

# Caracterización hidrogeológica de formaciones acuíferas profundas. Aplicación al acuífero regional Jurásico de la unidad hidrogeológica 08.07, (El Maestrazgo)

M. Marina

Instituto Geológico y Minero de España. c/ Ríos Rosas, 23. 28003 Madrid. España  
E-mail: m.marina@igme.es

## RESUMEN

El desarrollo de una metodología de caracterización hidrogeológica de formaciones acuíferas profundas surge como una línea específica de investigación a desarrollar dentro del Programa de Hidrogeología y Aguas Subterráneas del IGME al comienzo del año 2003, aunque desde mediados de la década de 1970 (etapa PIAS) este Organismo viene llevando a cabo estudios en acuíferos de esta naturaleza. Con el objetivo de desarrollar una metodología de caracterización hidrogeológica se eligió como zona piloto el acuífero regional Jurásico incluido en la Unidad Hidrogeológica 08.07, (El Maestrazgo), por tratarse de un subsistema caracterizado por presentar un gran espesor en su secuencia sedimentaria y una zona saturada localizada, en gran parte del mismo, a profundidades superiores a 300 m; constituido por calizas, dolomías y margas de edad Cretácico inferior-Jurásico. Como resultado final del proyecto se espera integrar la información obtenida en las diversas especialidades implicadas: geología, estratigrafía, análisis estructural, hidrogeología, hidroquímica, geofísica y teledetección, de manera que permita mejorar la metodología de caracterización de formaciones acuíferas profundas con características similares, así como definir un modelo hidrogeológico conceptual, integrado en el modelo geológico. Se exponen parte de los trabajos llevados a cabo en el estudio, encaminados a mejorar el conocimiento del balance hídrico, la piezometría y las características hidroquímicas e isotópicas del agua subterránea.

Palabras clave: Acuíferos profundos, Maestrazgo, metodología

## ***Hydrogeological characterization of deep aquifer formations. Application to the regional Jurassic aquifer, in the hydrogeological unit 08-07, El Maestrazgo, Castellón (Spain)***

### ABSTRACT

*The development of a methodology for hydrogeological characterization of deep aquifer formations is a new specific research line, to be developed within the Hydrogeology and Groundwater program of the Spanish Geological Survey at the beginning of 2003, although this Institution is carrying out research on this type of aquifer since mid-seventies (PIAS stage). With the aim of applying this methodology, the regional Jurassic aquifer included in the Hydrogeological Unit 08.07 (Maestrazgo, Castellón) was selected as pilot area. The reason for the preference of this area was the large thickness of the sedimentary sequence of this aquifer subsystem. Besides, in the main part of it, the saturated zone was located down to a depth of more than 300 m: made up of carbonated formations (limestones, dolomites and marls) from lower Cretaceous-Jurassic age. The ultimate aim of the study will be to integrate the information obtained from the specialities concerned: Geology, Stratigraphy, Structural Analysis, Hydrogeology, Hydrochemistry, Geophysics and Remote Sensing and enable us to obtain a methodology for characterization of deep aquifers, with similar characteristics, as well as to define a hydrogeological conceptual model that integrates the geological model. Part of the work carried out, aimed to improve the knowledge of water balance, piezometric surface, hydrochemistry and isotopic characterization of groundwater, is presented in this paper.*

*Key words: Deep aquifers, Maestrazgo, methodology*

### Introducción

Se pueden considerar como acuíferos profundos los siguientes: acuíferos libres con el nivel freático a una

profundidad superior a 300 m; acuíferos confinados cuyo techo se encuentre a más de la profundidad mencionada; acuíferos que, por sus características hidráulicas, precisen de la realización de perforacio-

nes de gran profundidad para su aprovechamiento y de técnicas de estudio de acuíferos profundos, y, en un sentido más amplio, el término podría englobar aquellos acuíferos en los que su conocimiento actual no permite definir con precisión la situación de su muro y, por tanto, se precisa profundizar en el conocimiento de su estructura hidrogeológica y su funcionamiento, para determinar el volumen de agua almacenado, sus posibilidades de aprovechamiento y las condiciones de utilización más adecuadas.

El desarrollo de la metodología de caracterización de acuíferos profundos ha consistido principalmente en una fase previa de recopilación y síntesis de la información existente de la zona y posteriormente una combinación, coordinación y vinculación entre las tareas a realizar en las diferentes especialidades.

Con el objetivo de aplicar la metodología de estudio desarrollada se ha elegido como zona piloto el acuífero Jurásico del Maestrazgo Central incluido en la Unidad Hidrogeológica 08.07 (MOPU-IGME, 1990) (Fig. 1), al tratarse de una zona en la que se definen una serie de acuíferos de edad Cretácica y Miocuatnaria (ITGE, 1989), suprayacentes al acuífero regional Jurásico, con una superficie de 1.934,53 km<sup>2</sup>, cuya zona saturada se sitúa a profundidades superiores a 300 m y constituido por calizas, dolomías y margas de edad Cretácico inferior-Jurásico.

### Marco geológico e hidrogeológico

La unidad a estudiar se encuentra entre la zona Central Subtabular y la zona Oriental Fallada, según

la denominación de Canerot (1974), (Fig. 1-A). En la primera, la estructura es sencilla, formada por pliegues de amplio radio y grandes superficies con estratificación subhorizontal y fracturación E-O, los materiales son exclusivamente Mesozoicos. La segunda zona se caracteriza por la alternancia de horst y graben paralelos a la costa, con sedimentos Neógenos y Cuaternarios rellenando las depresiones, y materiales Mesozoicos que constituyen los relieves montañosos con fracturación NE-NNE (Fig. 1-B).

Desde el punto de vista hidrogeológico la zona de estudio se ubica en la Unidad Hidrogeológica 08.07, (El Maestrazgo), en la cuenca del Júcar (Fig. 2). El acuífero regional profundo está formado por materiales carbonatados del Jurásico y del tránsito Jurásico-Cretácico, que presentan alta permeabilidad por fisuración y karstificación, con un espesor medio de 450 m y valores máximos en torno a 700 m, en el sector de la Sierra de Irta (ITGE, 1989). Los materiales que producen la separación hidráulica del acuífero regional están constituidos por una alternancia de calizas y margas con horizontes arenosos del Valanginiense-Bedouliense y arenas, areniscas y arcillas del Albiense. La base impermeable del acuífero la forman las arcillas y margas con yesos de la facies Keuper del Triásico (Fig. 3).

La gran extensión del acuífero regional Jurásico y los escasos sondeos que captan sus formaciones permeables hacen que no sea fácil determinar sus características hidrodinámicas. Los estudios realizados a este respecto por la Consejería de Obras Públicas, Urbanismo y Transporte de la Generalitat Valenciana (COPUT, 1991) en el sector más oriental y litoral del

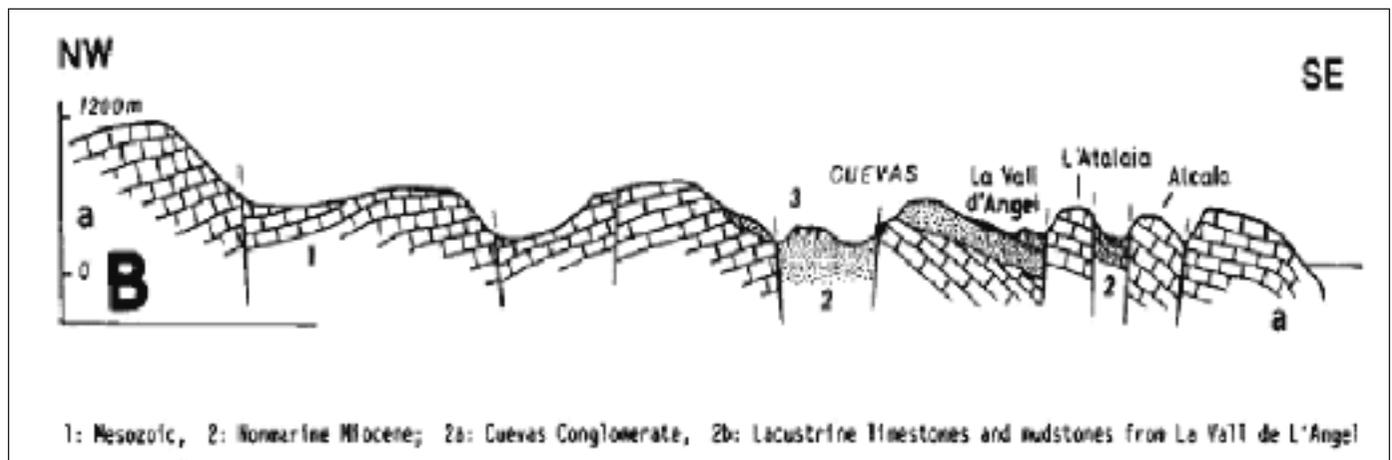


Fig. 1. A- Localización geográfica de la zona de estudio con esquema del marco geológico general y B- Sección representativa del terreno. Fuente: Según Anadón *et al.* (1990). Estructura en horst y grabens del Baix Maestrat y la distribución de las cuencas neógenas y cuaternarias

Fig. 1. A- Geographical location of the study area within the geological context. B- Representative cross section. Source: After Anadón *et al.* (1990). Horst and graben structures of Baix Maestrat and distribution of Neogene and Quaternary basins



Fig. 2. Esquema hidrogeológico sintético de la Unidad Hidrogeológica 08.07, El Maestrazgo. Fuente: Mapa de las unidades hidrogeológicas de España, escala 1:1.000.000 (IGME, 2000)  
 Fig. 2. Synthetic scheme of the hydrogeological Unit 08-07, El Maestrazgo. Source: Hydrogeological units map of Spain, scale 1:1.000.000 (Spanish Geological Survey, 2000)

acuífero asignan unas transmisividades del orden de 9.000 a 15.000 m<sup>2</sup>/día en el área de Peñíscola y del orden de la mitad en la parte sur de la franja costera, siendo de 1.000 a 3.000 m<sup>2</sup>/día en el resto. Por otro lado, algunas perforaciones posteriores realizadas por COPUT y FACSA (Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense, S.A.) con objetivos de abastecimiento han presentado valores de transmisividad más bajos que los mencionados en el sector oriental del acuífero, con magnitudes variables entre los 100 y los 1.000 m<sup>2</sup>/día, incluso se han perforado algunos sondeos negativos.

### Síntesis de algunos de los trabajos realizados y resultados obtenidos

#### Estudio hidroclimático

La realización del estudio hidroclimático supone el punto de partida para la revisión y mejora del balance hídrico del acuífero, ya que se asumía como válido el referido en el informe Estudio Hidrogeológico del Maestrazgo (ITGE, 1989). El estudio actual está basado en el análisis de series de datos de precipitación total mensual y temperatura media mensual de una selección de 21 estaciones meteorológicas comprendidas en la zona de estudio (Fig. 4). La serie analizada abarca desde enero de 1965 hasta diciembre de 2004. Mediante este trabajo se ha establecido para la zona de estudio los siguientes valores medios: precipitación 562 mm, temperatura 15,8°C, evapotranspi-

ración potencial 760 mm, evapotranspiración real 486 mm y lluvia útil 77 mm, equivalente a una primera estimación de aportación hídrica de 185 hm<sup>3</sup>/a. Este primer valor va a ser contrastado mediante la aplicación de diversas técnicas que optimicen la estimación de algunos términos del balance hídrico (localización de las salidas al mar mediante sensor térmico aerotransportado, estimación de las salidas de agua subterránea al mar en función de la concentración de isótopos de radio y evaluación de la recarga mediante APLIS (IGME y GHUMA, 2000)).

#### Análisis piezométrico del acuífero profundo

La superficie piezométrica definida para el acuífero profundo, con 40 medidas de nivel efectuadas en cada una de las seis campañas de julio de 2004 a marzo de 2006 (Fig. 4), establece una zona noroccidental, situada al Norte de una línea imaginaria entre Forcall y Xiva de Morella, con cotas de nivel piezométrico entre 550 y 700 m s.n.m., y una dirección de flujo de agua subterránea aproximada Sur-Norte. El resto del área puede dividirse en dos zonas delimitadas aproximadamente por una línea de dirección NNE-SSO, próxima a las localidades de Albocacer,



Fig. 3. Esquema vertical sintético de distribución de los acuíferos en el área del Maestrazgo (sin escala)  
 Fig. 3. Synthetic vertical scheme of aquifers distribution in Maestrazgo area (without scale)

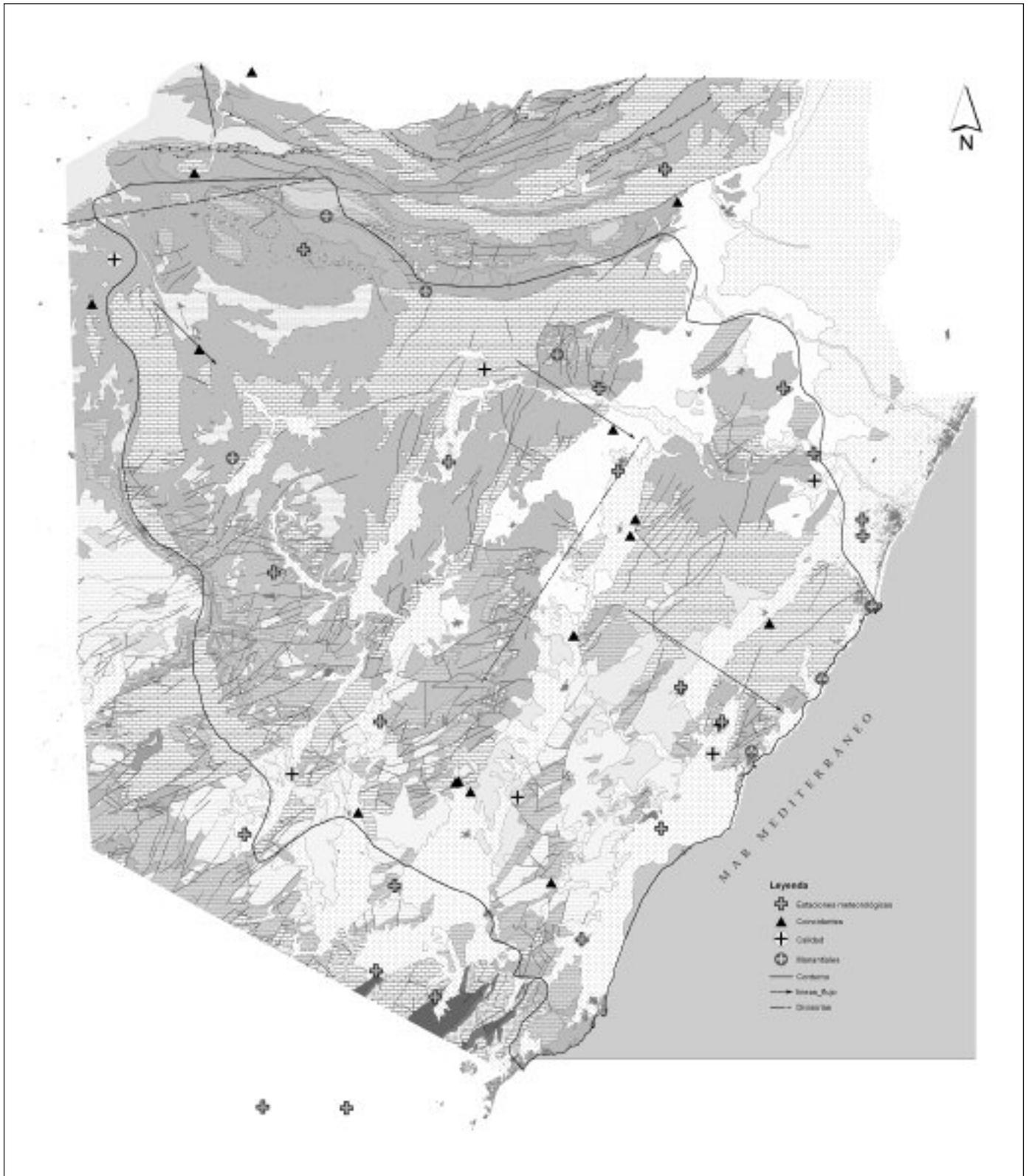


Fig. 4. Esquema hidrogeológico de la zona de estudio. Estaciones meteorológicas utilizadas. Inventario de puntos acuífero utilizados para las campañas de piezometría y calidad realizadas durante 2004 y 2005. Piezometría de julio de 2005 con las direcciones de flujo deducidas Fig. 4. Hydrogeological diagram of the study area. Meteorological stations used. Aquifer point inventory used in piezometric and quality campaigns carried out during 2004 and 2005. Piezometric heads in July of 2005 with flow direction

San Mateo y La Jana. Al Este de esta línea la cota piezométrica varía entre 5 y 20 m s.n.m. con un sentido del flujo Oeste-Este. Al Oeste de la mencionada línea se produce un importante salto piezométrico con valores entre 100 y 400 m s.n.m. y la misma dirección de flujo. Hacia el Oeste, el nivel piezométrico continúa aumentando hasta valores superiores a 500 m s.n.m., manteniendo el mismo sentido del flujo subterráneo.

La superficie piezométrica descrita refleja la influencia estructural sobre las formaciones acuíferas y la disposición relativa de los niveles piezométricos. En el ámbito general del estudio se están llevando a cabo trabajos de análisis estructural que posibilitarán correlacionar estos aspectos con el modelo hidrogeológico conceptual. Asimismo, se han instalado dispositivos de registro continuo de nivel que permitirán evaluar la evolución temporal de las variaciones piezométricas.

### **Análisis químico e isotópico del agua**

Se han realizado cinco campañas de toma de muestras distribuidas durante los años 2004 y 2005, en las que se han muestreado del orden de 30 puntos por campaña. La obtención de las muestras se ha realizado mediante bombeo directo, con medidas in situ de: temperatura, pH y conductividad eléctrica. La determinación de los análisis químicos del agua se ha realizado en el laboratorio del IGME, mientras que las determinaciones isotópicas ( $\delta^{18}\text{O}$ , Deuterio y Tritio) se han efectuado en el Laboratorio de Aplicaciones Nucleares del CEDEX, en Madrid.

La facies dominante en las aguas subterráneas es la bicarbonatada cálcica, excepto en un grupo de muestras que presentan porcentajes importantes del ión sulfato probablemente relacionado con niveles sulfatados del Triásico. El rango de valores de oxígeno-18 y deuterio obtenido es muy amplio (Cuadro I), entre -5,5‰ y 9,0‰ para  $\delta^{18}\text{O}$  y entre -30‰ y -60‰ para  $\delta\text{D}$ . Esta gran variación es lógica por la extensión de la zona estudiada y especialmente por las diferencias de cotas, que van desde el nivel del mar hasta más de 1200 m s.n.m. (Antón-Pacheco *et al.*, 2005). Desde el punto de vista de la composición isotópica son aguas meteóricas que se han infiltrado en el terreno de forma rápida y sin sufrir procesos importantes de evaporación. La observación de los valores de las concentraciones de tritio medidos en el área de estudio (Cuadro I., Fig. 4) pone de manifiesto que corresponden a aguas que se renuevan de forma rápida, a pesar de la profundidad a la que se sitúa el nivel

freático en la mayoría de los casos. No obstante, se ha realizado una toma de muestra selectiva a diferentes profundidades en un punto acuífero, que aportará información sobre la posible estratificación del agua subterránea.

### **Consideraciones finales**

Mediante el estudio hidroclimático se ha calculado para la zona de estudio una aportación hídrica de 185 hm<sup>3</sup>/a. Se observa la existencia de un umbral piezométrico en el sector central de la zona de estudio, con un salto entre 100 y 300 m s.n.m., asimismo, existen importantes oscilaciones piezométricas estacionales. El flujo subterráneo parece estar muy influenciado por la fracturación, estando a la espera de analizar los resultados obtenidos en los estudios geológicos y de análisis estructural, que están siendo llevados a cabo por el IGME.

Las aguas subterráneas analizadas hasta el momento presentan mayoritariamente una facies bicarbonatada cálcica, con una conductividad que varía entre 16.650  $\mu\text{S}$  a 351  $\mu\text{S}$  y temperaturas de 30,2°C a 8,2°C. Los resultados del análisis isotópico indican una rápida renovación de las aguas subterráneas, al menos en el tramo más superficial del acuífero regional Jurásico, presentando una elevada vulnerabilidad del sistema a fuentes de contaminación.

Para llevar a cabo un análisis comparativo de los términos del balance hídrico del acuífero regional Jurásico se están aplicando técnicas de estimación de la descarga al mar de las aguas subterráneas mediante la obtención de valores de temperatura del agua del mar y del agua subterránea y la estimación de las descargas mediante el análisis de isótopos de radio, con la colaboración del INTA (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial) y la UAB (Universidad Autónoma de Barcelona), así como la aplicación del método APLIS para la estimación de la recarga (Universidad de Málaga). Los primeros resultados mediante la aplicación del análisis de los isótopos del Radio (UAB) en la salida natural de Las Fuentes de Alcocebre presentan un valor de velocidad de flujo de 3 cm.d<sup>-1</sup>.

### **Referencias**

- Canerot, J. 1974. Recherches géologiques aux confins des chaînes Iberique et Catalane. Tesis Doct, Publ. Enadimsa, 517 p.
- ITGE. 1989. Estudio Hidrogeológico del Maestrazgo (Castellón).

Código de muestra	Nº inventario	Fecha	Tritio (U.T.)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta\text{D}$ (‰)	$\delta$ (‰)	Método de muestreo
Villores	292080010	15/07/2004	3,8±0,5	-8,34	-56,8	9,9	Bombeo
La Cuba	292130004	15/11/2004		-8,81	-58,9	11,6	Bombeo
Olocau II	292130010	15/11/2004		4,97	1,4	-38,3	Bombeo
La Mata	292130011	15/07/2004	0,1±0,4	-7,00	-40,4	15,5	Bombeo
Celumbres-2	292180019	15/07/2004	1,3±0,6	-7,05	-41,1	15,3	Bombeo
		15/11/2004		-8,52	-55,8	12,3	
Zorita	302010010	15/07/2004		-8,12	-52,5	12,5	Bombeo
Mufró-Ortells	302050003	15/07/2004	5,8±0,7	-6,62	-38,2	14,7	Bombeo
		15/11/2004		-6,40	-37,9	13,3	
Catí	302170099	15/07/2004	3,5±0,7	-6,32	-37,3	13,3	Bombeo
		15/11/2004		-7,56	-47,2	13,3	
Mas del Retoret	302310006	15/07/2004		-7,53	-46,9	13,4	Bombeo
Culla	302310007	15/11/2004		-6,83	-42,1	12,5	Bombeo
Ibarsos II	302360013	15/07/2004	5,3±0,7	-6,66	-39,0	14,3	Bombeo
		15/11/2004		-7,28	-44,2	14,1	
Barrisques	302370018	15/11/2004		-6,76	-42,0	12,1	Bombeo
Planchadells	302370020	15/11/2004		-6,17	-36,4	12,9	Bombeo
Vilanova-I	302380006	15/07/2004	1,6±0,6	-5,55	-33,9	10,5	Bombeo
San Jorge II	312170026	15/07/2004	1,8±0,6	-6,66	-39,6	13,7	Bombeo
		15/11/2004		-5,63	-33,1	11,9	
La Jana	312170027	15/07/2004	4,9±0,5	-6,03	-36,8	11,5	Bombeo
Ayto San Mateo	312210037	15/07/2004		-5,92	-33,6	13,8	Bombeo
		15/11/2004					
San Mateo	312210050	15/07/2004	4,1±0,5	-7,71	-49,1	12,6	Bombeo
		15/11/2004		-7,88	-48,9	14,1	
Crevetes	312230027	15/07/2004	4,5±0,5	-6,23	-38,4	11,5	Bombeo
		15/11/2004					
Salsadella	312250010	15/07/2004	3,3±0,4	-7,61	-48,5	12,4	Bombeo
		15/11/2004		-7,78	-49,9	12,3	
Pedrera	312260004	15/07/2004	3,9±0,5	-6,69	-44,6	11,0	Bombeo
		15/11/2004		-7,26	-44,5	13,6	
La Palaba - Apeadero	312320017	15/07/2004	4,2±0,5	-6,15	-38,7	10,5	Bombeo
Vivers de la Bassa	312320099	15/11/2004		-6,33	-38,9	11,7	Bombeo
Chert.Fte. Albí	302180002	21/05/2004		-6,50	-39,8	12,2	Surgencia
Ermita Castellfort	302210001	21/05/2004		-7,79	-53,1	9,2	Surgencia
Font de la Roca	312220002	11/06/2004		-5,88	-32,3	14,7	Surgencia
Alcocebre. Las Fuentes	312320001	21/05/2004		-6,69	-40,2	13,3	Surgencia
Morella	302120014	11/06/2004		-8,32	-54,5	12,1	Surgencia
Las Rocas	302130003	11/06/2004		-7,48	-43,6	16,2	Surgencia

Tabla 1. Valores de O-18, Deuterio y Tritio de las muestras de agua tomadas durante la campaña de Junio de 2004. Las desviaciones isotópicas (d) se expresan en ‰ con respecto al patrón internacional de V-SMOW

Table 1. O-18, Deuterium and Tritium values of water samples during June 2004 campaign. Isotopic deviations (d) expressed in ‰ according to the international reference standard V-SMOW

- COPUT.1991. Inventario de puntos acuíferos en la Sierra de Irta e informe previo para sondeos de reconocimientos en la zona de Mancomunidad de Baix Maestrat (Castellón).
- COPUT.1991. Estudio de investigación de las descargas de agua subterránea al mar por la Sierra de Irta. Mancomunidad del Baix Maestrat (Castellón).
- MOPU e IGME.1990. Unidades hidrogeológicas de la España Peninsular e Islas Baleares. Síntesis de sus características y mapa a escala 1:1.000.000. Informaciones y estudio nº 52. Servicio Geológico, Madrid.
- Anadón, P. Moissenet, E. y Simón, J.L. 1990. The Neogene Grabens of the Eastern Iberian Chain (Eastern Spain) En: Iberian Neogene Basins. Field Guidebook. (J. Agustí, R. Doménech, R. Julià y Martinell, Eds.). *Paleont. Evol., Men. Esp.* 2: 97-130.
- IGME. 2000. Unidades hidrogeológicas de España. Mapa y datos básicos. Mapa a escala 1:1.000.000.
- Antón-Pacheco, C., Araguás, L., Ballesteros, B., Barnolas, A., Casas, A., Gil, I., Gumiel, J.C., López-Gutierrez, J., Mejías, M., Plata, J.L., Samsó, J.M., Jiménez, I., Marina, M., Mediato, J. y Nuñez, I. 2005. "Investigación sobre el comportamiento hidrogeológico de formaciones acuíferas profundas. Aplicación a la Unidad Hidrogeológica 08.07, (El Maestrazgo). Desarrollo metodológico. Recopilación y síntesis de la información: Informe preliminar". Centro de documentación del IGME: H1-002-05.
- IGME y GHUMA. 2000. "APLIS. Una propuesta metodológica para la determinación y zonación de la recarga en acuíferos carbonáticos". ISBN: 84-7840-487-2. Depósito legal: M-41794-2003.

Recibido: diciembre 2005

Aceptado: julio 2006