HIDROGEOLOGÍA REGIONAL DEL ACUÍFERO CRETÁCICO DE LOS MANANTIALES TERMALES DE ALHAMA DE ARAGÓN (ZARAGOZA Y SORIA)

J. G. Yélamos [1] y E. Sanz Pérez [2]

[1] *Departamento de Q.A. Geología y Geoquímica. C-VI. Facultad de Ciencias. Universidad Autónoma de Madrid. 28049-Madrid.*
[2] *Departamento de Ingeniería y Morfología del Terreno. Escuela. Técnica. Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Ciudad Universitaria. 28040-Madrid.*

Resumen: Los Manantiales termales de Alhama de Aragón son las principales surgencias termales (temperatura de 32-35 °C y caudal de 500 l/s) de toda la Península Ibérica. Integrando distintos datos de partida como: (1) geometría en profundidad del acuífero (basada en geofísica profunda) y en superficie (cartografía geológica convencional) del acuífero (2) análisis de hidrogramas de la descarga de los manantiales (3) estudio de la recarga por métodos hidrometeorológicos clásicos y (4) hidroquímica convencional e isotópica, se elabora un nuevo modelo conceptual del acuífero al que pertenecen los manantiales termales de Alhama. Según este modelo el acuífero de Alhama de Aragón está formado por una banda de calizas cretácicas de la rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica, de dirección NO-SE y con una especial geometría: 100 km de largo, 1,3 km de ancho y varios cientos de metros de espesor. La recarga del acuífero se concentra en el extremo noroccidental de la banda. Esta geometría en forma de tubo prismático alargado, junto con la concentración de la recarga y el escaso desarrollo de la karstificación, dan lugar a que el acuífero presente un alto grado de regulación, con velocidades reales de las aguas subterráneas en torno a 1 km/año.

Palabras clave: Acuífero de Alhama de Aragón, análisis de hidrogramas, hidrogeoquímica convencional e isotópica, aguas termales.

Abstract: The Alhama de Aragon thermal springs, with a temperature of 32-35 °C and a flow rate of 500 l/s are the largest in the Iberian Peninsula. By integrating data such as: (1) geometry at depth of the aquifer (on the basis of deep geophysics) and at the surface (from conventional geological mapping), (2) hydrographic analysis of the aquifer discharge, (3) study of the recharge by classic hydrometeorological methods, and (4) conventional and isotopic hydrogeochemistry, a new model is proposed for the aquifer which belongs the Alhama termal springs. According to the proposed model, Alhama aquifer is formed of a fringe of Cretaceous limestone in the Aragonesa branch which shows a peculiar geometry: 100 km in length, 1.3 km in width and several hundred meters in depth. Aquifer recharge is concentrated in the NW side of the limestone fringe. This geometry (lengthened prismatic pipe) together with the recharge concentration and the scarce development of the karstification results in a high regulating capacity of the aquifer, with groundwater real velocity about 1 km/year.

Key words: Alhama de Aragón aquifer, hydrograph analysis, elemental and isotopic hydrogeochemistry, thermal waters.

Yélamos, J. G. y Sanz Pérez, E. (1988): Hidrogeología regional del acuífero cretácico de los manantiales termales de Alhama de Aragón (Zaragoza y Soria). *Rev.Soc.Geol.España*, 11 (1-2): 151-167

En este trabajo se presenta una investigación sobre el origen de las surgencias termales de Alhama de Aragón y las características del acuífero que las alimenta. El estudio se apoya en la interrelacción de datos de distinta procedencia: geometría del acuífero (geología superficial y prospección geofísica profunda), hidrogeoquímica convencional e isotópica (tritio y oxígeno-18), análisis de hidrogramas en curvas de cursos superficiales y evaluación de la recarga del acuífero basada en datos hidrometereológicos.

El considerable caudal de los manantiales termales de Alhama de Aragón (un total de 500 l/s) ha sido aprovechado por importantes balnearios especialmente desde el siglo XIX. Actualmente existen cuatro establecimientos denominados Cantarero, Guajardo, Termas Pallares y Baños Viejos de San Roque, este último con una galería de baños construida en 1112 (Sánchez Ferre, 1992).

La Tabla I recoge los valores de temperatura y caudal para los principales manantiales termales de la

Manantiales termales	Provincia	Temperatura °C	Caudal (l/s)	Referencia bibliográfica
España				
Arteixo	La Coruña	42	35	ITGE (1993, p.167)
La Toja	Pontevedra	37-60	37	ANPAM
Las Burgas	Orense	64	30	ITGE (1993, p.167)
San Juan de Baños	Orense	47	20	ANPAM
Prexigueiro	Orense	39	15	ANPAM
Carballino/Partovia	Orense	37	120	Sánchez Ferre (1992)
Caldas de Besaya	Santander	35-37	11,6	Armijo (1968, pp.393)
Puente Viesgo	Santander	35	15	ANPAM
Unidad Mofrechu	Asturias	30	30	ITGE (1993, p.179)
Fitero	Navarra	46	40	SGOP-DFN (1982)
Arnedillo	La Rioja	52,5	20	Coloma *et al.* (1995)
Caldas de Montbuy	Barcelona	55-70	20	ANPAM
Alhama de Almería	Almería	45	15	ANPAM
Sierra Alhamilla	Almería	57	14	IGME (1985b, p.194)
Alhama de Granada	Granada	47-49	86	Yepes (1990)
Sierra Elvira (*)	Granada	32	200	Cruz-San Julián *et al.* (1979)
Alicún de las Torres	Granada	34	80	Cruz-San Julián *et al.* (1979)
Baños de Zujar	Granada	38	180	Cruz-San Julián *et al.* (1979)
Archena	Murcia	52	41	Armijo (1968, p.392)
Fortuna	Murcia	45	14	Masager y Gea (1953)
Baños de Mula	Murcia	36	83	ANPAM
Mina Feli	Salamanca	35	30	IGME (1985a)
Jaraba	Zaragoza	29-34	17	IGME (1985a)
Alhama de Aragón	Zaragoza	32-35	500	Presente estudio
Portugal	**Distrito**			
Caldas Monchique	Faro	27-32	11,8	Lopes Paradela *et al.* (1982, p.14)
Caldas da Rainha	Leiria	33	20	Lopes Paradela *et al.* (1982, p.19-20)
San Pedro do Sul	Viseu	37-68	10	Lopes Paradela *et al.* (1982, p.54)

(*) Caudal nulo en la actualidad, según Cerón y Castillo (1996).
ANPAM: Archivo Nacional de Puntos de Agua Minerales y Mineromedicinales del ITGE.

Tabla I.- Principales manantiales termales de la Península Ibérica: caudal mayor que 10l/s y temperatura superior a 30°C

Península Ibérica (caudal mayor o igual a 10 l/s y temperatura superior a 30 °C). Para la elaboración de la Tabla I, además de los trabajos que aparecen indicados en la columna del origen de la información, se han consultado cerca de medio centenar de publicaciones. También se revisó el Archivo de Aguas Minerales y Mineromedicinales del Instituto Tecnológico GeoMinero de España (ANPAM), los manantiales del su Inventario General de Puntos de Agua, así como los apartados de hidrogeología de las memorias de 150 mapas geológicos a escala 1:50.000 (la primera serie). Por tanto, es poco probable que falte algun manantial termal importante en esa recopilación.

La información recogida en la Tabla I indica que los manantiales de Alhama de Aragón son las surgencias mesotermales (32-35° C) con mayor caudal de la Península Ibérica (500 l/s). Aunque existen manantiales con el doble de temperatura que los de Alhama de Aragón, como las Burgas de Orense, La Toja o las Caldas de San Pedro do Soul, en ningún caso su

caudal supera los 40 l/s: menos del 10% del caudal total del grupo de manantiales que nos ocupan. Además, los manantiales de Alhama de Aragón descargan el doble de agua que las surgencias mesotermales (30-35 °C) de los Baños de Zújar o Sierra Elvira, las cuales serían las segundas en importancia, si se tienen en consideración tanto la temperatura como el caudal de las surgencias.

Marco geológico

Los manantiales termales de Alhama y su entorno se localizan sobre calizas de edad cretácica en el sector central de la Cordillera Ibérica. Esta cadena montañosa se suele subdividir, desde el punto de vista geológico, en dos grandes ramas:

a) Rama Aragonesa, constituida por un zócalo paleozoico y una cobertera de edad triásica y cretácica.

b) Rama Castellana, formada fundamentalmente por sedimentos del Triásico y Jurásico.

La separación de la Cordillera Ibérica en estas dos unidades no es tanto debida a importantes diferencias de estructura y litología, como a que se encuentran separadas por la cuenca sedimentaria de Almazán. Ésta es una cubeta rellena de sedimentos paleógenos (pre y sinorogénicos) y neógenos (post-alpinos). Los manantiales de Alhama se encuentran justo en el límite entre la rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica y la cuenca de Almazán.

Litología, estratigrafía y estructura del Acuífero de Alhama

El grupo de manantiales termales de Alhama de Aragón está asociado a la Falla de Alhama que pone en contacto el Terciario del borde noreste de la Cuenca de Almazán con una banda calcárea cretácica de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica (Fig. 1), en la que se sitúa el acuífero objeto de este trabajo y al que denominaremos Acuífero de Alhama. Relacionados con esta misma falla o con los materiales cretácicos hay otros tres grupos de manantiales: Embid de Ariza, San Roquillo y Deza. La dirección NO-SE de la falla y del afloramiento cretácico carbonatado coincide con las directrices geológicas de la Cordillera Ibérica; esta circunstancia y la topografía condicionan la orientación principal del flujo del agua subterránea, de NO al SE, desde la altimeseta soriana (Cuenca hidrográfica del Río Duero) hasta el valle del Río Jalón (Cuenca hidrográfica del Río Ebro), atravesando esa divisoria hidrográfica superficial (Duero-Ebro) de primer orden.

Los materiales cretácicos están constituidos de base a techo, por areniscas cuarcíferas en facies Utrillas sobre las que se apoyan 40 m de arcillas y calizas cenomanienses de carácter poco permeable. Encima aparecen 335 m de calizas permeables del Cenomaniense, Turoniense y Senoniense (Lendínez y Ruiz 1991; Lendínez y Martín, 1991; Navarro 1991a, 1991b) que son las que constituyen el Acuífero de Alhama. Las areniscas en facies Utrillas se sitúan en discordancia sobre materiales triásicos en facies germánicas: Keuper arcilloso y yesífero, Muschelkalk dolomítico y Buntsandstein formado por areniscas y lutitas (Rey y Ramos, 1991). Tanto los sedimentos de facies Utrillas como los del Keuper constituyen la base impermeable del acuífero (Fig.2), y estos últimos también forman una barrera impermeable en el límite oriental del acuífero.

Los materiales de edad paleógena de la cuenca de Almazán (sector oriental) están constituidos por conglomerados, arcillas, areniscas, calizas, margas y yesos, con unos 1.000 m de espesor total. Se disponen en discordancia progresiva sobre las calizas cretácicas (Guisado *et al.*, 1988) aunque, en otros casos, el contacto entre los sedimentos cretácicos y el resto de las formaciones terciarias es mediante la importante Falla de Alhama.

El conjunto de materiales paleógenos ha de considerarse como bastante poco permeable y las litologías más impermeables suelen estar, precisamente, en contacto con los sedimentos del Cretácico calcáreo, dando lugar al límite occidental del Acuífero de Alhama. Según un amplio inventario de puntos de agua realizado en los depósitos terciarios (SGOP, 1990a; Junta de Castilla y León, 1991), los sondeos perforados en los sedimentos del Paleógeno de la región noreste de la Cuenca de Almazán suelen tener una profundidad media de 100 m y un caudal inferior a 0,5 l/s, aunque también hay otros que están secos o tienen un caudal insignificante, como ocurre en algún sondeo de 400 m de profundidad.

Los materiales del Neógeno de la cuenca de Almazán están constituido por sedimentos arcillosos, alcanzando un gran espesor. Sobre la base de esos mismos inventarios de puntos de agua e informes, el pequeño caudal de los escasos sondeos perforados en esta litología confirma su baja permeabilidad. Localmente, aparecen calizas con permeabilidad por karstificación, interestratificadas en los sedimentos del Neógeno.

Los sedimentos del Cretácico están dispuestos en sucesivos y apretados pliegues concéntricos de dirección NO-SE, muchos de los cuales están afectados por cabalgamientos con vergencia al NE. Estas fallas dividen y compartimentan la banda cretácica calcárea aunque no llega a perder su continuidad (Fig. 1 y 2). Las dos fallas más importantes de la zona son del mencionado estilo: Falla de Alhama y Falla de San Saturio (Aracil *et al.*, 1993), donde el nivel de despegue principal son los materiales del Keuper y, secundariamente, los de la facies Utrillas. La banda de calizas cretácicas se prolonga 60 km hacia el noroeste de la zona de surgencia de los manantiales termales de Alhama. En su extremo NO se introduce bajo los sedimentos del Terciario, aunque surge de ellos en forma de dos cúpulas anticlinales una vez pasada la importante Falla de San Saturio. Hacia el sureste de los manantiales de Alhama, el acuífero se extiende otros 20 km conservando la misma disposición estructural.

Los cortes geológicos que se presentan en la Fig.

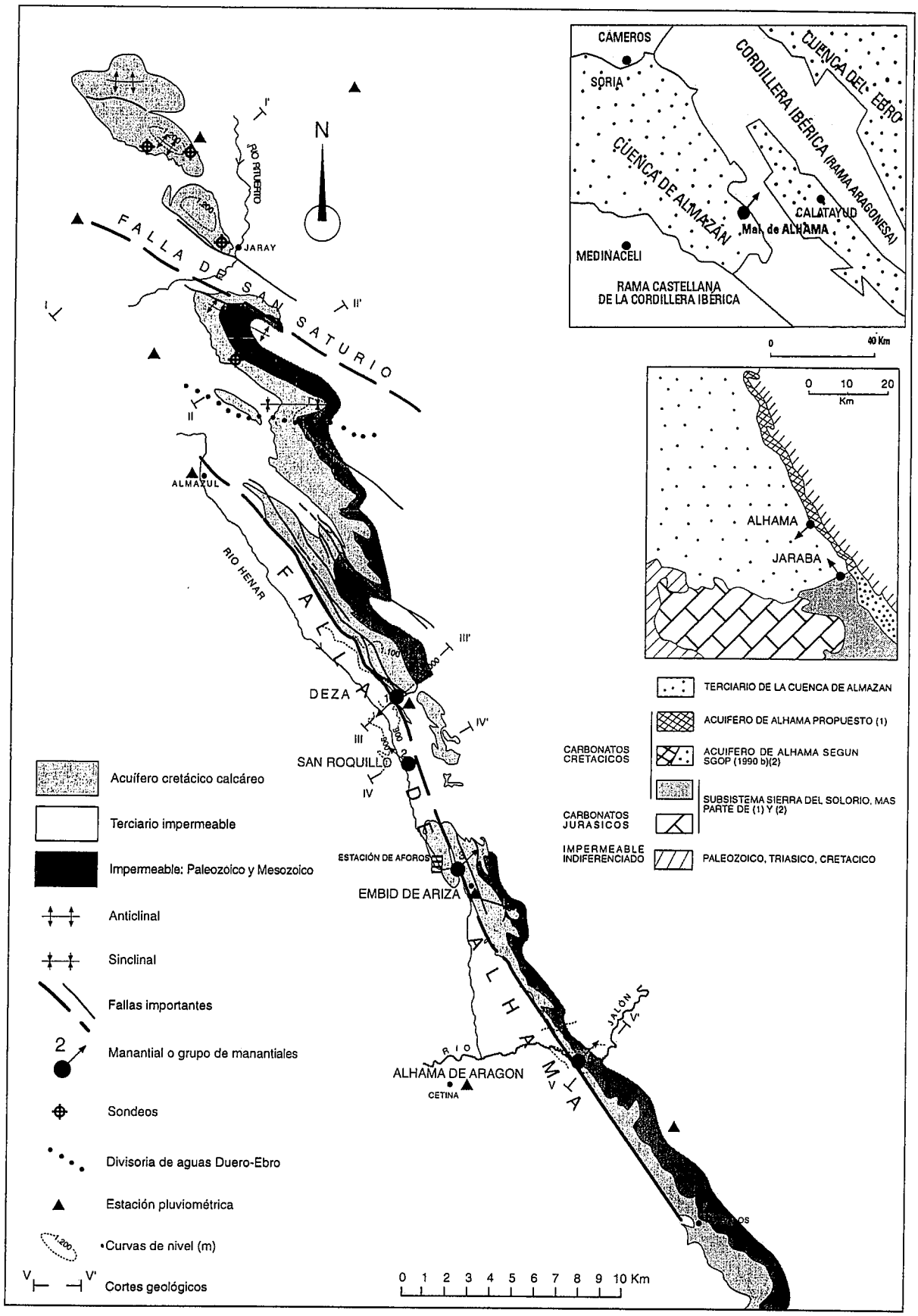

Figura 1.- Mapa del acuífero calcáreo de Alhama de Aragón y situación general de la zona de estudio, con indicación de la situación de los perfiles geológicos mostrados en la figura 2.

2 están apoyados en una prospección geofísica realizada en la zona (Aracil *et al.*, 1993), en la que se ha detectado la Falla de Alhama que se prolonga a más de 1.500 m de profundidad.

Antecedentes

El primer estudio de carácter hidrogeológico y el único que se centra exclusivamente en los manantiales termales de Alhama, es el de Hernández-Pacheco (1954). Para explicar el origen de los manantiales termales propuso un esquema a gran escala de acuerdo con los conocimientos hidrogeológicos de la época. Todos los materiales calcáreos de la Cordillera Ibérica (tanto cretácicos como jurásicos) formarían un único acuífero. La base impermeable del acuífero la definirían los materiales palezoicos (pizarras, esquistos, grauvacas, etc.) así como las arcillas y yesos del techo del Triásico. Este único acuífero calcáreo estaría confinado debajo de los sedimentos terciarios de la cuenca de Almazán, pero sus aguas emergerían en superficie por la barrera impermeable que haría el afloramiento de materiales palezoicos asociados a la Falla de Alhama. El mismo autor indica dos sentidos generales del flujo de las aguas subterráneas: a) principal, responsable de las aguas termales, de sentido oeste a este, desde la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica hacia la Rama Aragonesa, b) secundario, dentro de la banda de materiales cretácicos asociados a la Falla de Alhama, de sentido general noroeste a sureste. Este modelo ya aparece esbozado en un trabajo anterior sobre la relación entre la tectónica y las aguas minero-medicinales de la península Ibérica (Hernández Pacheco, 1949).

Sánchez Navarro *et al.* (1987), en un estudio a gran escala sobre la génesis de las aguas termales de la provincia de Zaragoza, mantienen la tesis de que la recarga de los manantiales de Alhama se sitúa en la extensa paramera de calizas jurásicas de la rama Castellana y que las aguas de Alhama provendrían de circulación profunda bajo la cuenca de Almazán.

Los estudios a gran escala del PIAS (Plan de Investigación de Aguas Subterráneas del IGME) incluyen el sector sureste del Acuífero de Alhama propuesto como parte del gran Sistema Acuífero denominado «Sierra del Solorio» (IGME, 1982) formado por una superficie de unos 1.000 km^2 de calizas de edad jurásica (principalmente) y cretácica de la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica. Los manantiales de Alhama fueron un punto de la red de control forónomico del IGME durante 1979-81; mediante aforos diferenciales en el río Jalón (aguas arriba y aguas abajo de los manantiales) se obtiene un caudal medio de 500 l/s (Murillo y de la Orden, 1995). El mismo valor se obtuvo en un aforo realizado por los autores en un momento en que el río Jalón estaba seco antes de llegar a Alhama.

En trabajos hidrogeológicos de mayor detalle, pero limitados a la hidrogeología de la provincia de Soria (ITGE, 1989; SGOP, 1990a; Sanz *et al.*, 1992)) al tercio más occidental del acuífero se le denomina

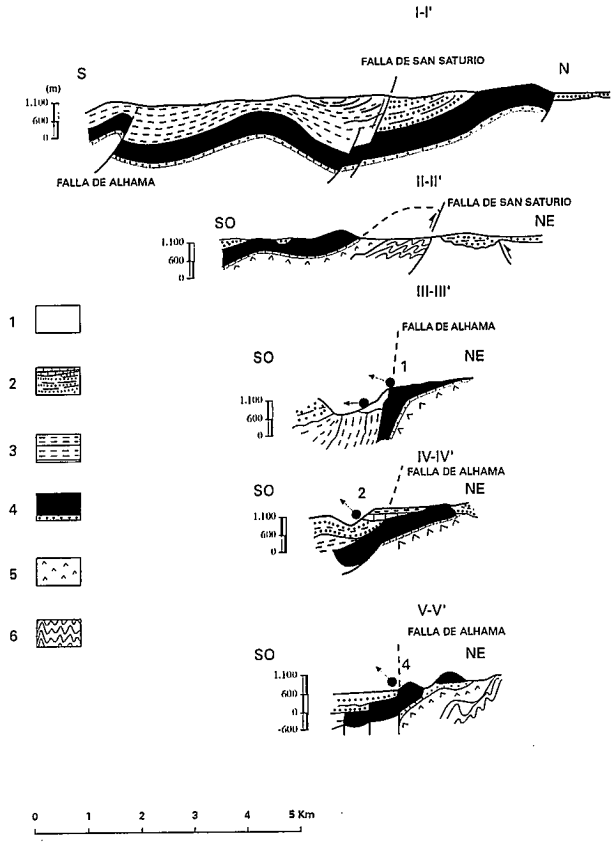

Figura 2.- Cortes geológicos del acuífero de Alhama (ver situación en figura 1). 1) Cuaternario: travertinos. 2) Neógeno: arcillas, arenas arcillosas, margas y calizas. 3) Paleógeno: arcillas, conglomerados, areniscas, margas y yesos. 4) Cretácico: calizas y areniscas (facies Utrillas). 5) Triásico: arcillas, yesos y sales (facies Keuper). 6) Paleozoico: pizarras y cuarcitas.

acuífero de Deza o de Sierra Miñana (oficialmente, unidad hidrogeológica 09.00.02), asignándole (sólo este sector) unos recursos de 3 hm^3/año. En estos trabajos ya se abandona el modelo propuesto por Hernández-Pacheco (1954), limitando el acuífero a su extensión en planta y también se reconoce que el sentido principal del flujo subterráneo es de noroeste hacia sureste.

El estudio previo más específico que parece existir sobre la hidrogeología de los manantiales termales de Alhama es el presentado en SGOP (1990b). En éste se divide el sistema de la Sierra de Solorio en dos unidades: a) Acuífero del Solorio de 996 km^2 de extensión, formado principalmente por sedimentos jurásicos (en mucha menor medida cretácicos), y con los principales drenajes por los manantiales de Cimballa, Mochales y Jaraba, y b) Acuífero de Alhama, formado por la banda de calizas cretácicas que aparece en la figura 1, pero prolongándolas hacia el SE hasta abarcar una superficie total de 267 km^{2}y con el drenaje principal en los manantiales termales de Alhama, donde una red de aforos diferenciales durante el periodo 1987-88 dio un caudal medio de 354 l/s. Aunque en el trabajo se incluye la Sierra de Miñana como parte del acuífero de Alhama, se supone que un gran porcentaje de la descarga de Alhama procede a partir de recarga lateral del

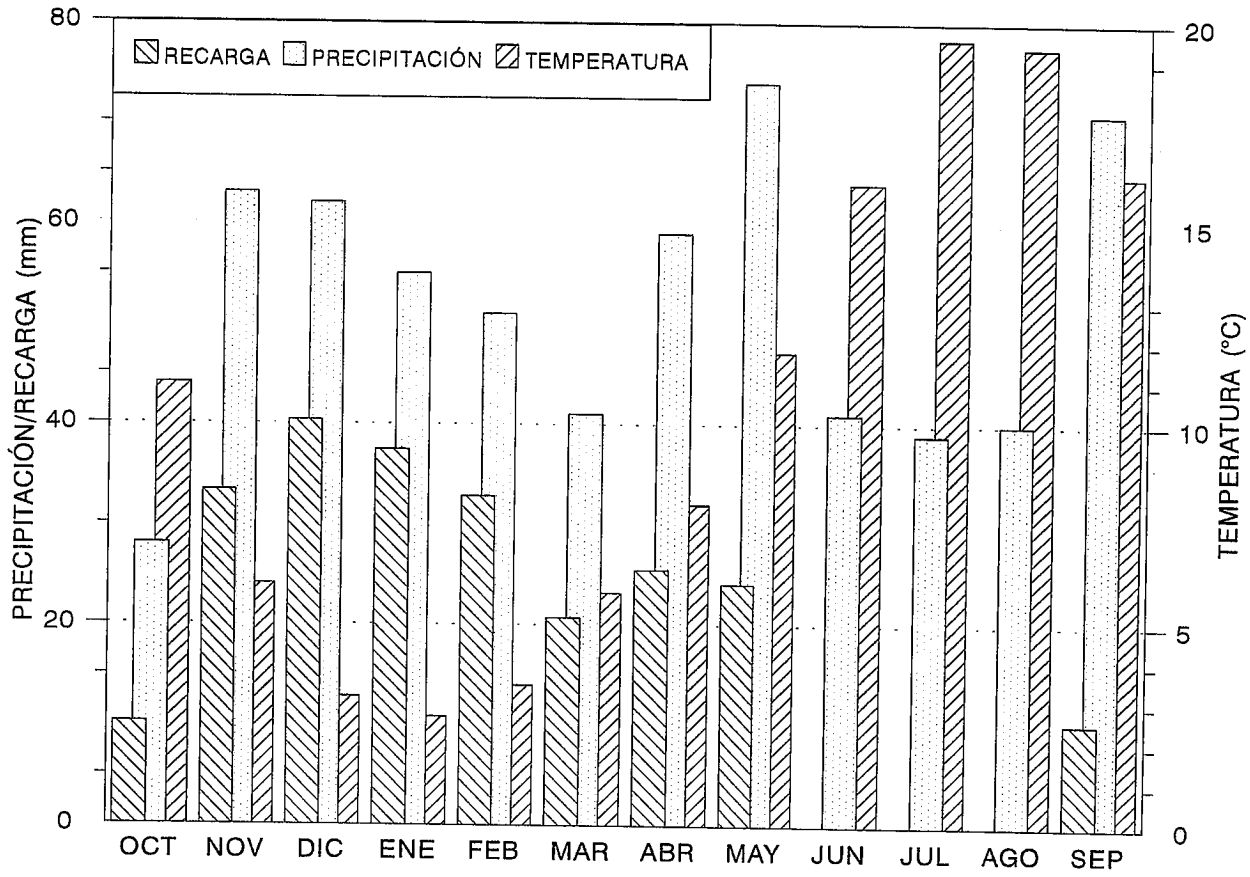

Figura 3.- Valores mensuales de temperatura, precipitación y recarga estimada en el acuífero de Alhama.

Acuífero del Solorio, y para justificar la ausencia, en general, de contacto hidráulico directo entre las calizas jurásicas y las cretácicas se propone una circulación del agua subterránea a través de fracturas.

A diferencia del trabajo anterior, el acuífero de Alhama propuesto en este estudio comprende únicamente la banda de calizas cretácicas que aparecen en la figura 1, con solo 100 km^2 de extensión en planta y no hay necesidad de recurrir a una recarga desde la Sierra del Solorio para justificar los caudales que descargan en los manantiales de Alhama.

En lo relativo a estudios hidroquímicos pueden citarse los trabajos de Álvarez *et al.* (1983) y López Azcona (1983) que incluyen análisis químicos de varios manantiales del Acuífero de Alhama. En el primero de estos primeros trabajos se hace una somera interpretación hidroquímica, mientras que el segundo está enfocado a los aspectos de hidrología médica. Una amplia recopilación de todos los trabajos de hidrología médica sobre los balnearios de Alhama fue realizada por el ITGE (1992) donde, además, se realizan aforos individuales de cada una de las surgencias. Estos datos aparecen en la Tabla II.

Un primer estudio geotérmico de las manifestaciones termales de la provincia de Zaragoza a partir de hidroquímica, es recogido en IGME (1985a). Los análisis de isótopos ambientales estables (^{18}O y H^2) indican que se trata de agua de origen meteórico y sin fraccionamiento isotópico por intercambio con la roca. El bajo contenido en tritio informa que se trata de aguas infiltradas con anterioridad al inicio de las explosiones nucleares atmosféricas. La aplicación de geotermómetros clásicos (sílice, alcalinotérreos) arroja temperaturas de base entre 50 y 110 °C.

Un estudio más detallado de la aplicación de los diferentes geotermómetros a los manantiales termales de Alhama y Jaraba es presentado por Tena *et al.* (1993). Los geotermómetros clásicos indican dos máximos de temperatura de base (cerca de 45° y 80-100 °C) mientras que geotermómetros específicos para rocas carbonatadas (calcita-dolomita, anhidrita-fluorita) no dan resultados válidos: temperaturas negativas o por debajo de la temperatura de surgencia. En general, estos autores muestran un cierto escepticismo sobre la aplicación de los geotermómetros a acuíferos de naturaleza carbonatada como es el caso del de Alhama. Dado que ya existen estos análisis previos sobre el empleo de geotermómetros en los manantiales de Alhama, el tema no se aborda en el presente estudio, remitiendo al lector interesado a lo dos trabajos citados.

Funcionamiento hidrogeológico

La recarga del acuífero

Las calizas cretácicas del Acuífero de Alhama constituyen un afloramiento de dirección general noroeste-sureste, casi continuo y bastante estrecho. Tiene

100 km² de superficie, 80 km de longitud, 1.660 m de anchura media y 370 m de anchura mínima en Alhama de Aragón, que es donde surgen los principales manantiales en la zona de menor altitud. En el extremo noroccidental se desgajan del cuerpo principal varias cúpulas anticlinales separadas superficialmente por un recubrimiento de sedimentos neógenos pero interconectadas hidráulicamente en profundidad, a través de las calizas.

El Acuífero de Alhama puede dividirse en dos sectores, tomando como límite el cauce del río Jalón: (1) sector norte, donde el flujo general de las aguas subterráneas es del noroeste hacia el sureste y (2) sector sur, con el sentido al contrario.

En el sector norte del Acuífero de Alhama se tiene una superficie de recarga de 80 km² y la altitud media del área se encuentra alrededor de 1.100 m el 79% de la superficie de recarga se encuentra por encima de los 1.000 m de altitud y el 67% entre 1.000 y 1.200 m. Corresponden a las zonas más alejadas y situadas en el valle del río Rituerto (Cuenca del Duero). Las áreas más próximas a los Manantiales de Alhama son donde se concentra el 21% restante de afloramientos, que están situados entre 1.000 y 660 m de altitud. Estos afloramientos rocosos calcáreos o no tienen suelo o tienen una débil capa arcillosa pobremente desarrollada. El 30% de su superficie está cubierto de arbolado; el resto de la superficie es monte erial, sin cultivar. Las calizas se encuentran casi siempre a cotas topográficas superiores respecto a los terrenos impermeables circundantes y ello ha sido así desde el Mioceno (Navarro, 1991a), pues constituyen relieves en *inselbergs*. No hay manantiales importantes en el contacto entre los sedimentos del Terciario y el Cretácico a pesar de las grandes llanuras que se extienden en la Cuenca del Duero. Ello supone que la mayor parte de la recarga ha sido y es actualmente de tipo autógeno, difusa, con predominio del régimen laminar, acorde con el poco desarrollo de la karstificación, como lo demuestra la ausencia de formas exokársticas y endokársticas importantes. La recarga se verifica por lo tanto a partir de la infiltración de las precipitaciones, atravesando la zona no saturada que tiene un espesor medio del orden del centenar de metros (SGOP, 1990a).

La precipitación media anual es de 643 mm y la temperatura media anual de 10,2 °C. La determinación de la pluviometría media en la zona de recarga se ha hecho a partir del mapa de isoyetas medias anuales elaborado mediante las series de precipitaciones homogeneizadas de las estaciones existentes en la zona en el período 1940-41 a 1985-86. El 51% de las precipitaciones se efectúa en los seis meses de temperatura más baja, habiendo dos máximos que corresponden al Otoño y a la Primavera; esto evita que la evaporación sea mayor. En el diagrama de la figura 3 se representa la pluviometría y la temperatura mensuales de un año medio, así como la recarga (R, en mm) obtenida a partir de la regresión múltiple:

$$R = 0.6P - 2.7T + 11.7$$

Grupo de manantiales	Nombre del manantial	Temperatura (°C)	Caudal (l/s)	Referencia
Deza	El Hocino	19,2	10	(1)
	Fuente del Suso	19,2	-	(3)
	Fuente del Suso	18,5	90	(1)
	Fuente de Azañón	15	15	(1)
	Temp. media / caudal total	19	115	
San Roquillo	San Roquillo	18	10	(1)
	Manantial de la Vega	19	10	(1)
	Temp. media / caudal total	19	20	
Embid de Ariza	Fuente del Lavadero	27	15	(1)
	Fuente del Lavadero	29	10	(2)
	Fuente del Lavadero	27,5	-	(3)
	Temp. media / caudal total	28	15	
Alhama	Galería Pallarés	33,2	9,2	(4)
de Aragón	Galería, hostal San Fermín	33,2	20,3	(4)
	Baños del Rey	33,2	47,2	(4)
	La Meona	33,2	2,2	(4)
	La Alberca	33,2	-	(4)
	La Cascada y el lago	34,0	143,6	(4)
	San Roque-1	32-35	5,8	(4)
	San Roque-2	32-35	3,2	(4)
	Baños Guajardo	33,4	3,7	(4)
	La Leñera	33,4	0,16	(4)
	Molino del Garaje	33,4	-	(4)
	Molino de las Dehesillas	32-35	7,4	(4)
	Baño del musulmán	32-35	2,9	(4)
	Molino de los Baños (S.R.)	32-35	0,74	(4)
	El Chorrillo	32-35	1,5	(4)
	Fuente pública	32-35	0,01	(4)
	Flujo difuso al río Jalón	32-35	250	(1)
	Temp. media / caudal total	33	500	

TablaII.- Valores de caudal y temperatura en los manantiales del acuífero de Alhama. (1) datos de este Trabajo. (2) IGME (1985). (3) Tena *et al.*(1993). (4) IGME (1992)

que tiene que un coeficiente de correlación de 0,9 y donde P es la precipitación media mensual (mm) y T la temperatura media mensual (°C). Esta regresión ha sido obtenida mediante la aplicación de un modelo matemático en un acuífero kárstico situado 30 km al norte de la zona de estudio de semejantes características y funcionamiento hidrogeológico (Sanz, 1996). Según esta correlación, resulta un rango de recarga respecto de la precipitación del 36 %. Por otro lado, se observa cómo el 80 % de la recarga se concentra en los seis meses de menor temperatura del año (de Noviembre a Abril). La precipitación aumenta con la altitud, por tanto de SE a NO, con un gradiente de 90 mm por cada 100 m de altitud. Este gradiente pluviométrico en el sector norte del Acuífero de Alhama es el doble que el calculado en otras áreas más montañosas de la Cordillera Ibérica. Por ejemplo, Fernández García (1989) obtuvo un gradiente de 45 mm por cada 100 m de altitud en las Sierras de la Demanda, Urbión y Albarracín. Por su parte, Sanz (1987) estimó un gradiente de 43 mm/100 m en la ladera norte de la Sierra del Moncayo y 37 mm/100 m en su ladera sur. La evaporación disminuye lógicamente también hacia el noroeste y la frecuencia de precipitaciones en forma de nieve es mayor hacia esa dirección. Casi todas las circunstancias mencionadas favorecen la regularidad de las entradas de agua en el

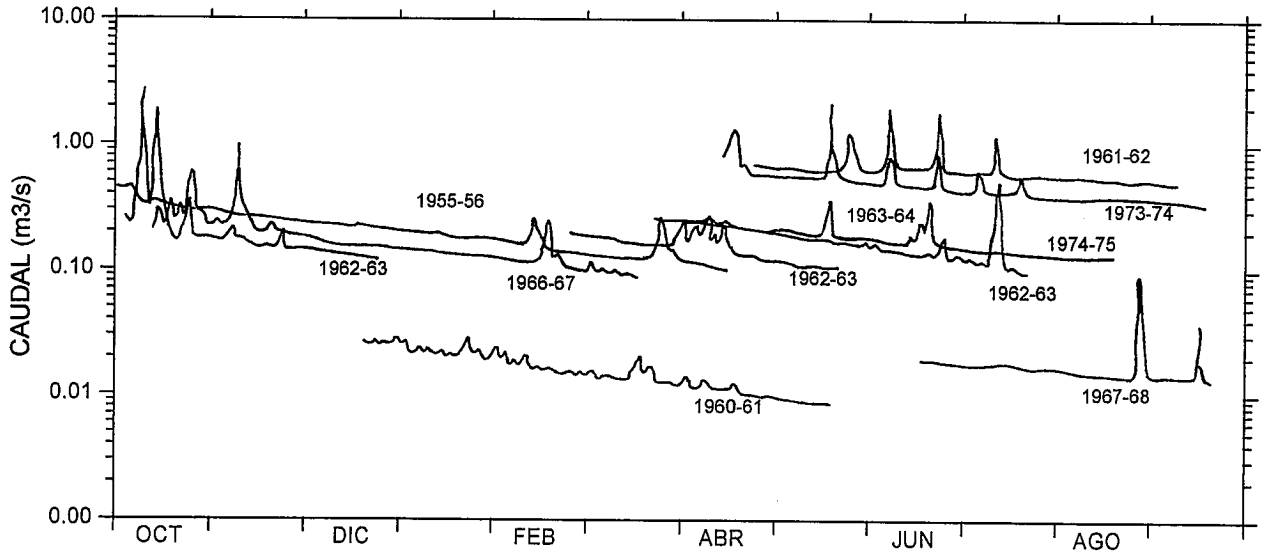

Figura 4.- Ejemplos de hidrogramas en la estación de aforos E-9057 en los que se aprecian rectas de recesión con pendientes muy bien definidas. Los números junto a los hidrogramas indican el año hidrológico a que corresponden cada una de las líneas.

sistema hidrológico y el alejamiento del centro de gravedad de la recarga respecto a los Manantiales de Alhama.

La altitud media del área de recarga se encuentra alrededor de los 800 m en el sector sur del Acuífero de Alhama y prácticamente toda la superficie (18 km^2) está comprendida entre 750 y 850 m de altitud. Las características geológicas, edafológicas y la vegetación son muy similares a las del sector norte. La precipitación media anual es de, tan solo, 350 mm y la temperatura media anual es de 12,1° C. Utilizando la misma correlación múltiple que en el sector norte, se obtiene una recarga media anual de 75 mm (21,5 % de la precipitación). El 96 % de esta recarga también se concentra en los seis meses de menor temperatura (Noviembre a Abril).

En síntesis, en el modelo de acuífero propuesto la recarga tiene lugar por infiltración eficaz de la lluvia sobre toda la superficie de afloramiento de la banda de calizas cretácicas (100 km^2). Sin embargo, por la existencia de gradientes de pluviosidad y evapo-transpiración en función de la altitud, el mayor volumen de agua se infiltra en el extremo occidental de la banda.

La circulación y la descarga del acuífero de Alhama

Descarga en manantiales. El Acuífero de Alhama está prácticamente sin explotar por lo que las salidas del sistema se realizan a través de cuatro grupos de manantiales (Deza, San Roquillo, Embid y Alhama) distribuidos a lo largo de la Falla de Alhama que pone en contacto las calizas del Cretácico con el Terciario arcilloso (Fig. 1, Tabla II).

Manantiales de Deza. Este grupo de manantiales comprende los denominados Suso, El Hocino y Azañón. Los dos primeros nacen en el contacto entre las calizas cretácicas y los sedimentos del Terciario impermeable. Las aguas de la Fuente de Azañón, aunque provienen del Acuífero de Alhama, descargan en el aluvial del río Henar. En este último caso, es probable que se mezclen con las subálveas y disminuyan su temperatura. El grupo de manantiales de Deza tiene un caudal conjunto aproximado de 115 l/s.

El macizo calcáreo del sector de Deza está modelado por la superficie de erosión fundamental finimiocena (Navarro *et. al.*, 1991b) coetánea con la superficie de colmatación terciaria del Páramo (Sanz, 1992). Esta circunstancia ha supuesto, probablemente, que el principal drenaje del Acuífero de Alhama tenía lugar exclusivamente por los manantiales Deza durante parte del Mioceno, época en la que no afloraban hacia el SE los terrenos cretácicos al estar cubiertos por los materiales del Terciario impermeable.

Manantiales de San Roquillo. Descargan a través de un nivel de calizas karstificadas dentro de los sedimentos del Neógeno que hacen el papel de un *by-pass* para el Acuífero de Alhama. Los manantiales brotan en el pie de la ladera del valle del Henar dando lugar a un edificio tobáceo, o bien en el aluvial holoceno en forma de ojos. Muy posiblemente, se hallan influenciados por la pequeña área de recarga de esas calizas karstificadas neógenas, que dan lugar a mayores variaciones de caudal que en los restantes manantiales del acuífero de Alhama, así como a una diferente calidad química. Tienen un caudal medio aproximado de 20 l/s y una temperatura en torno a los 19 °C.

Embid de Ariza. Se trata de una galería horizontal de 50 m de longitud que capta el agua que antiguamente surgía en el cauce del río Henar. Tiene un caudal medio de 20 l/s y una temperatura en torno a 28 °C.

Manantiales de Alhama de Aragón. Comprenden numerosas surgencias utilizadas para balnearios

que tienen un caudal total superior a los 200 l/s, con caudales unitarios desde 0,16 a 144 l/s, oscilando la temperatura entre 32 y 35 °C (Tabla II). Algunos de los manantiales surgen a presión y brotan 8 m por encima del cauce del río Jalón, quedando vestigios de depósitos tobáceos colgados situados a 10 m del *talweg* del río. Aparte de estos manantiales, hay una descarga difusa en el propio cauce del río Jalón a lo largo de los 350 m de afloramiento de las calizas cretácicas y que suma un caudal de otros 250 l/s. Los manantiales más caudalosos se localizan hacia el contacto entre los materiales cretácicos y los del Terciario, mientras que los de menor caudal tienden a situarse cerca del borde oriental del acuífero (contacto entre las calizas y las margas de base).

En épocas de sequía, el Río Jalón se encuentra seco aguas arriba de Alhama de manera que, en este sector del curso del río, sólo se alimenta de la descarga de los manantiales termales.

La terminación meridional del sector sureste del acuífero de Alhama y su separación del que alimenta los vecinos manantiales de Cimballa se justifica por la topografía y la pequeña conexión hidráulica entre los afloramientos cretácicos, según se puede observar en la cartografía geológica existente (Olmo *et al.*, 1983).

Análisis de hidrogramas

La estación de aforos E-9057 de la red del Ministerio de Obras Públicas en el río Henar controla el caudal conjunto de los Manantiales de Deza y San Roquillo, más las escorrentías superficiales de una cuenca en la que el 95 % de la superficie son materiales terciarios de la cuenca sedimentaria de Almazán. Los Manantiales de Deza y San Roquillo se recargan en otras cuencas hidrográficas superficiales fuera de la del Río Henar.

Según el inventario completo de manantiales situados sobre los sedimentos del Terciario, la aportación de éstos fue de unos 20 l/s durante los estiajes del período 1990-1995. Se han estudiado 24 años de aforo de dicha estación (1945/46-1974/75) obteniéndose una aportación media anual de 8,1 hm^3/año. Se ha separado la escorrentía superficial y la subterránea utilizando el método de Barnes, el cual se ha aplicado con bastante fiabilidad pues los estiajes prolongados han ofrecido curvas de agotamiento muy claras (Fig. 4). La escorrentía superficial que se origina en la cuenca terciaria impermeable de Almazán tiene una manifestación clara en el hidrograma del río, con respuesta rápida a los episodios lluviosos. En dicho período de tiempo se ha obtenido una aportación media anual de escorrentía subterránea de 4,6 hm^3/año (146 l/s), que es el 57% de la escorrentía total, y que resulta 11 l/s superior a la suma de los Manantiales de Deza y San Roquillo, medidos entre 1990-1995, lo cual parece lógico ya que hay que tener en cuenta que el período de sequía de este quinquenio ha afectado especialmente al Manantial de San Roquillo.

Manantiales	1992		1993
	^{3}H U.T.	δ^{18}O ‰	δ^{18}O ‰
Fuente de Suso (Deza)	8,1±1,0	-9,0	-8,5
El Hocino (Deza)	7,4±1,0	-8,9	□
San Roquillo	12,5±4,3	-8,9	-8,5
Embid	3,3±0,9	-8,7	-8,5
Galería Pallarés (Alhama)	1,9±0,7	-8,7	□

Tabla III.- Valores de Isótopos ambientales

Con los datos de aforo puntuales se ha comprobado que los Manantiales de Deza y Embid son bastante regulares y únicamente el de San Roquillo acusa variaciones relativamente importantes en su caudal. También, los manantiales de los balnearios de Alhama son de caudal y temperatura muy constantes, sin variaciones importantes a lo largo de más de un siglo, según se observa en la información recopilada en ITGE (1992).

El volumen hidrodinámico en la fecha inicial media es de 2 hm^3. En la figura 4 se representan, a modo de ejemplo, algunas curvas de agotamiento correspondientes a diferentes años. Analizados los aforos de la estación E-9057 durante 30 años (1945/46 - 1974/75), con 24 períodos de régimen no influenciado, se ha manifestado una curva de agotamiento principal de α = 0,0057 $días^{-1}$.

Hidrogeoquímica

Dentro de este trabajo se ha realizado la toma de muestras y posterior análisis, tanto para química convencional como isotópica (tritio y ^{18}O). También se han recogido los datos analíticos de trabajos previos. Los datos hidroquímicos, especialmente los de isótopos, apoyan la hipótesis de un flujo preferente desde el extremo noroeste del acuífero hacia el sureste, descargando en los manantiales termales de Alhama.

Contenidos en tritio

Los valores de tritio en los grupos de manantiales indican un progresivo envejecimiento de las aguas en sentido NO a SE, desde los Manantiales de Deza (8 U.T.) hacia Embid (3.6 U.T.) y finalizando en Alhama (1.8 U.T.).

A fin de estimar la edad de las aguas de Alhama partimos de dos supuestos:

a) Los datos de tritio en precipitaciones de la estación de Madrid (red de la I.A.E.A.) son representativos de las precipitaciones sobre el Acuífero de Alhama. Se trata de la única estación española alejada de la influencia marina. Dicha estación está situada a 200 km al suroeste del Acuífero de Alhama y dispone de un registro continuo de valores de tritio desde 1970 hasta 1989. Los valores están recogidos en Plata (1994a). Los datos de tritio anteriores a la década

Gradiente deducido $\delta^{18}O$ ‰/100 m	Area de estudio	Características del muestreo	Referencia bibliográfica
- 0,15	Macizo de San Martín (Pirineo)	Precipitación, 8 muestras en tres puntos	López Martínez *et al.* (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 Garrotxa (Gerona)	Precipitación, 25 muestras en 3 puntos	Sanz *et al.* (1982)
- 0,28	Sierras de Gador y Lújar (Almería)	Correlación entre 7 manantiales y la altitud de su área de recarga	Benavente *et al.* (1990)
- 0,28	Sierras de Cazorla y Segura	Correlación entre 62 manantiales y la altitud de su área de recarga	Cruz-San Julián *et al.* (1990)
- 0,31	Sierras Blanca y Mijas (Málaga)	Precipitación, 25 muestras en 5 puntos	Andreo (1997)

Tabla IV.- Reco`pilación de valores de gradientes de ^{18}O 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

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

Donde C_t es la concentración de tritio en la fecha t_t (anterior al muestreo); C_o 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 recarga 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 δ ‰, 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 ä ^{18}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 ä ^{18}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 homogeneamente distribuída 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-

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	(1)
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	
EMBID												
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	

Valores en mg/l excepto la conductividad eléctrica (C.E.) en μS y el pH,

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).

to con otros 15 obtenidos de trabajos previos (IGME, 1985a; Alvarez *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 SiO_2 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

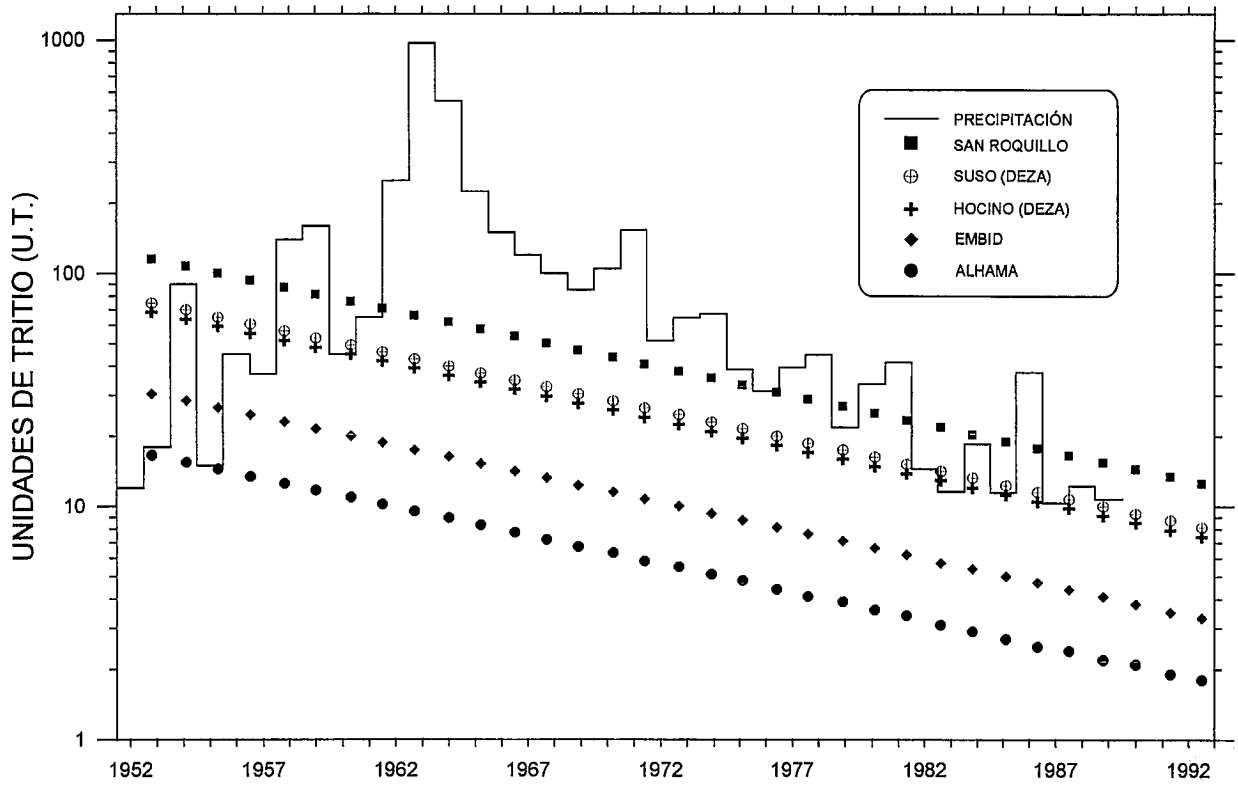

Figura 5.- Evolución del contenido en tritio en las precipitaciones en la estación de Madrid (línea continua) y del contenido en tritio en los manantiales del acuífero de Alhama (líneas con símbolos) supuesto un flujo tipo pistón.

contenidos de Cl^- y Na^+: estos iones tienen una concentración tres veces menor en los Manantiales de Deza y San Roquillo que en los de Embid y Alhama, tal como se recoge en los diagramas de Stiff de la figura 6.

Otro elemento mayoritario que también guarda una relación con el sentido del flujo es la sílice, con un aumento no muy acusado de acuerdo con el sentido general del flujo: valores medios de 8 mg/l en Deza, 9.6 en San Roquillo, 10 en Embid y 13 en Alhama.

Modelo conceptual del comportamiento hidrogeológico para el acuífero de Alhama de Aragón

A partir de toda la información recopilada en los apartados anteriores, se plantea un modelo general de comportamiento hidrogeológico para el Acuífero de Alhama. A efectos de simplificación, el modelo se refiere al sector noroeste del acuífero, donde aparecen los cuatro grupos de manantiales considerados y se concentran la mayor parte de la recarga. El modelo conceptual considera que la banda noroeste de calizas cretácicas se comporta de forma análoga a un tubo de forma prismática que se recarga unicamente por su extremo norte y se descarga en el borde sur, a través de los Manantiales de Alhama (Fig. 7).

Caudal de drenaje del sector Norte

La recarga estimada en el sector norte del Acuífero de Alhama es de 20,5 hm^3/año (650 l/s) que en régimen permanente coinciden, lógicamente, con la suma de las descargas de los cuatro grupos de manantiales. Los tres primeros grupos (Deza, San Roquillo y Embid) aportan un 23 % del caudal total, lo que nos permitirá tener una aproximación suficiente si se supone que el drenaje se verifica únicamente por Alhama.

De los 500 l/s de caudal de los manantiales termales de Alhama, se descuenta a efectos del cálculo la pequeña aportación del sector sureste, que estimada por la recarga viene a ser de 1,4 hm^3/año (44,4 l/s). Para no introducir números no significativos en los cálculos tomamos un caudal de descarga de 450 l/s.

Gradiente hidráulico

Teniendo en cuenta la topografía, situación de los manantiales y del nivel freático en cuatro sondeos concentrados en el extremo noroccidental del Acuífero de Alhama, se ha estimado un gradiente hidráulico de 0,0055 para el sector principal del acuífero. Este valor se encuentra entre 0,003 y 0,006, valores medidos por Sánchez Navarro *et al.* (1992) para acuíferos formados por calizas mesozoicas situadas en la rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica. Los autores obtienen estos valores a partir de medidas de nivel piezométrico en un centenar de sondeos.

Geometría del acuífero

La cartografía geológica de superficie indica una anchura media de las calizas del sector norte de 1330 m. Como longitud del prisma se considera la distancia

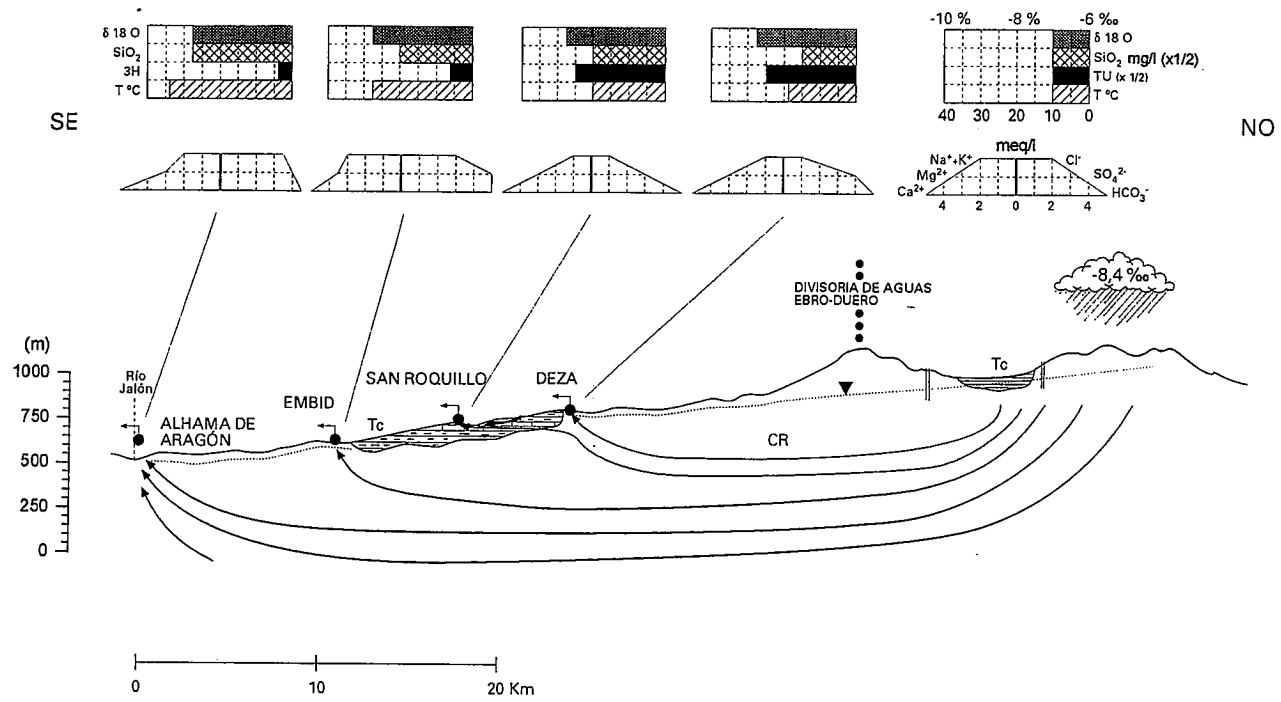

Figura 6.- Perfil hidrogeoquímico en el sector NO del acuífero de Alhama CR: acuífero cretácico. Tc: Terciario (arcillas impermeables). Tl: Terciario (calizas karstificadas que descargan en los manantiales de San Roquillo).

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 kársticas 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 m^2/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 (α) a partir de la fórmula:

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

Así mismo, se puede estimar su volumen hidrodinámico ($V_n = Q/\alpha$) 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.

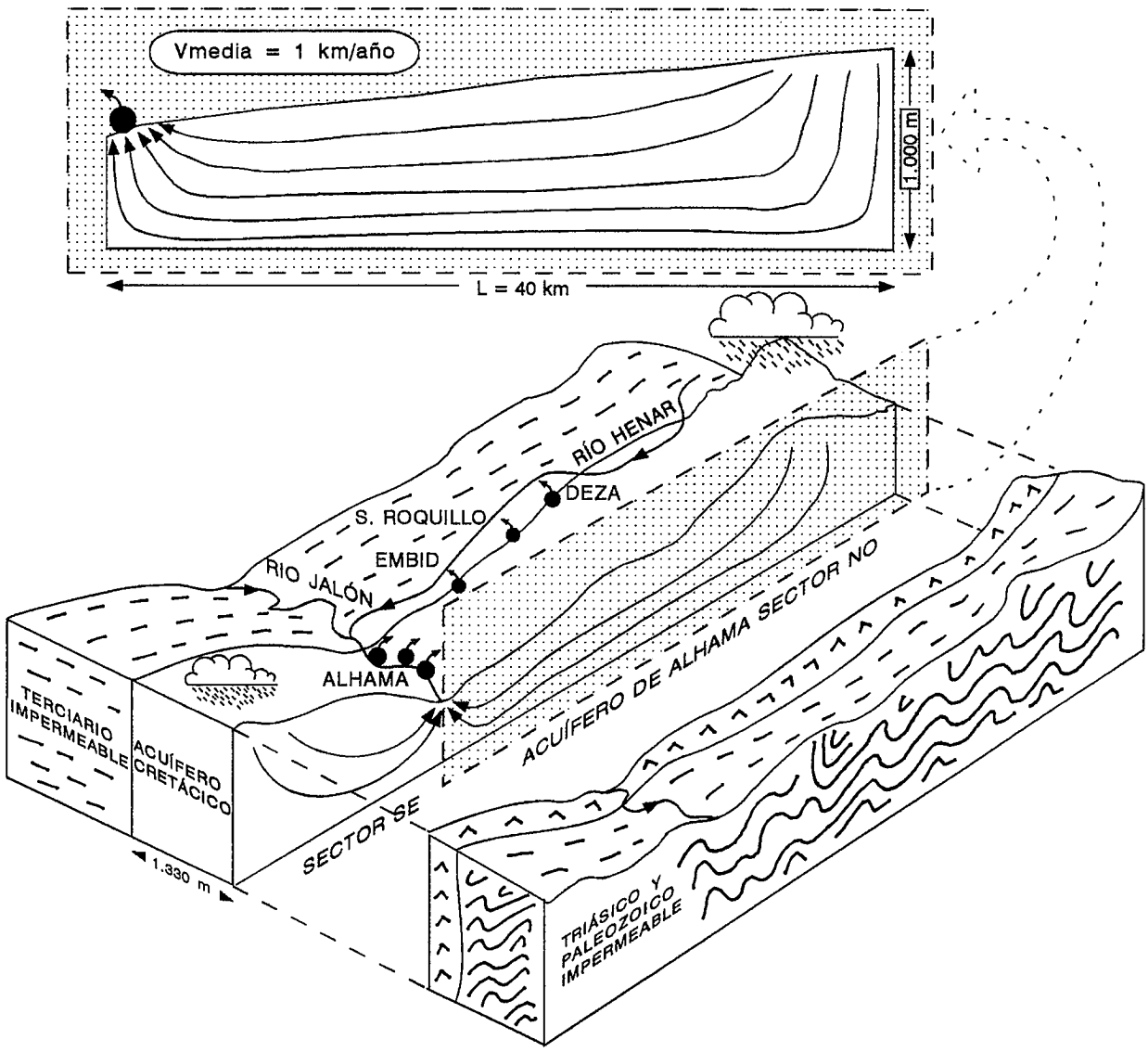

Figura 7.- Modelo conceptual del acuífero de Alhama de Aragón para la estimación de parámetros hidrogeológicos (ver explicación en el texto).

Se trata de una medida que refleja con más claridad la regularidad del manantial ante eventos de sequía. Su expresión que sale de la relación $0'5 = e^{-\alpha t}$ es:

$$t_m = \frac{0{,}693}{\alpha}$$

Así, el coeficiente de agotamiento de Alhama es $\alpha = 0{,}00077$ día^{-1}, su volumen hidrodinámico V = 50 hm^3 y la vida media de 2,5 años. Si consideramos la distancia del centro de gravedad de la recarga hasta los manantiales de Deza, se estima una longitud media de las líneas de flujo de 16 km, y en ese caso el coeficiente de almacenamiento resulta $\alpha = 0{,}0048$ día^{-1}, que es del mismo orden de magnitud que el obtenido por el hidrograma de la estación de aforos del río Henar ($\alpha = 0{,}0057$ día^{-1}) lo que avala, de alguna manera, la bondad de los resultados obtenidos.

Discusión

La tesis de Hernández-Pacheco (1954) y de Sánchez Navarro *et al.* (1987) sobre el origen de los manantiales termales de Alhama suponen que la recarga del Acuífero de Alhama se efectuaba sobre la extensa paramera calcárea de la rama Castellana de la Ibérica (superficie del orden de cientos de km^2). Sin embargo son suficientes los 100 km^2 de la banda de calizas cretácicas de la figura 1, para justificar los caudales de los Manantiales de Alhama, tal como se muestra en el apartado de funcionamiento hidrogeológico del acuífero. Los espesores aparentes de varios cientos de metros (hasta 2.000) que tiene esa banda de calizas también son suficientes para explicar el termalismo que presentan los Manantiales de Alhama. Por otro lado, investigaciones geofísicas en la cuenca de Almazán (Bond, 1996) revelan que las calizas situadas bajo los sedimentos terciarios se encuentran afectadas por una

serie de fracturas verticales, que cuestionan la continuidad hidráulica de las calizas desde la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica hasta la Aragonesa a través de la cuenca de Almazán. Además, la cartografía geológica de la serie MAGNA (Lendínez y Martín, 1991; Lendínez, 1991) permite comprobar que las calizas líasicas que forman la mayor parte del área de recarga de la sierra del Solorio no están en conexión hidráulica con el acuífero cretácico de Alhama, ya que quedan separadas por los materiales de edad triásica que actúan como impermeables.

El modelo de acuífero de Alhama propuesto en SGOP (1990b) incluye tanto la banda de calizas cretácicas propuesta en este artículo como su prolongación hacia el SE, hasta alcanzar una superficie total de 267 km^2. Otra diferencia consiste en que se propone la existencia de una circulación importante, desde el acuífero de la Sierra del Solorio hacia los manantiales de Alhama, que incluso se justifica mediante un balance hídrico. Como las calizas jurásicas de la Sierra del Solorio no tienen, en general, una clara conexión hidráulica con las cretácicas, se supone la existencia de un drenaje a través de fracturas. Este supuesto se justifica, en parte, indicando que los máximos de mineralización y temperatura se alcanzan en los tramos finales de la red de drenaje: manantiales de Alhama, Embid y Jaraba.

Frente al acuífero de Alhama de SGOP (1990b), el propuesto en el presente tiene como principal ventaja una mayor simplicidad. Dentro del balance hídrico de la Sierra del Solorio realizado en SGOP (1990b) el sobrante que llegaría a Alhama es de tan sólo un 11 %, porcentaje que no es muy significativo, si se tienen en consideración los márgenes de error que lleva implícito todo balance hídrico. No es necesario suponer una hipotética conexión por fracturas entre las calizas jurásicas y las cretácicas. La superficie de recarga formada por la banda de 100 km^2 es suficiente para explicar el caudal de descarga en Alhama si se tiene en cuenta el gradiente de precipitación y evapotranspiración en función de la altitud. El espesor aparente de la banda de calizas cretácicas que indica la geofísica profunda, también puede justificar el termalismo de Alhama con un gradiente geotérmico normal. Por último tampoco es necesario (o bien es más complejo) suponer una circulación subterránea desde la Sierra del Solorio para explicar la calidad química de las aguas que descargan en Alhama y Embid, en vez de proponer que estos dos grupos de manantiales proceden de un agua que evoluciona a partir de la que descarga en los manantiales de Deza.

Por otro lado, el estudio de un acuífero sin apenas pozos perforados como el de Alhama de Aragón tiene muchas limitaciones. No pueden elaborarse mapas de isolíneas de nivel freático, no se dispone de puntos donde realizar pruebas de bombeo, etc. Sin embargo en este estudio se ha llegado a un conocimiento razonable del comportamiento del Acuífero de Alhama y sus parámetros hidrogeológicos. Integrando datos de diferente naturaleza como la estructura geológica del acuífero a partir de cartografía superficial y apoyo en estudios previos de geofísica, estimación de la recarga a partir de datos meteorológicos, análisis de hidrogramas de estaciones de aforos e hidroquímica (convencional e isotópica) se obtiene un modelo conceptual simple en el cual toda la información resulta coherente. El coeficiente de agotamiento obtenido por el análisis de hidrogramas es análogo al deducido a partir de aplicar la ley de Darcy; los datos de hidroquímica convencional e isotópica apoyan el sentido general del flujo de dirección NW a SE que supone el simple modelo. En conjunto, se deduce un valor de porosidad eficaz que entra dentro de los valores previsibles; todo ello sin sofisticados planteamientos matemáticos que posiblemente no tendrían sentido dado el discreto conocimiento que todavía se tiene del acuífero.

Los manantiales termales estudiados también reflejan el importante papel que pueden jugar las aguas subterráneas en la distribución del calor de origen interno en la parte más superficial de la corteza. Si se supone que los materiales calcáreos del acuífero de Alhama fueran impermeables, de manera que éstos tuvieran un flujo de calor exclusivamente por conducción a través de las rocas, con un valor de flujo similar a la media de la superficie terrestre continental (1,5 μcal/cm^2 x seg), los 100 km^2 de superficie que ocupan emitirían 4,7 x 10^{11} cal/año. En cambio, los manantiales termales de Alhama, concentrados en una estrecha banda de 350 m de longitud por 150 de ancho, descargan una masa de agua de 500 l/s que ha calentado su temperatura de 10 a 33 °C, lo que supone una emisión de calor de 3,63 x 10^{14} cal/año, tres ordenes de magnitud superior que en el primer caso.

Conclusiones

Tal como se ha mostrado en los apartados anteriores, el acuífero de Alhama de Aragón parece responder al modelo que se muestra en el perfil esquemático de la figura 7, con una superfice en planta de tan solo 100 km^2. La recarga es autógena y se concentra en los afloramientos de las calizas cretácicas más alejadas del punto de descarga principal (Alhama). Esta disposición del acuífero favorece una alta regulación (a pesar de tratarse de rocas calcáreas) con una velocidad media real del orden de 1 km/año.

Las descargas del acuífero de Alhama de Aragón muestran un incremento de salinidad, antigüedad de las aguas y temperatura, en función del sentido de flujo, así como una similitud de contenidos en ^{18}O que es coherente con el modelo conceptual propuesto.

Los caudales de los manantiales asociados al acuífero de Alhama presentan valores bajos en sus coeficientes de recesión. Si no se produjera ninguna recarga, se tardaría más de dos años para que los caudales se redujeran a la mitad de su valor habitual.

Agradecemos a P. Peri, M. Montero y M. de la Fe Díaz del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, la realización de los análisis de tritio. Igualmente, al Instituto Tecnológico GeoMinero de España las facilidades para la consulta de los informes internos, en especial a J. Baeza.

El artículo ha sido mejorado gracias a los comentarios y sugerencias de dos revisores anónimos a los que también queremos señalar nuestro agradecimiento.

Bibliografía

Álvarez, C., de Pedro, F., Gallego, R. y Villanueva, E. (1983): Aplicación del análisis químico e interpretación geoquímica de las aguas de la zona de Soria correspondientes a la Hoja 408. Torrijo de la Cañada (Soria): *Bol. Geol. Min. España,* 94 (I): 20-31.

Andreo, B. (1997): *Hidrogeología de los acuíferos carbonatados en las sierras Blanca y Mijas.* Servicio de publicaciones de la Universidad de Málaga y Confederación Hidrográfica del Sur. Málaga, 489 p.

Aracil, E., López, F.J., Rubio, V., Sanz, E. y Savirón, L. (1993): La Falla de San Saturio. *Geogaceta,* 13: 12-15.

Armijo, M. (1968): *Compendio de Hidrología médica.* Editorial Científico-Médica. Barcelona, 484 p.

Benavente, J., Cardenal, J., Cruz-San Julián, J., García López, S., Araguas, L. y López Vera, F. (1990): Content analysis of stable isotopes in aquifers from the coastal mountainous chain of Gador-Lujar (southeast Andalusia, Spain). *Memoires of I.A.H.*, XXII (Part.1), 415-424, XXIInd International Congress, Water Resources in Mountainous Regions, Lausanne.

Bond, J. (1996): Tectono-sedimentary evolution of the Almazán Basin, NE Spain. En: *Tertiary basins of Spain.* Friend, P.F. y Dabrio, C.J. (Eds.), Cambridge University Press, p. 203-213.

Castany, G. (1984): Hydrogeological features of carbonate rocks. En*: Guide to the hydrology of carbonate rocks,* La Moreaux, P.E., Morere, B. y Memon, B.A. (Eds.), Studies and reports in hydrology, UNESCO, p. 47-68.

Cerón, J.G. y Castillo, A. (1996): Consideraciones sobre la hidroquímica de las aguas termales de los baños de Sierra Elvira. *Geogaceta,* 19: 130-133.

Coloma, P., Sánchez Navarro, A. y Martínez Gil, F.J. (1995): El drenaje subterráneo de la Cordillera Ibérica en la Depresión Terciaria del Ebro (Sector Riojano). *Geogaceta,* 17: 68-17.

Cruz-San Julián J., García-Rossell, L. y Granda, J.M. (1979): Nuevos datos sobre las aguas termales de la provincia de Granada. II Simp. Hidrogeol. Pamplona. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos,* V, 533-546.

Cruz-San Julián, J., Benavente, J., Martínez Garrido, J.C., Moral, F., Araguas, L. y López Vera, F. (1990): Deuterium and oxigen-18 content in karstic aquifers in the sierras de Cazorla and Segura (Betic Cordillera, Sapin). *Memoires of I.A.H.*, XXII (Part.1), 425-433, XXIInd International Congress, Water Resources in Mountainous Regions, Lausanne.

Fernández García, F. (1989): Gradientes térmicos y pluviométricos de dos sectores de la Ibérica: Demanda, Urbión y Albarracín. I Encuentro Nacional de Estudios sobre el Moncayo. Ciencias de la Naturaleza. Tarazona.Turiaso IX. Tomo I. p. 245-260.

Guisado, R., Armenteros, I. y Dabrio, C.J. (1988): Sedimentación continental paleógena entre Almazul y Deza. (Cuenca de Almazán Oriental, Soria). *Stud. Geol. Salamant.*, XXV: 67-86.

Hernández-Pacheco, F. (1949): La tectónica peninsular y su relación con las aguas mineromedicinales. Discurso de entrada en la Real Academia de Farmacia. 126 p. Madrid.

Hernández-Pacheco, F. (1954): Estudio hidrogeológico de las Termas de Alhama de Aragón (Zaragoza). *Ann. R. Ac. Farmacia,* XX (4): 309-336.

Herráez, M.I. (1983): *Análisis de las variaciones de los isótopos ambientales estables en el sistema acuífero detrítico terciario de Madrid.* Tesis Doctoral, Fac. de Ciencias. Univ. Autónoma. Madrid, 439 p.

Herráez, M.I., Plata, A. y Baonza, E. (1983): Composición y variación isotópica de las precipitaciones de Madrid. III Simp. Hidrogeol., Madrid. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, VIII, 205-214.

Instituto Geológico y Minero de España (1982*): Investigación hidrogeológica de la cuenca del Ebro.* Colección Informe. 82 p. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.

Instituto Geológico y Minero de España (1985a): *Estudio de las manifestaciones termales de Extremadura-Salamanca-Aragón y Rioja orientadas a su posible explotación como recurso geotérmico.* Informe interno número 747. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.

Instituto Geológico y Minero de España (1985b): *Calidad química de las aguas subterráneas en España.* Informe de síntesis. 3 tomos. Ministerio de Industria y Energía, MADRID.

Instituto Tecnológico Geominero de España (1989*): El agua subterránea en Soria. Mapa hidrogeológico a escala 1:200.000.* Memoria 20 p. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.

Instituto Tecnológico Geominero de España (1992): *Las aguas mineromedicinales, minero-industriales, termales y de bebida envasadas en la Comunidad Autónoma de Aragón. Avance del Proyecto a 31/12/1992. Referencias y Sinopsis bibliográficas.* Informe interno. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.

Instituto Tecnológico Geominero de España (1993): *Las aguas subterráneas en España. Estudio de síntesis.* 2 tomos, memoria 591 p. Segunda edición. Ministerio de Industria y Energía, Madrid.

Iribar, V. y Antigüedad, I. (1996): Definición de zonas de recarga de manantiales kársticos mediante técnicas isotópicas ambientales. *Jornadas sobre Recursos Hídricos en Regiones Kársticas*, Vitoria, 271-279.

Junta de Castilla y León. (1989): *Estudio Geofísico mediante los métodos Gravimétrico y Electromagnético en el Dominio de Tiempo en la Comarca del Campo de Gómara.* Consejería de Agricultura. Informe interno.

Junta de Castilla y León. (1991): *Estudio Hidrogeológico y estructural en la Comarca del Campo de Gómara.* Consejería de Agricultura. Informe interno.

Lendínez, A. (1991): Mapa y memoria explicativa de la hoja nº 435 (Arcos de Jalón) del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000. Memoria 62 p. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

Lendínez, A. y Ruiz, V. (1991): Mapa y memoria explicativa de la hoja nº 408 (Torrijo de la Cañada) del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000. Memoria 90 p. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

Lendínez, A. y Martín, D. (1991): Mapa y memoria explicativa de la hoja nº 436 (Alhama de Aragón) del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000. Memoria 90 p. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

Lopes Paradela, P., Martins Nunes, A. y Calado, C.M.A. (1982): Estancias Termais. *III Semana de Hidrogeología*, Guía de excursiones, p. T1-T77. Dpto. de Geología, Facultad de Ciencias. Lisboa.

López Azcona, J.M. (1983): Balneario de Alhama de Aragón. Consideraciones sobre el grupo de manantiales de aguas mineromedicinales de Alhama de Aragón. *Ann. R. Ac. Farmacia,* 47 (2): 335-358. Madrid.

López Martínez, J., Herráez, I. y Llamas, M.R. (1984): Contribución al conocimiento hidrogeoquímico del macizo kárstico de la Piedra de San Martín (Pirineo Occidental). *I Congr. Geol. Esp.*, IV, 175-188. Segovia.

Lloyd, J.W.y Heathcote, J.A. (1985): Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater. Oxford University Press, 296 p.

Meseguer, J. y Gea, R. (1953): Mapa y memoria explicativa de la hoja n° 892 (Fortuna) del mapa geológico nacional a escala 1:50.000. Memoria 93 p. Madrid.

Murillo, J.M. y de la Orden J.A. (1995): ¿Es la red foronómica la gran olvidada? Optimización de la red de aforos del sistema acuífero n° 57, Mesozoico de Monreal-Gallocanta. VI Simp. Hidrogeol. Sevilla. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XIX, 69-83.

Navarro, D. (1991a): Mapa y memoria explicativa de la hoja n° 380 (Borobia) del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000. Memoria 96 p. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

Navarro, D. (1991b): Mapa y memoria explicativa de la hoja n° 350 (Soria) del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000. Memoria 70 p. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid.

Olmo, P. del, Hernández, A. y Aragonés, E. (1983): Mapa y memoria explicativa de la hoja n° 437 (Ateca) del Mapa geológico Nacional a escala 1:50.000. Memoria 67 p. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

Plata, A. (1972): *Isótopos en Hidrología*. Editorial Alhambra, Madrid, 328 p.

Plata, A. (1994a). *Concentraciones de tritio en las precipitaciones del globo a partir del año 1953: características generales y modelos de distribución*. Apuntes del Curso de Hidrología Isotópica, p. 57-71. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas-Universidad Autónoma. Madrid.

Plata, A. (1994b): *Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas de la Península Ibérica*. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Madrid, 139 p.

Rey, D. y Ramos, A. (1991): Estratigrafía y sedimentología del Pérmico y Triásico del Sector Deza-Castejón (Soria). *Rev. Soc. Geol. España*, 4: 1-2.

Sánchez Ferre, J. (1992): Guía de establecimientos balnearios de España. Ediciones del M.O.P.T., Madrid, 357 p.

Sánchez Navarro, J.A., de Leiva, J. y Martínez Gil, F.J. (1987): Hidroquímica de las manifestaciones termales en la provincia de Zaragoza: consideraciones genéticas. *II Reun. Nac. Geol. Ambient. Orden. Territ.*, Valencia, 345-356.

Sánchez Navarro, J.A., San Román, J., de Miguel, J.L., Pérez A. y Martínez Gil, F.J. (1992): Isopiezas y direcciones de flujo regional en el acuífero carbonatado mesozoico del margen Ibérico de la Depresión del Ebro. *Geogaceta,* 11: 122-124.

Sanz, E. (1987): El karst del sur y oeste del Moncayo. *Bol.Inf.Est.*, 47, 159 p. Servicio Geológico de Obras Públicas. Madrid.

Sanz, E. (1992). El relieve de la Sierra de Cabrejas. *III Cong. Nac. Geol.*, T. 2, 91-95.

Sanz, E. (1996): Application et simplification du modèle SIMERO à la source de Vozmediano (Espagne). *Hydrological Sc. Jour.*, 41 (5): 763-779.

Sanz, E., Fernández del Río, G. y de la Peña, J. (1992): Las aguas subterráneas en Soria. V Simp. Hidrogeol., Alicante. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos*, XV, 55-65.

Sanz, M., Bach, J. y Trilla, J. (1982): Aplicación del oxígeno-18 al sistema kárstico de Bañolas-La Garrotxa (Gerona). *Reunión monográfica sobre el karst de Larra*, 243-255.

Servicio Geológico de Obras Públicas (1990a): *Estudio hidrogeológico de la provincia de Soria*. Informe interno, Madrid.

Servicio Geológico de Obras Públicas (1990b): *Estudio de los recursos hidráulicos subterráneos de los acuíferos relacionados con la provincia de Zaragoza. Unidad hidrogeológica n° 43. Sierra del Solorio*. Informe interno, Madrid, 210 p.

Servicio Geológico de Obras Públicas y Diputación Foral de Navarra (1982): *Las aguas subterráneas en Navarra. Proyecto Hidrogeológico*. Burlada (Navarra), 229 p.

Tena, J.M., Auqué, F., Gimeno, J. y Mandado, J. (1993): Aplicabilidad de geotermómetros químicos clásicos a sistemas de baja entalpía. El ejemplo del sistema Alhama-Jaraba (Zaragoza). *V Congr. Geoquim.*, Soria. 247-252 p..

Yepes, J. (1990): *Síntesis hidrogeológica general de las aguas minerales de España*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Geología, Universidad Complutense, Madrid, 161 p

Manuscrito recibido el 30 de Julio de 1997
Aceptado el manuscrito revisado el 25 de Mayo de 1998