Fig. 4.—(a) Evolución temporal del caudal y la conductividad eléctrica en la surgencia principal de Rules (n.º 5). (b) Caudal vs. TSD en esa surgencia.

donde x es la fracción del agua procedente del río Guadalfeo que se mezcla con el agua del acuífero de la Sierra de Lújar. El cálculo indica que el río recarga el acuífero aportando del orden del 75 % del caudal de esta zona de surgencias, mientras que el 25 % restante proviene de la recarga directa de la precipitación sobre el acuífero carbonatado. Ello estaría de acuerdo con los datos aportados por Carrasco (1981), quien señala que el río Guadalfeo a su paso por el borde N de la sierra queda colgado del orden de 50 m por encima del nivel piezométrico del acuífero (esquema D: fig. 1), y con datos foronómicos de IGME (1985), INTECSA (1990) y Cardenal (1993), los cuales registran pérdidas de caudal (entre 300 y 400 l/s) en este tramo del río, entre Orgiva y Rules.

La surgencia de La Colorá (n.º 10)

Este manantial presenta facies hidroquímica sulfatada cálcica. Se han medido conductividades comprendidas entre 2.650 y 3.000 µS/cm, reflejo de una elevada mineralización: 3 g/l como valor medio. Los iones SO₄²⁻ y Ca²⁺ se encuentran en una proporción superior al 70 % del total de aniones y cationes, respectivamente, lo que denota la influencia de la disolución de material evaporítico (yesos, principalmente), muy abundante en las columnas litológicas de los piezómetros perforados en este sector (INTECSA, 1990).

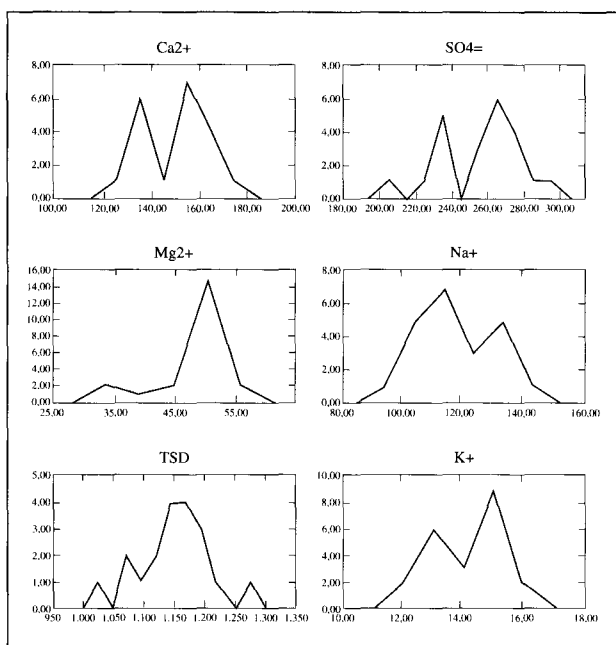


Fig. 5.—Distribución de frecuencias de los principales parámetros químicos de la surgencia de Rules (n.º 5).

El resto de los iones se presentan en unas proporciones parecidas, del orden del 10 al 15 %. Los iones Cl⁻ y Na⁺ proceden de la disolución de la halita que puede existir en los niveles evaporíticos —aunque no han sido descritos niveles de halita en investigaciones previas— o halita asociada a inclusiones fluidas en las mineralizaciones de fluorita (Touray y Tona, 1974; Morales-Ruano *et al.*, 1991). Los iones HCO₃⁻ y Mg²⁺ son aportados por los materiales calizo-dolomíticos de la Sierra de Lújar.

Estas características hidroquímicas reseñadas (facies sulfatada cálcica, alto contenido en Mg²⁺ unido a un pH bajo, generalmente inferior a 7,0, y una alta P_{CO2} (10^{-1,35} atm como valor medio) son el resultado de un proceso de desdolorización (Plummer y Back, 1980), que consiste en la disolución de dolomita, acompañada de precipitación de calcita, provocada por la disolución de yeso. Esta reacción ha sido reconocida en los acuíferos alpujarrides de la Sierra de Lújar y Albuñol cuando el flujo entra en contacto con niveles de yeso (Cardenal, 1993; Cardenal *et al.*, 1994a).

En cuanto a iones minoritarios, hay que destacar la presencia de potasio (16,5 mg/l, condicionado por la disolución de material evaporítico), estroncio (13 mg/l), manganeso (0,06 mg/l) e hierro (2,4 mg/l) que forma en el entorno de la propia surgencia precipitados y geles de color rojo característico, a los que seguramente debe el toponímico. Además, el contenido en F⁻ es el más alto del sector: 2,15

mg/l, el cual viene limitado por el elevado contenido en Ca²⁺, ya que por encima de 70 mg/l de este catión la concentración de F⁻ no suele exceder de 3 mg/l (Kafri *et al.*, 1989).

El Fe probablemente lo adquiera la solución durante el ascenso del agua al contactar con el material metapelítico, dado que son frecuentes las mineralizaciones de hierro asociadas a la formación de filitas y cuarcitas de las unidades alpujarrides (Aldaya *et al.*, 1979).

Aunque no se han descrito minerales de Sr²⁺ en la unidad alpujarride de Lújar-Gádor, Gervilla (1985) encuentra contenidos de Sr²⁺ superiores a los 3.000 ppm asociados a los tramos calcíticos del miembro mineralizado de esta unidad. En las aguas de facies sulfatada cálcica en los acuíferos alpujarrides del sector litoral de la provincia de Granada se alcanzan contenidos en Sr²⁺ superiores a los 10 mg/l (fig. 6). Se puede pensar, por tanto, en una fuente de Sr²⁺ asociada al material evaporítico, bien como impurezas dentro de los cristales de yeso o como celestina, dada la elevada solubilidad de esta sal.

En la figura 7 se han representado las distribuciones de frecuencia de los principales parámetros físico-químicos. Puede apreciarse que, salvo excepciones como la conductividad o el Ca²⁺ y Na⁺, las formas de las gráficas tienden a ser más o menos unimodales, de acuerdo con la escasa variabilidad de la surgencia. El hecho de que el Ca²⁺ y Na⁺ sean los que presentan una mayor heterogeneidad puede ser debido a procesos de intercambio iónico al entrar en contacto el agua con el material metapelítico.

El contenido en O₂ disuelto es muy reducido. Si bien en esta surgencia no hay evidencias de procesos de reducción de sulfatos, tales evidencias se han

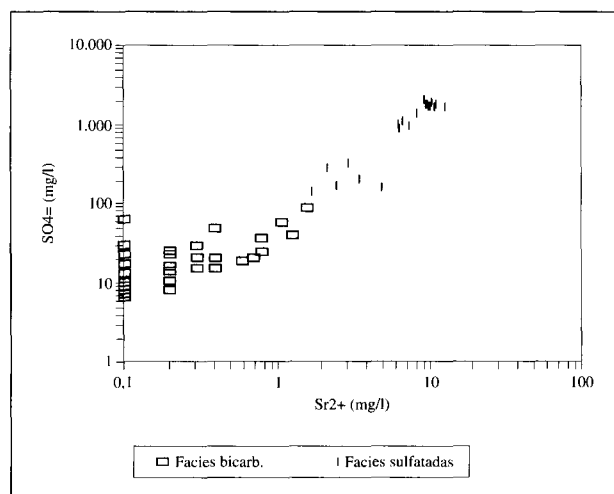


Fig. 6.—Relación Sr²⁺ vs. SO₄²⁻ en aguas subterráneas de acuíferos alpujarrides del sector Sierra de Lújar, Alpujarras y Albuñol.

encontrado en piezómetros que alcanzan el acuífero confinado en este sector (INTECSA, 1990; Cardenal, 1993).

La surgencia de La Colorá es, además, un manantial termal. Las temperaturas medidas, en el período 1990-1992 (Cardenal, 1993), están comprendidas entre 25,6 y 26,0, a excepción de un valor anómalo de 26,5° C (coeficiente de variación inferior a 0,7 %), lo que supone del orden de 7° C por encima de la temperatura media anual del aire en el área donde aparece la surgencia. La temperatura de base del manantial ha sido calculada por Cruz-San Julián y Granda (1979), mediante la aplicación de diversos criterios geotermométricos hidroquímicos. Los métodos basados en el contenido en sílice (16 mg/l como media) ofrecen valores entre 28 y 56° C. Estos resultados son coherentes con el contenido en ¹⁸O de esta surgencia, dado que no se han apreciado fenómenos de intercambio isotópico agua-roca. Tales intercambios suceden a temperaturas superiores a los 80° C (Panichi y Gonfiantini, 1981).

El termalismo de este manantial evidencia, por tanto, una cierta circulación en profundidad y un ascenso, verosímilmente rápido, a favor de fracturas, como confirma su ubicación sobre la traza de una de ellas (esquema C: fig. 1).

Sistema Algarrobo-Tablones

La surgencia de El Algarrobo (n.º 4)

La facies hidroquímica es bicarbonatada cálcica y su mineralización total inferior a 0,4 g/l (conductividad eléctrica de 450 µS/cm de media). El coeficiente de variación de ambos parámetros es del 2 %. Sin embargo, considerando por separado cada ion, a excepción del HCO₃⁻ (270 mg/l y coeficiente de variación del 2,6 %), el resto de los iones posee una mayor variabilidad, con coeficientes cercanos al 10 % o incluso superiores. Esta mayor variabilidad se puede apreciar en los gráficos de distribución de frecuencias (fig. 8). Si bien el número de análisis disponibles en este punto es menor, es apreciable que aunque predominen, en líneas generales, las distribuciones unimodales, a excepción del SO₄²⁻, existe una mayor dispersión de los valores y aparecen pequeños máximos.

Las peculiaridades de la descarga de esta surgencia, como son las variaciones importantes de caudal, hasta el punto de que llega incluso a dejar de funcionar, o sus escasas reservas (sobre el nivel de la surgencia), han hecho pensar que El Algarrobo funciona como un aliviadero de este sector del acuífero, similar a un manantial tipo «trop plein» (Car-

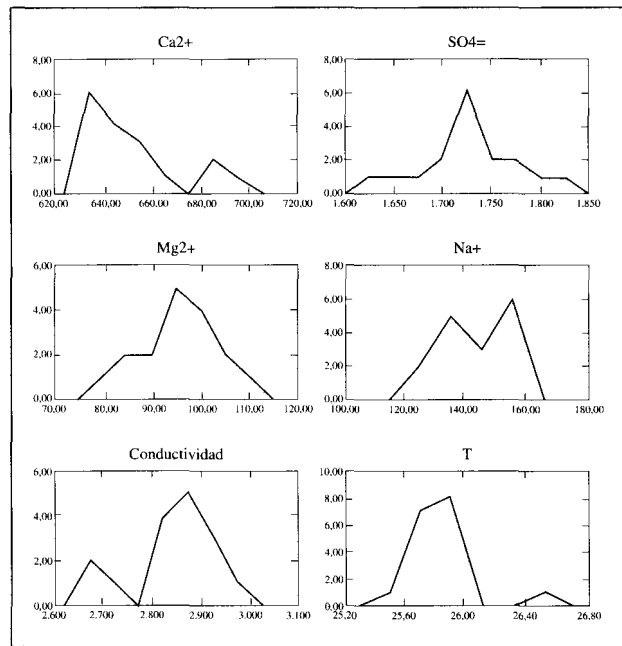


Fig. 7.—Distribución de frecuencias de los principales parámetros físico-químicos de la surgencia de La Colorá (n.º 10).

denal, 1993). Así, el flujo que alimenta esta surgencia sería más superficial que en el caso de las surgencias de Vélez de Benaudalla, por realizar una comparación con otro punto de similares características hidroquímicas. Ello sugiere que esta surgencia drena un sistema con menor volumen de reservas, cuyas aguas no tienen una composición química tan homogénea. En el corte B (fig. 1) se esquematiza la tipología de esta surgencia.

Las surgencias de El Castillejo-Tablones (n.º 7-n.º 22)

La facies hidroquímica del manantial de El Castillejo es bicarbonatada cálcico-magnésica, con una mineralización total inferior a 0,5 g/l. Si se comparan las características hidroquímicas del agua de esta surgencia con las de Vélez de Benaudalla y El Algarrobo, se aprecian unas concentraciones significativamente menores de Ca²⁺, HCO₃⁻ y SO₄²⁻ (48, 220 y 20 mg/l, como valores medios). Pero, por el contrario, son mayores los contenidos en Cl⁻ y Na⁺ (50 y 22 mg/l, respectivamente). Ello, posiblemente, refleja la litología de las rocas en que se realiza el flujo.

La variabilidad observada en los diferentes iones es escasa, salvo en el SO₄²⁻ y K⁺, lo que, unido al bajo coeficiente de variación de la mineralización (2 %), conduce a similares conclusiones que en el caso de las surgencias de Vélez de Benaudalla en lo

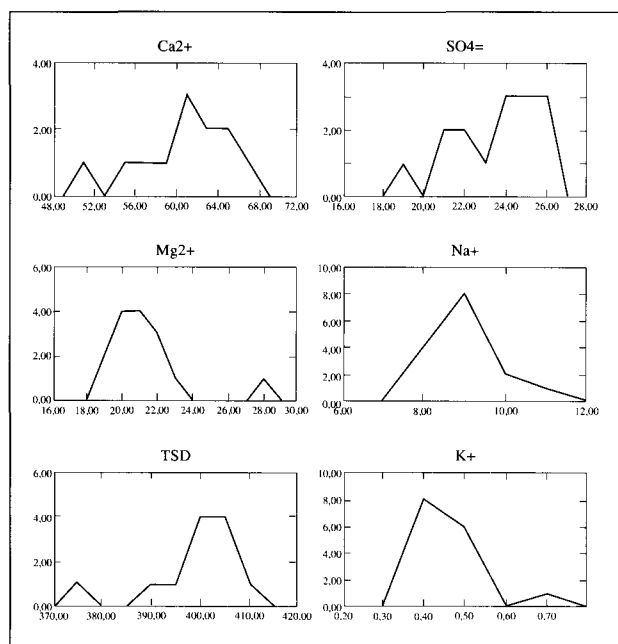


Fig. 8.—Distribución de frecuencias de los principales parámetros químicos en la surgencia de El Algarrobo (n.º 4).

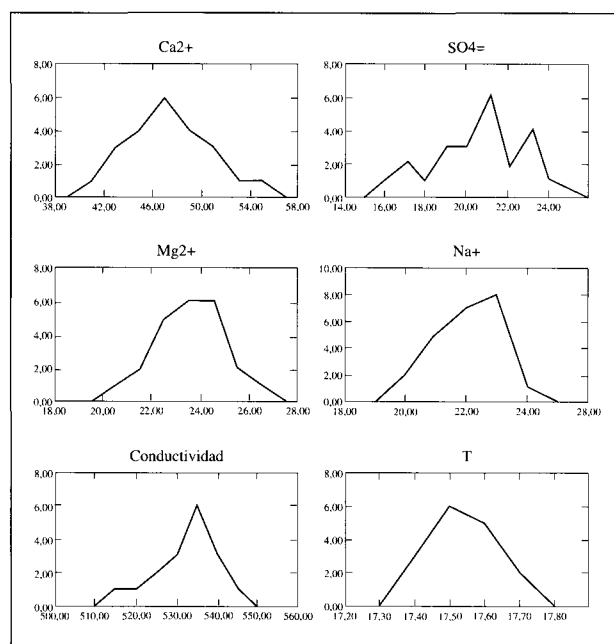


Fig. 9.—Distribución de frecuencias de los principales parámetros físico-químicos en la surgencia de El Castillejo (n.º 7).

que respecta al comportamiento hidrodinámico de los materiales carbonatados alpujárrides. Los gráficos de distribución de frecuencias de los principales parámetros físico-químicos muestran distribuciones unimodales, con mayor o menor grado de asimetría, salvo en el caso del ion SO₄²⁻, indicativos de un acuífero fisurado (fig. 9).

Las surgencias difusas (agrupadas con el n.º 22), situadas aguas arriba del Puente de Orgiva, en el denominado sector de Tablones, aportan un caudal visible conjunto muy reducido; sin embargo, las aportaciones ocultas hacia el río se han evaluado en torno a los 500 l/s. Las peculiaridades de esta área de descarga requieren que la mayor parte de la circulación se realice de forma más o menos superficial, a travéz tanto del acuífero aluvial como del carbonatado, y que proceda del propio río Guadalfeo, que en el sector aguas arriba de Tablones experimenta una disminución de caudal de 400 l/s (INTECSA, 1990), lo que plantea una situación hidrogeológica muy similar a la ya descrita en el sector de Rules.

La temperatura de surgencia ha variado entre 14,7 y 16,8° C, con máximos en verano y mínimos en invierno; de hecho, es la surgencia con mayor variabilidad en este parámetro. Este valor de la temperatura resulta muy bajo comparado con el resto de las surgencias que drenan el acuífero de la Sierra de Lújar.

La conductividad ha variado entre 820 y 870

µS/cm, con valores mínimos en los meses de mayo de 1991 y 1992, coincidentes con la época de deshielo.

La facies hidroquímica es clorurada-bicarbonatada cálcico-sódica. Se desconoce si en esta peculiar composición química puede influir la existencia del lavadero de mineral y la escombrera de la planta de tratamiento de Tablones, que ha estado funcionando hasta años recientes. Dicha composición es muy parecida al agua del sondeo de abastecimiento del poblado de Tablones (Benavente, 1982; Cardenal, 1993), el cual está ubicado en una posición alejada de la escombrera del mineral, por lo que parece más lógico atribuir esta composición a las características litológicas de este sector del acuífero. Otros puntos del borde N de la sierra, situados entre Orgiva y Rules, presentan también altos contenidos en Cl⁻ y Na⁺, hasta 70 y 40 mg/l, respectivamente (Carrasco, 1981). Como se ha indicado, se ha descrito la existencia de halita como inclusiones fluidas en las mineralizaciones de fluorita. Hay que indicar que esta surgencia presenta un alto contenido en F⁻ (600 µg/l).

A la vista de los gráficos de distribución de frecuencias de los principales parámetros físico-químicos de esta surgencia (fig. 10), se deduce una mayor heterogeneidad en su composición química, atribuible, como en el caso de Rules, a la influencia del río Guadalfeo, aunque el escaso número de medidas disponibles obliga a considerar con prudencia dicha interpretación. Datos de análisis de tritio en el sec-

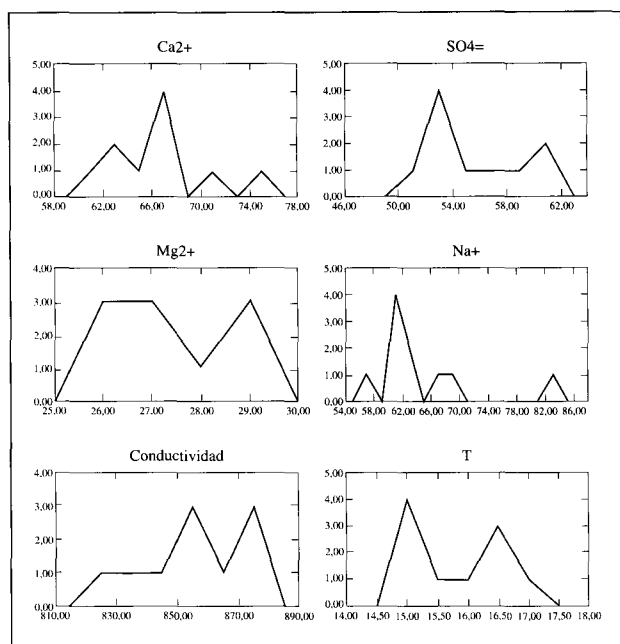


Fig. 10.—Distribución de frecuencias de los principales parámetros físico-químicos en la surgencia de La Raja-Tablones (n.º 22).

tor indican que el agua de la surgencia de Tablones es de infiltración reciente, diferente a la que puede considerarse como característica del acuífero (García-López *et al.*, en prensa), lo que también contribuye a relacionar esta área de descarga con la infiltración producida en el cauce del río Guadalfeo.

Otras surgencias relacionables con el «Epikarst» y con acuíferos de la unidad de Escalate

En el macizo carbonatado de la Sierra de Lújar es frecuente la presencia de surgencias a cotas sensiblemente superiores a las de los puntos significativos de drenaje, antes comentadas, cuyo origen hay que atribuirlo al «epikarst». Además, la formación carbonatada de la unidad de Escalate se presenta en afloramientos más o menos dispersos en los bordes W y S de la sierra. La escasa extensión sólo permite la existencia de pequeñas surgencias situadas, por lo general, en la base del material carbonatado, en contacto con las filitas infrayacentes. Estas surgencias presentan un reducido caudal, generalmente inferior a 1 l/s, que puede aumentar de forma considerable en momentos de fuertes precipitaciones.

El agua de estas surgencias presenta una facies bicarbonatada cálcica o cálcico-magnésica, con valores bajos de la mineralización total, entre 0,2 y 0,4 g/l.

Las temperaturas varían ampliamente entre 9 y

19° C, muy próximas, por tanto, a la temperatura media del aire en el sector, en función, claro está, de la cota del punto (desde 17-18° C, a cotas entre 200-300 m, hasta 10° C en las zonas de cumbre).

Un aspecto a destacar es el relativamente alto contenido en ion Cl⁻ que presentan las aguas de este tipo de surgencias (hasta 40 mg/l). En el caso de las surgencias de los bordes SW y S de la sierra, a escasos km del mar, es verosímil una aportación importante de este ion por parte de las aguas de precipitación. La precipitación presenta unos contenidos entre Cl⁻ entre 3-12 mg/l (con un valor medio en torno a 4,5 mg/l) en el pueblo de Vélez de Benaudalla y la cumbre de Los Pelaos, sin que se hayan apreciado variaciones significativas de este contenido con la altitud o con la cantidad precipitada. No obstante, se han detectado variaciones en función de la distancia al litoral; así, en el borde costero, en Motril, el contenido en Cl⁻ varía entre 7 y 37 mg/l (17 mg/l como valor medio), mientras que en sectores alejados, ya en la cuenca del Guadalfeo (Orgiva y Cádiar), la concentración es del orden de 3 mg/l (Cardenal, 1993; Cardenal *et al.*, 1994 b).

Por otro lado, en los acuíferos alpujárrides se ha detectado una correlación entre el contenido en Cl⁻ y Na⁺ y el F⁻ como resultado de la disolución de fluorita y halita, presente esta última en forma de inclusiones fluidas en la primera (Cardenal *et al.*, 1994 b). Pero, en este caso, los contenidos en F⁻ son bastante bajos (inferiores, en general, a 150 µg/l) en comparación con otros puntos del acuífero de la Sierra de Lújar, por lo que cabe suponer una mayor influencia de procesos de reconcentración previa de Cl⁻ de origen meteórico en la zona no saturada, tal y como los describe Antigüedad (1986) en el macizo de Aramotz en Vizcaya.

En la figura 11 se ha representado el contenido en Cl⁻ frente a la cota de surgencia de los manantiales comentados. En algún caso se ha asignado la cota media del afloramiento permeable (surgencias n.º 9 y n.º 41, en torno a 500 y 700 m s.n.m., respectivamente), que equivaldría a la cota a la que se produce la recarga. En el resto de los puntos, dada la escasa extensión del acuífero que drenan, la cota de surgencia debe ser muy próxima a la de recarga. Se aprecia claramente cómo hay un progresivo empobrecimiento en ion Cl⁻ a medida que aumenta la cota. Los procesos de reconcentración en el «epikarst» previos a la infiltración son más importantes cuanto mayor es la tasa de evapotranspiración, esto es, cuanto menor es la cota. La evapotranspiración puede alcanzar entre el 90 y 70 % de la precipitación a altitudes entre 150 y 700 m (Cardenal *et al.*, 1994 b). En la figura 11 se han incluido también dos puntos representativos del drenaje de la Sierra de Lújar (n.º 1 —Vélez— y n.º 7 —Castillejo—). Se

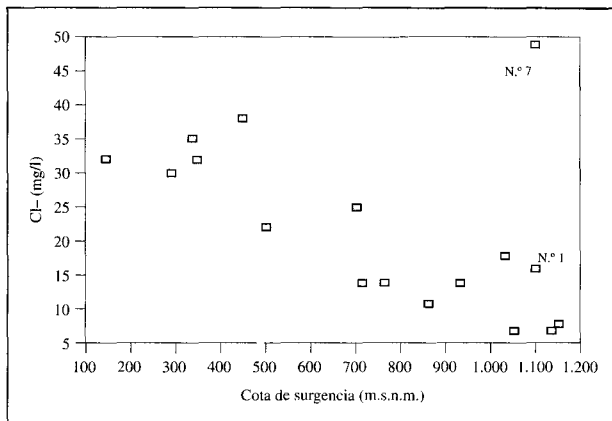


Fig. 11.—Contenido en Cl⁻ en surgencias de los bordes S, SW y E de la Sierra de Lújar en relación a la cota de surgencia (ver texto para más detalles). Se incluyen las surgencias n.ºs 1 y 7 que drenan el acuífero de la sierra de Lújar (se les ha asignado la cota media del afloramiento carbonatado de la sierra).

observa que mientras el punto n.º 1 se alinea con el resto de las surgencias, el manantial n.º 7 presenta un elevado contenido en Cl⁻ para la cota de recarga que le corresponde, por lo que el enriquecimiento en este ion se debe responder, principalmente, a un factor litológico.

Conclusiones

Se han caracterizado, desde el punto de vista hidroquímico, las aguas subterráneas del acuífero carbonatado de la Sierra de Lújar. La heterogeneidad litológica de los materiales que constituyen el acuífero condiciona una amplia variedad de facies hidroquímicas. Así, las aguas menos mineralizadas (TSD inferior a 0,5 g/l) están representadas por facies bicarbonatadas cálcicas y cálcico-magnésicas, resultado de la disolución del material carbonatado (calizas y dolomías). Por otro lado, aparecen facies sulfatadas cálcicas de mineralización relativamente elevada (del orden de 3 g/l), relacionadas con la disolución de material evaporítico (yeso), existente tanto en el material carbonatado como, principalmente, en el material metapelítico en el que en ocasiones se realiza el flujo. El punto más representativo de este tipo de facies es un manantial termal, que surge en el borde W de la sierra, donde el acuífero se encuentra confinado. Se ha detectado, además, un enriquecimiento en ion Cl⁻ en puntos de los bordes N y W del acuífero. Ello induce la aparición de facies mixtas, con una mineralización total moderada (TSD entre 0,6 y 1,1 g/l): clorurada-sulfatada (sector de Rules) y clorurada-bicarbonatada (sector de Tablones).

El ion Cl⁻ es aportado por distintos procesos, aun-

que el principal debe ser la disolución de halita asociada al material evaporítico. En otros casos hay que invocar para este ion un aporte meteórico y posterior reconcentración en el «epikarst», responsable de concentraciones de hasta 40 mg/l en surgencias situadas a cotas bajas, o bien la disolución de tramos mineralizados (fluorita), en los que se ha descrito la presencia de halita en inclusiones fluidas.

A partir del análisis de los gráficos de distribución de frecuencias de los principales parámetros físico-químicos y contenidos iónicos, se ha comprobado la existencia de un predominio de distribuciones unimodales, con mayor o menor grado de asimetría, o ligeramente bimodales. Estas curvas son propias de un acuífero carbonatado fisurado o débilmente karstificado, en el que, además, debe de haber un importante volumen de reservas, razones por las cuales la composición química es tan homogénea. Por otro lado, se ha identificado una significativa mayor variabilidad en dos puntos del acuífero (sector de Rules y Tablones), en los que la descarga visible es una fracción minoritaria de la descarga total, la cual se realiza subterráneamente a través de los aluviones del río Guadalfeo. En estos dos sectores se ha detectado una contribución importante del río Guadalfeo al caudal de las surgencias estudiadas. La mezcla de agua del acuífero con agua del río (de caudal y composición química muy variable a lo largo del año) da lugar a unos gráficos de distribución de frecuencias claramente plurimodales y muy diferentes de los encontrados en los otros puntos del acuífero. Estas conclusiones son coherentes con los datos hidrodinámicos, piezométricos, foronómicos e isotópicos obtenidos recientemente en el acuífero estudiado.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se ha desarrollado durante el disfrute, por parte de uno de nosotros (J. Cardenal), de una Beca del Plan de Formación de Personal Investigador del MEC. Además, este trabajo ha sido realizado con financiación parcial de la CICYT a través del proyecto NAT91-0598.

Referencias

- Aldaya, F., Martínez-García, E., Avidad, J., García-Dueñas, V., Navarro-Vilá, F., Gallegos, J., Díaz de Federico, A. y Puga, E. (1979). *Lanjarón, 1042, Mapa Geol. Esp. 1:50000 (2.ª Serie)*, IGME.
- APLITEG (1989). *Proyecto Presa de Rules-Informe geológico*. Informe técnico (inérito), INTECSA, 10 págs.
- Antigüedad, I. (1986). *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Nervión-Ibaizábal, Contribución a la investigación de los sistemas acuíferos kársticos*, Tesis Univ. País Vasco, 338 págs.
- Bakalowicz, M. (1979). *Contribution de la géochimie*

- des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification*, Tesis Doct. Univ. Pierre et Marie Curie, París, 269 págs.
- Benavente, J. (1982). *Contribución al conocimiento hidrogeológico de los acuíferos costeros de la provincia de Granada*, Tesis Univ. Granada, 435 págs.
- Benavente, J. y Carrasco, F. (1983). Datos hidrogeológicos sobre la Sierra de Lújar (Granada). Posibilidades de regulación, *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 7, Madrid, 287-298.
- Benavente, J., Cardenal, J., Cruz-San Julián, J.J., García-López, S., Araguás, L. y López-Vera, F. (1990). Content analysis of stable isotopes in aquifers from the coastal mountainous chain of Gádor-Lújar (Southeast Andalusia, Spain), *Memoires of the XXIInd Congress of IAH: Water Resources in Mountainous Regions*, 12, Lausanne, 415-424.
- Benavente, J., Cardenal, J., Cruz-San Julián, J. J. y Fernández-Gutiérrez, R. (1991). Exploitation effects in the Guadalfeo alluvial aquifer (Escalate Canyon area, Granada, Southeastern Spain), *XXIII Congreso AIH: Sobreexplotación de acuíferos*, Tomo 1, Puerto de la Cruz (Tenerife), 499-502.
- Benavente, J., Cardenal, J., Cruz-San Julián, J. J., García-López, S. y Nevot, A. (1993). Karstic hydrogeological investigations for the construction of the Rules reservoir (Granada, Spain), *In: Hydrogeological Processes in Karst Terranes*, Ed. Günay, G.; Johnson, A. I.; y Back, W.; IAHS Publ., n.º 207, 25-31.
- Campos, J. y Simancas, J. F. (1989). Los pliegues tumbados del manto de Lújar y su modificación por el sistema de cabalgamientos frágiles (Complejo Alpujárride, Cordillera Bética), *Geogaceta*, 6, 50-52.
- Cardenal, J. (1993). *Hidrogeología del sector Sierra de Lújar-Albuñol (provincia de Granada). Contribución de la hidrogeología al conocimiento de acuíferos carbonatados fisurados en áreas mediterráneas montañosas*, Tesis Doctoral Univ. Granada (inédita), 402 págs.
- Cardenal, J., Benavente, J., Cruz-San Julián, J. J. y Fernández-Gutiérrez, R. (1991). Estimación de parámetros hidráulicos en el acuífero aluvial del río Guadalfeo (provincia de Granada), *El Agua en Andalucía*, 1, 313-324.
- Cardenal, J., Benavente, J., Cruz-San Julián, J. J. y García-López, S. (1992a). Consideraciones sobre el origen de los recursos de los acuíferos de la cuenca de la rambla de Albuñol (Granada) a partir de datos regionales de isótopos ambientales. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, 17, 421-432.
- Cardenal, J., Benavente, J. y Cruz-San Julián, J.J. (1992b). Caracterización hidroquímica de las relaciones río-acuífero en la Sierra de Lújar (Granada). *Geogaceta*, 11, 59-60.
- Cardenal, J., Benavente, J. y Cruz-San Julián, J.J. (1994 a). Chemical evolution of groundwater in triassic gypsum-bearing carbonate aquifers (Las Alpujarras, South Spain). *Journal of Hydrology*, 161, 3-30.
- Cardenal, J., Benavente, J. y Cruz-San Julián, J.J. (1994 b). Contenido en cloruros de las precipitaciones al Sur de Sierra Nevada (Granada). Aplicación a la evaluación de recursos hídricos. *Geogaceta*, 16, 3-6.
- Carrasco, F. (1981). Características hidrogeológicas del borde Norte del acuífero calizodolomítico de la Sierra de Lújar. Su relación con el río Guadalfeo. *I Simposio sobre el Agua en Andalucía*, 1, 233-248. Granada.
- Cruz-San Julián, J.J. y Granda, J.M. (1979). Temperatura de base de las aguas termales de la provincia de Granada. *II Simposio Nacional de Hidrogeología*, 5, 547-568. Pamplona.
- Delgado, F., Estévez, A., Martín, J.M. y Martín-Algarra, A. (1981). Observaciones sobre la estratigrafía de la formación carbonatada de los mantos alpujárrides (Cordillera Bética). *Estudios Geológicos*, 37, 45-32.
- Estévez, A., Delgado, F., Sanz de Galdeano, C. y Martín-Algarra, A. (1985). Los Alpujárrides al Sur de Sierra Nevada. Una revisión de su estructura, *Mediterránea Ser. Geol.*, 4, 5-32.
- Estévez, A. y Martín Algarra, A. (1989). *Informe Geológico en relación con la construcción del embalse de Rules*. Informe técnico (inédito) para INTECSA, 7 págs.
- García-López, S., Cardenal, J., Cruz-San Julián, J. J. y Benavente, J. (en prensa). Natural and anthropogenic sources of tritium in carbonate aquifers to the south of Sierra Nevada (Spain), *Journal y Environm. Hydrolo.*
- Gervilla, F. (1985). *Las mineralizaciones de F-(Pb-Zn) del coto minero de Turón (Granada)*, Tesis Licenciatura Univ. Granada, 89 págs.
- Gonfiantini, R. (1981). The δ -notation and the mass-spectrometric measurement techniques. *In: Stable Isotope Hydrology. Deuterium and Oxigen-18 in the Water Cycle*, Technical Reports Series No. 210, Ed. Gat, J. R. y Gonfiantini, R., 35-84.
- IGME (1983). *Investigación hidrogeológica de las cuencas del Sur de España (sector occidental)*, Informe técnico (inédito).
- IGME (1985). *Estudio hidrogeológico de la cuenca del Guadalfeo y sectores costeros adyacentes*, Informe técnico (inédito).
- INTECSA (1990). *Proyecto Presa de Rules. Tomo-VII, Anejo n.º 9: Estudio hidrogeológico*, Informe técnico (inédito) para DGOH-CHSE.
- Kafri, U.; Arad, A. y Halicz, L. (1989). Fluorine occurrence in groundwater in Israel and its significance, *Journal of Hydrology*, 106, 109-129.
- López-Geta, J. A., Rubio, J. C., López-Arechavala, G., González-Fernández, I. y Linares, L. (1991). Investigación hidrogeológica para apoyo a la gestión hidrológica en la cuenca del río Guadalfeo (Granada), *III Simposio Agua en Andalucía*, Córdoba, 437-488.
- Morales Ruano, S., Fenoll Hach-Ali, P. y Gervilla, F. (1991). Inclusiones fluidas en fluoritas de los yacimientos estratoligados de Sierra de Lújar y Turón (SE de España). Nota preliminar, *Boletín Sociedad Española de Mineralogía*, 14, 93-94.
- Morell, I. (1976). *Estudio hidrogeológico del curso medio del río Guadalfeo (Granada)*, Tesis de Licenciatura (inédita) Univ. de Granada, 138 págs.
- Nieto, M. (1974). *Estudio hidrogeológico de la Rambla de Albuñol (Granada)*, Monografías de Geología, Univ. de Granada, 102 págs.
- Ovejero, G., Tona, F., Marín, J. M., Gutiérrez, A., Jacquín, J. P., Servajeán, G. y Zubiaur, J. F. (1982). Las mineralizaciones estratiformes F₂Ca-Pb en las dolomías triásicas de Sierra de Lújar, Granada (Cordilleras Béticas, España), *Bol. Geol. y Min.*, 93, 475-495.
- Panichi, C. y Gonfiantini, R. (1981). Geothermal waters, *In: Stable Isotope Hydrology. Deuterium and Oxigen-*

- 18 in the Water Cycle*, Technical Reports Series No. 210, Ed. Gat, J. R. y Gonfiantini, R., 241-272.
- Plummer, L. N. y Back, W. (1980). The mass balance approach: application to interpreting the chemical evolution of hydrologic systems, *American Journal of Sciences*, 280, 130-142.
- Siegenthaler, V. y Oeschger, H. (1980). Correlation of ^{18}O in precipitation with temperature and altitude, *Nature*, 285, 314-316.
- Shuster, E. T. y White, W. B. (1971). Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs: a possible means for characterizing carbonate aquifers, *Journal of Hydrology*, 14, 93-128.
- Touray, J. C. y Tona, F. (1974). Essai d'interprétation géodynamique d'une étude d'inclusions fluides; exemple pris en sierra de Lújar (Granada, Espagne), *Revue de Géographie Physique et de Géologie Dynamique*, 16, 71-74.

Recibido al 1 de agosto de 1994
Aceptado 4 de noviembre de 1994