

FE DE ERRATAS

En el proceso de impresión final de los dos artículos que se relacionan a continuación se produjeron varios errores que afectan a la presentación y comprensión de algunas de las ideas contenidas en dichos trabajos. Para subsanar esto, se ha procedido a una nueva impresión de las páginas que contienen errores de transcripción tipográfica en el artículo de J.G. Yélamos y E. Sanz Pérez (*Rev. Soc. Geol. España*, 11 (1-2), 151-167, 1998). En lo que se refiere al artículo firmado por M.A. Rodríguez-Pascua y G. De Vicente (*Rev. Soc. Geol. España*, vol. 11 (1-2), 169-180, 1998), los errores afectan a los símbolos de algunos de los parámetros estructurales descritos, apareciendo símbolos erróneamente expresados a lo largo de varias páginas del artículo. En los comentarios siguientes se exponen de forma más detallada los errores detectados y sus correcciones.

Correcciones a introducir en el artículo *Hidrogeología regional del acuífero cretácico de los manantiales termales de Alhama de Aragón (Zaragoza y Soria)*, por J.G. Yélamos y E. Sanz Pérez, publicado en la *Rev. Soc. Geol. España*, vol. 11 (1-2), 151-167 (1998).

página 160: pie de la Tabla IV algo modificado;
el símbolo 'ä' corresponde realmente a δ en los dos lugares en que aparece aquel signo en esta página.

página 161: pie de la Tabla V modificado;
incluye cabecera de Tabla; no existente en el artículo anteriormente impreso.

página 163: la ecuación correcta en la parte final de la página debe ser;

$$\alpha = \pi^2 T / 4 m_e L^2$$

Correcciones a introducir en el artículo *Análisis de paleoesfuerzos en cantos de depósitos conglomeráticos terciarios de la Cuenca de Zaorejas (Rama Castellana de la Cordillera Ibérica)*, por M.A. Rodríguez-Pascua y G. De Vicente, publicado en la *Rev. Soc. Geol. España*, vol. 11 (1-2), 169-180 (1998).

A lo largo de las páginas 174, 176, 177, 178 y 179, aparecen de forma equivocada los símbolos $\acute{o}_1, \acute{o}_2, \acute{o}_3, \ddot{o}_0, a^{\circ}_1, a^{\circ}_2, a^{\circ}_3, \acute{a}, \grave{i}_1, \grave{i}_2$. Dichos signos corresponden realmente a los siguientes símbolos estructurales:

$$\acute{o}_1, \acute{o}_2, \acute{o}_3 = \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3; \ddot{o}_0 = \phi; a^{\circ}_1, a^{\circ}_2, a^{\circ}_3 = \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3; \acute{a} = \alpha; \grave{i}_1, \grave{i}_2 = \mu_1, \mu_2$$

Los lectores interesados en obtener una copia completa corregida de este artículo pueden solicitarla al primero de los autores firmantes (M.A. Rodríguez Pascua, Dpto de Geodinámica, Facultad CC. Geológicas, Universidad Complutense, 28040 Madrid; e-mail: albosque@eucmax.sim.ucm.es).

Gradiente deducido $\delta^{18}\text{O} \text{‰}/100 \text{ m}$	Area de estudio	Características del muestreo	Referencia bibliográfica
- 0,15	Macizo de San Martín (Pirineo)	Precipitación, 8 muestras en tres puntos	López Martínez <i>et al.</i> (1984)
- 0,21	País Vasco	Mediana entre 359 pares de valores de precipitación	Iribar y Antigüedad (1996)
- 0,23	Sierra de Guadarrama (Madrid)	8 muestras de manantiales en hard rocks	Herráez (1983)
- 0,25	Península Ibérica en general	¿Estaciones de la O.I.E.A.?	Plata (1994b, p.94)
- 0,27	Macizo de la Garroba (Gerona)	Precipitación, 25 muestras en 3 puntos	Sanz <i>et al.</i> (1982)
- 0,28	Sierras de Gador y Lújar (Almería)	Correlación entre 7 manantiales y la altitud de su área de recarga	Benavente <i>et al.</i> (1990)
- 0,28	Sierras de Cazorla y Segura	Correlación entre 62 manantiales y la altitud de su área de recarga	Cruz-San Julián <i>et al.</i> (1990)
- 0,31	Sierras Blanca y Mijas (Málaga)	Precipitación, 25 muestras en 5 puntos	Andreo (1997)

Tabla IV.- Recopilación de valores de gradientes de O^{18} en función de la altitud para distintos puntos de la Península Ibérica.

de los 70 se obtienen de los estimados para la Meseta Central Española por Plata (1972, pp.55).

b) El Acuífero de Alhama obedece a un modelo de flujo tipo pistón. En el sector noroeste del acuífero hay un área de recarga localizada a cotas por encima de los 1100 m, desde donde el agua subterránea se va desplazando sin que apenas tengan lugar procesos de mezcla. De esta forma, el contenido de tritio en el agua subterránea está controlado únicamente por las leyes de la desintegración radiactiva.

En la figura 5 se representa por una línea continua los valores medios anuales de tritio en la precipitación (medidos y estimados) de la estación de Madrid, y mediante símbolos las rectas de la ecuación

$$\log C_t = \log C_0 - \frac{1}{12,48} (t - 1992)$$

Donde C_t es la concentración de tritio en la fecha t (anterior al muestreo); C_0 corresponde a la concentración de tritio en el muestreo de 1992, y 12,48 años el valor del período de semidesintegración del tritio. Tomando como inicio el valor de tritio obtenido en los Manantiales del Acuífero de Alhama en el muestreo de 1992 y admitiendo los dos supuestos anteriores, la intersección de las rectas de símbolos con la gráfica de precipitaciones (Fig.5) indicaría la fecha de recarga de las aguas.

Los manantiales de Alhama y Embid tienen aguas infiltradas en la primera mitad de la década de los 50. En cambio para Deza y San Roquillo cabe la posibilidad de que sean aguas recientes (década de los 80), o que también se infiltraran en los años 50. En cualquier caso, serían más recientes que las de Alhama o Embid, coherentemente con el sistema general de flujo.

Tomando en consideración que la mayor parte de las aguas del acuífero descargan en el grupo de manantiales de Alhama, y que es probable que se infiltraran entre 1952 y 1956, resulta una edad (el muestreo fue en 1992) de unos 36-40 años. Si además se tiene en consideración que la distancia media del centro de gravedad de la recar-

ga a los manantiales de Alhama es de unos 40 km, se obtiene una velocidad real del agua del orden de 1 km/año.

Análisis del oxígeno-18

Los cuatro grupos de manantiales presentan un contenido en ^{18}O similar, entre -8,5 y 9,0 ‰, a pesar de situarse a muy diferentes cotas: Deza, a 920 m, San Roquillo a 900 m, Embid, a 760 m y Alhama, a 660 m. Esta similitud de valores apoya la tesis de un área común de concentración de la recarga.

No se dispone de datos sobre el contenido en ^{18}O en las precipitaciones de la zona de estudio. Tomando como representativa la estación de Madrid (la única de la red de la A.I.E.A. en el interior de la península), la cual estuvo funcionando durante 1978-83, se obtiene un valor medio de $\delta^{18}\text{O}$ de -7,3 ‰, en el período de infiltración eficaz (otoño-invierno), según análisis de los datos por parte de Herráez *et al.* (1983).

La estación de Madrid se encuentra a una cota de 660 m. Corrigiendo el valor de -7,3 ‰ con un gradiente altitudinal de -0,2 a -0,3 ‰/100 m (basado en la recopilación de gradientes de la Tabla IV), cabe estimar que en la zona centro de la Península Ibérica, a cotas entre 1.100 y 1.200 m las precipitaciones en los meses de otoño-invierno tienen un $\delta^{18}\text{O}$ entre - 8,1-8,4 a - 8,5-8,8, valores entre los que se encuentran los manantiales del acuífero de Alhama.

A falta de una detallada información sobre el contenido en ^{18}O de las precipitaciones en la zona de estudio, la estimación realizada es coherente con la suposición de que la mayor parte de la recarga se concentra en el extremo noroccidental de los afloramientos de calizas cretácicas, en altitudes sobre los 1.100-1.200 m.s.n.m., en vez de ser una recarga homogéneamente distribuida a lo largo de toda la banda de calizas.

Hidrogeoquímica convencional

Para el estudio hidrogeoquímico se ha partido de 10 análisis de agua tomados en el período 1989-93 jun-

MANANTIAL	C. E. 25° C	pH	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	HCO ₃ ⁻	K ⁺	Na ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	SiO ₂	Error	Refer.
DEZA												
Suso	910	7,5	27	120	311	1	15	102	30	17	-0,2	(2)
Suso	842	7,4	32	173	390	1,3	49	137	35	3,5	4,7	(1)
Hocino	-	7,4	23	250	141	1,5	18	70	39	-	-3,9	
Hocino	-	-	23	276	213	2,2	18	115	37	-	-1,2	(3)
Hocino	940	7,7	35	231	347	3,4	25	119	60	4,5	2,1	(3)
Azañón	997	7,4	37	217	409	9,5	28	152	51	7,1	2,7	(1)
Suso	833	7,9	31	182	331	2	24	117	40	7,7	-1,4	(1)
Promedio de Deza		7,5	30	207	306	3	25	116	42	8	1,3	
SAN ROQUILLO												
S.R.	747	7,9	30	136	332	1,5	20	106	32	7,8	-2,6	(1)
S.R.	790	7,6	22	100	311	1	12	96	28	17	-2,0	(2)
S.R.1		-	21	140	173	1,8	17	60	36	-	3,2	(3)
S.R.2		-	20	136	303	2,5	16	103	36	-	3,0	(3)
S.R.3		-	27	101	192	2,6	16	72	25	-	3,3	(3)
S.R.	741	7,5	29	179	290	1,4	15	97	43	8	-2,7	(1)
S.R.	746	6,9	27	148	370	1,1	31	119	35	5,4	0,5	(1)
Promedio San R.		7,5	25	134	281	1,7	18	93	34	9,6	1,1	
EMBED												
Alberca	1110	7,6	87	180	287	3	48	110	37	13	-1,6	(2)
Alberca	1232	7,5	106	282	244	3,4	64	134	44	12	-1,0	(1)
Alberca	1146	7,7	91	235	347	4,1	64	129	54	6,5	1,8	(1)
Promedio Embid		7,6	95	232	293	3,5	59	124	45	10	1,1	
ALHAMA												
Guajardo	1110	7,6	98	150	287	4	53	108	37	15	0,6	(2)
F, pública	1150	7,2	104	180	281	3	58	106	37	13	-2,2	(2)
Lago	1120	7,3	98	160	281	3	54	100	36	13	-2,2	(2)
Baño del Rey	1110	7,3	99	160	287	2	53	101	36	15	-2,8	(2)
Pallarés	1110	7,3	99	180	281	2	54	104	37	13	-2,9	(2)
Pallarés	1247	7,7	93	292	325	3,8	58	140	54	12	-2,0	(1)
Promedio Alhama		7,4	98	187	290	3	55	110	40	13	-0,6	

Tabla V.- Composición química en las aguas de los manantiales del acuífero de Alhama. (1) Análisis de este trabajo. (2) IGME (1985a). (3) Álvarez *et al.* (1983). Valores en mg/l excepto la conductividad eléctrica (C.E.) en μ S y el pH.

to con otros 15 obtenidos de trabajos previos (IGME, 1985a; Álvarez *et al.*, 1983). Calculando el error en el balance de aniones-cationes mediante la siguiente fórmula (Lloyd y Heathcote, 1985, pág. 101):

$$E(\%) = \frac{\sum \text{eq cationes} - \sum \text{eq aniones}}{\sum \text{eq cationes} + \sum \text{eq aniones}} \times 100$$

se han descartado aquellos análisis con un error relativo superior al 5 % (dos de los análisis recogidos de la bibliografía). Los restantes aparecen en la Tabla V junto con los valores medios para cada uno de los cuatro grupos de manantiales. La figura 6 muestra un perfil hidrogeoquímico donde, junto a los diagramas de Stiff para valores medios de los cuatro grupos de manantiales, también se indican los valores de temperatura, concentración de SiO₂ y composición isotópica.

La temperatura de los manantiales es coherente con el modelo general de flujo de NW a SE, aumentando hacia los manantiales más alejados del área de recarga: en torna a 19 °C en Deza y San Roquillo, 28 °C en Embid y un promedio de 33 °C en Alhama.

La composición química no muestra grandes variaciones entre los distintos grupos de manantiales. Se

trata de aguas de facies bicarbonatada cálcica o bicarbonatada sulfatada cálcica con salinidades entre 590 y 890 mg/l de total de sólidos disueltos. Los valores de pH también son similares, entre 7,4 y 7,6 de valor medio para cada grupo de manantiales.

La facies hidroquímica bicarbonatada cálcica es la predominante, lo cual se asocia a la propia litología calcárea del acuífero de Alhama. Dentro de éstas rocas aparecen dolomías, las cuales pueden suponer la fuente del magnesio (34-45 mg/l de media).

Los equivalentes de Cl⁻ y Na⁺ son bastantes similares en los cuatro grupos de manantiales, lo que invita a suponer que su origen está asociado a la disolución de halita. La cartografía geológica superficial no indica un contacto directo entre las calizas cretácicas y los sedimentos de la facies Keuper, pero no sería extraño que éste se diera a través de fracturas, de manera que en algunos puntos, el borde impermeable oriental del acuífero fuera el Keuper en vez de las arenas y margas del Cretácico Inferior, en el cual es frecuente la presencia de sales

A medida que aumenta el tiempo de permanencia del agua en el acuífero hay un incremento en los

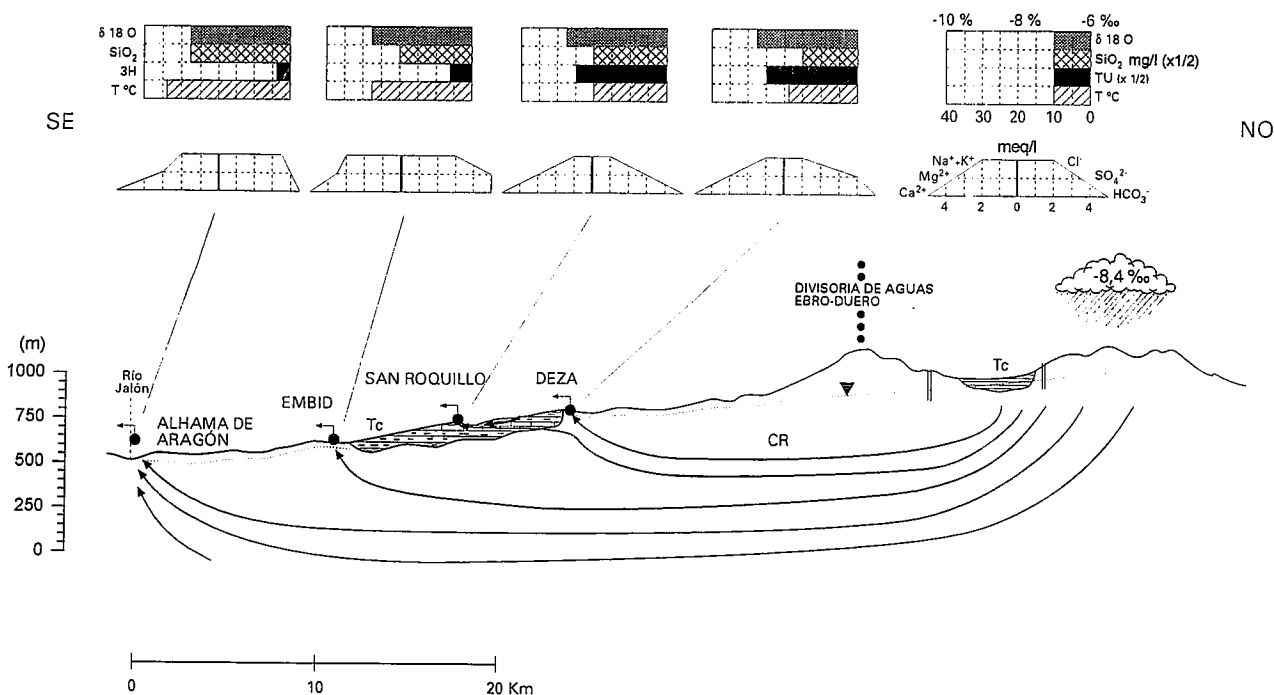


Figura 6.- Perfil hidrogeoquímico en el sector NO del acuífero de Alhama CR: acuífero cretácico. Tc: Terciario (arcillas impermeables). TI: Terciario (calizas karstificadas que descargan en los manantiales de San Roquillo).

desde el centro de gravedad de la recarga hasta los manantiales de Alhama, que viene a ser de unos 40 km.

A partir de la información proporcionada por la cartografía geológica existente, apoyada en parte por diversas prospecciones de sísmica de reflexión realizadas en la zona para investigaciones petrolíferas y por otros trabajos hidrogeológicos donde se ha utilizado gravimetría, sondeos eléctricos verticales y sondeos electromagnéticos en el dominio de los tiempos (Junta de Castilla y León, 1989; Aracil *et al.*, 1993), la base del acuífero de Alhama se sitúa entre 400 y 1.300 m; en la vertical del límite entre los materiales terciarios y cretácicos, y a unos 2 o 3 km más hacia el suroeste de este contacto, la base se encuentra entre 500 y más de 2.000 m, dependiendo de las zonas (Fig. 2). Esta profundidad es mayor en los extremos del acuífero y menor en las proximidades de Alhama, y rápidamente alcanza profundidades mayores hacia el centro de la Cuenca de Almazán situada al suroeste (Bond, 1996).

Estos importantes espesores justifican el termalismo de los manantiales de Alhama, mediante circulación profunda de aguas meteóricas con un gradiente geotérmico normal (2 - 3 °C/100 m), sin necesidad de suponer la existencia de un foco de calor en la base del acuífero. A efectos del modelo conceptual, se supone que el espesor medio del acuífero calcáreo es de un millar de metros.

Estimación de los parámetros hidráulicos medios del Acuífero de Alhama

El alto tiempo de permanencia del agua en el Acuífero de Alhama más la ausencia de formas

karstísticas indican que tiene un comportamiento hidráulico más parecido al de un acuífero con porosidad intergranular que a un acuífero con permeabilidad por karstificación y baja capacidad de regulación, a pesar de estar formado por rocas calcáreas. Por tanto cabe aplicar la ley de Darcy:

$$Q = S \frac{\Delta h}{\Delta l} K$$

donde Q es el caudal en el sector norte (450 l/s), S la superficie obtenida por el ancho del acuífero (1.330 m) multiplicada por un espesor de un millar de metros y $\Delta h/\Delta l$ el gradiente hidráulico indicado en el apartado previo. Con estos valores se obtiene una permeabilidad media de 5,5 m/día, una velocidad de Darcy (V_D) de 0,03 m/día y una transmisividad de 5.500 m²/día.

Por otro lado, a partir de la velocidad estimada por los valores de tritio en Alhama (1 km/año) resulta una porosidad eficaz de 1,1 %, dentro del margen posible (1 - 2,4 %), según recopilación de valores por Castany (1984) para acuíferos calcáreos con permeabilidad por fracturación (pero no por karstificación).

Con los parámetros anteriores también se puede calcular el coeficiente de agotamiento de los manantiales de Alhama (∞) a partir de la fórmula:

$$\alpha = \frac{\pi^2 T}{4meL^2}$$

Así mismo, se puede estimar su volumen hidrodinámico ($V_n = Q/\infty$) y lo que pudiéramos denominar «vida media» (t_m) del manantial definido por el tiempo que tardaría el mismo en reducir su caudal a la mitad, en el supuesto de que el acuífero no recibiese ninguna recarga.