

ESTUDIO ISOTÓPICO AMBIENTAL (O^{18} -D) EN LA UNIDAD ANOIA: PRINCIPALES ZONAS DE RECARGA E IMPLICACIONES EN EL FUNCIONAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL SISTEMA

Javier Lambán¹ y Emilio Custodio^{1,2}

RESUMEN: La Unidad Anoia se encuentra situada en la Cordillera Prelitoral Catalana, en el sector NE del denominado Macizo o Bloc del Gaià. Tiene una extensión aproximada de 160 km². Está constituida por tres niveles acuíferos carbonatados superpuestos: Triásico medio (nivel inferior), Triásico medio (nivel superior) y Eoceno inferior. En el presente trabajo se estudian los datos isotópicos ambientales correspondientes a las campañas de muestreo: 1979-82, 1983-85 y 1994-96. Tras discutir los datos y suprimir aquellos que contienen diversas causas de error dicho estudio ha permitido obtener una línea altitudinal local representativa de la recarga en la zona. La recta altitudinal se ha obtenido principalmente a partir de la composición isotópica de manantiales cuya cota topográfica representa razonablemente bien la altitud de recarga del sistema. A partir de la recta altitudinal definida se establecen tres zonas de recarga principales que permiten aumentar el conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico del sistema y la mejor localización de las áreas de recarga de los manantiales principales. En una zona parece identificarse evaporación previa a la recarga por detención del agua en superficie.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de técnicas isotópicas al estudio de sistemas hidrogeológicos es de gran interés ya que permite complementar o contrastar hipótesis establecidas mediante otro tipo de métodos. Dentro de los isótopos estables, la utilización de oxígeno-18 (^{18}O) y deuterio (D ó 2H) es muy común, ya que al formar parte de la molécula de agua son muy buenos trazadores del movimiento de la misma y de algunos de los procesos que la afectan.

La distribución de la concentración de ^{18}O y D en la precipitación ha sido reproducida teóricamente a escala global mediante la utilización de modelos de circulación general atmosférica (Jouzel y Merlivat, 1984; Jouzel, 1987). Sin embargo, esta información tiene únicamente un carácter general, no pudiéndose utilizar para predecir la composición isotópica de la precipitación a escala regional o local. Una forma de conocer esta composición isotópica a escala local consiste en muestrear aguas subterráneas procedentes de precipitaciones locales. Esto permite obtener valores isotópicos medios del agua infiltrada, promediados según la recarga. Dichos valores son aproximadamente coincidentes con la composición isotópica media ponderada de las precipitaciones locales cuando la recarga es proporcional a la precipitación. Esto es lo que parece suceder en el área de estudio (Manzano *et al.*, 1997).

En el presente trabajo se presenta un estudio isotópico ambiental realizado en la Unidad Anoia. Dicha zona se encuentra en la Cordillera Prelitoral Catalana, al NE del denominado Macizo o Bloque del Gaià. Para ello se toman como punto de partida los datos correspondientes a las campañas de muestreo: 1979-82, 1983-85 y 1994-96. A partir de dichos datos se obtiene una línea meteó-rica y una recta altitudinal local. Por último, a partir de la recta altitudinal local se definen las principales cotas de recarga, lo que permite mejorar el conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico del sistema.

PRESENTACIÓN DE DATOS

Los primeros estudios isotópicos ambientales en la zona de estudio fueron realizados durante la década de 1980. Durante estos años se realizaron dos campañas de muestreo: 1979-82 (^{18}O -D) y 1983-85 (^{18}O). La frecuencia de muestreo fue aproximadamente mensual para la primera campaña y bimensual para la segunda.

En ambos casos los puntos muestreados fueron los manantiales principales: Santa Candia, Mina Molí Major, Sondeo S4, Lago de Capellades y Les Deus (Custodio y Bayó, 1983). Los puntos de muestreo comentados se presentan en la *Figura 1a*. No se realizaron análisis isotópicos de la precipitación. Todos los análisis fueron realizados por el laboratorio del Gabinete de Aplicaciones

¹ Departamento de Ingeniería del Terreno y Cartográfica. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona

² Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid

Artículo publicado en *Ingeniería del Agua*. Vol. 6 Num.2 (junio 1999), páginas 139-150, recibido el 28 de abril de 1998 y aceptado para su publicación el 5 de marzo de 1999. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

	Les Deus			Mina Molí Major			Sondeo S4			Santa Candia			Lago Capellades		
	$\delta^{18}O$	δD	d	$\delta^{18}O$	δD	D	$\delta^{18}O$	δD	d	$\delta^{18}O$	δD	d	$\delta^{18}O$	δD	d
30/04/79							-6,9	-38.1		-7.5	-46.1	13.9	-6,9	-42	13,2
9/06/79	-7.3	-41.7	16.7	-8.3	-43.7	22.7	-7.2	-45.5	12.1	-7.8	-47.5	14.9	-7.4	-42,3	16,9
27/06/80	-7.1	-43.1	13.7	-7.7	-52.1	9.5	-7.2	-44.4	13.2	-7.6	-48.2	12.6	-6,9	-44,1	11,1
10/01/80	-7	-40.9	15.1	-7.7	-46.9	14.7	-7.3	-49.9	8.5	-7.7	-45.4	16.2	-7,2	-46,9	10,7
11/07/80	-7.4	-43.8	15.4				-7.6	-50.7	10.1	-7.8	-47	15.4	-7,7	-44	17,6
1/12/80	-7.1	-45.5	11.3				-7.7	-44.1	17.5	-7.6	-49.9	10.9	-7,5	-47,9	12,1
14/01/81	-6.8	-43.7	10.7							-6.9	-47.4	7.8	-6,9	-43,3	11,9
6/02/81	-7.2	-49.7	7.9				-7.2	-44.4	13.2	-7.7	-50.8	10.8	-6,8	-41,9	12,5
4/03/81	-3.5	-44.6	-16.6	-8	-48.6	15.4	-7.8	-49.9	12.5	-8	-52.3	11.7	-7,2	-45,4	12,2
1/04/81	-5.9	-44	3.2				-8.2	-45.3	20.3	-7.9	-54.7	8.5	-8,1	-39,2	25,6
8/05/81	-7.1	-38.9	17.9	-7.5	-49.8	10.2	-6.9	-47.4	7.8				-7,2	-39,6	18
6/07/81	-7.2	-45.7	11.9	-7.8	-49.6	12.8	-7.6	-45.3	15.5	-4.2	-45.4	-11.8	-7,6	-43,3	17,5
9/11/81	-7.6	-37	23.8	-7.9	-43	20.2	-7.6	-44	16.8	-8.1	-48	16.8	-7,1	-42	14,8
7/12/81	-7.4	-38	21.2	-8	-38	26	-7.4	-39	20.2	-8.5	-37	31	-7,2	-39	18,6
24/01/82	-8.2	-37	28.6	-8.9	-34	37.2	-8.1	-38	26.8	-8.5	-39	29	-7,3	-37	21,4
18/02/82	-8.4	-40	27.2	-8.4	-37	30.2	-7.7	-30	31.6	-7.8	-38	24.4	-7,9	-31	32,2
24/03/82	-7.2	-42	15.6	-7.4	-46	13.2	-7	-42	14	-7.4	-41	18.2	-7,3	-37	21,4
20/04/82	-7.6	-31.4	29.4	-8.3	-30.7	35.7	-7.5	-31.1	28.9	-8.3	-41.9	24.5	-7,6	-31,7	29,1
25/05/82	-7.9	-42.6	20.6	-8.2	-46.6	19	-8	-43.4	20.6	-8.3	-45	21.4	-7,6	-43,8	17
25/06/82	-7.7	-40.7	20.9	-7.9	-41.5	21.7	-7.6	-41.6	19.2	-8	-45.1	18.9	-7,5	-39,8	20,2
19/07/82	-7.5	-41.1	18.9	-7.7	-44.2	17.4	-7.5	-41.5	18.5	-7.9	-44.5	18.7	-7,4	-40,5	18,7
9/08/82	-7.6	-44.7	16.1				-7.6	-42.9	17.9	-7.6	-44.2	16.6	-7,5	-42,9	17,1
6/09/82	-7.1	-46.4	10.4	-7.5	-47,9		-7.5	-46.9	13.1	-7.8	-49.5	12.9	-7,5	-48,1	11,9
11/10/82	-7	-41	5	-7.5			-7.7	-46.2	15.4	-7.9	-40.7	22.5	-7,7	-47,3	14,3
22/11/82	-8.1	-41.8	23	-8.4	-40.2	27	-7.9	-38.1	25.1	-8.4	-41.5	25.7	-7,6		
13/12/82	-8.8	-41.5	28.9	-7.5	-42.6	17.4	-8	-43.3	20.7	-7.9	-40.9	22.3	-7,8	-42,2	20,2
Media	-7.2	-41.9	16.3	-7.9	-43.5	20.6	-7.6	-43.1	17.5	-7.7	-45.2	16.7	-7,4	-41,7	17,6
Mediana	-7.3	-41.8	16.1	-7.9	-44	19	-7.6	-44.1	17.1	-7.8	-45.3	16.7	-7,5	-42,3	17,3
Des. típica	1	3.6	9.4	0.4	5.6	8.1	0.3	5	6	0.8	4.5	8.5	0.3	4.4	5.5

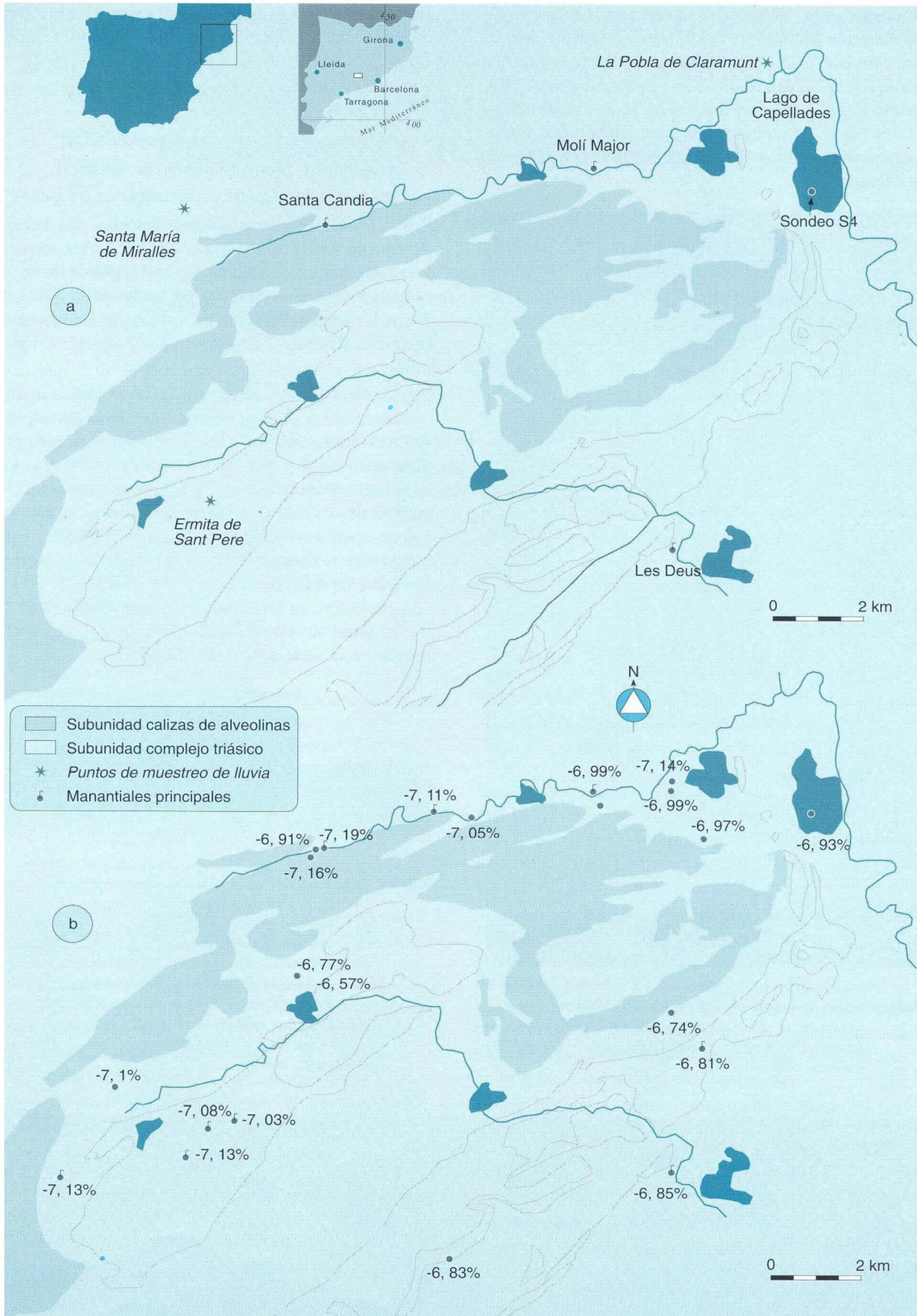
Tabla 1. Datos isotópicos ($\delta^{18}O$, δD y d) pertenecientes a la campaña de muestreo 1979-82. Media, mediana y desviación típica correspondiente a: Les Deus, Mina del Molí Major, Sondeo S4 (Capellades), Santa Candia y Lago de Capellades. (d = exceso de deuterio = $\delta D - 8 \delta^{18}O$). Valores en ‰ SMOW.

Nucleares del CEDEX para la Comisaria de Aguas del Pirineo Oriental (actual Junta d'Aigües de Catalunya) y el Servicio Geológico de Obras Públicas. Los datos pertenecientes a ambas campañas así como la media, mediana y desviación típica correspondientes se presentan en las Tablas 1 y 2.

El estudio preliminar de estos datos puso de manifiesto la presencia de dos zonas de recarga: una más alta, dando lugar a composiciones isotópicamente más ligeras (Santa Candia y Molí Major), y otra más baja, con composiciones isotópicas más pesadas (Sondeo S4 y Les Deus). Un estudio más detallado de estos datos se presenta en el siguiente apartado.

	Les Deus	M. Major	Sondeo S4	S. Candia
1/01/83	-7.7	—	—	—
12/01/84	-7.5	-7.9	—	-7.8
21/03/84	-7.6	-6.9	—	-8
9/05/84	-8.7	—	-7.75	-8.1
11/07/84	-7.2	-8	-7.8	-7.9
28/09/84	-7.9	-7.8	-8	-8.2
19/11/84	-7.7	-7.9	-7.6	-8
4/02/85	-7.7	-6.8	-7.7	-8
Media	-7.7	-7.5	-7.7	-8
Mediana	-7.7	-7.8	-7.7	-8
Desviación	0.4	0.5	0.1	0.1

Tabla 2. Datos isotópicos ($\delta^{18}O$) pertenecientes a la campaña de muestreo 1983-85. Media, mediana y desviación típica correspondiente a los siguientes puntos de muestreo: Les Deus, Mina del Molí Major, Sondeo S4 (Capellades), Santa Candia y Lago de Capellades. Valores en ‰ SMOW.



Figuras 1a y 1b. (1a.) Mapa de situación de la Unidad Anoia (Cordillera Prelitoral Catalana): puntos de muestreo de lluvia y principales manantiales considerados. (1b.) Mapa de distribución de $\delta^{18}O$ en el agua subterráneas correspondiente al muestreo realizado durante el periodo 1994-96. Valores en ‰ SMOW

Recientemente (1994-96) se ha realizado una campaña de muestreo isotópico (¹⁸O-D), tanto del agua subterránea como del agua de lluvia correspondiente a distintos puntos de la Unidad Anoia. Con respecto al agua subterránea se han realizado un total de 26 análisis en diferentes pozos, piezómetros y manantiales. Los datos isotópicos obtenidos se presentan en la *Figura 1b* y en la *Tabla 3*.

Punto	Cota	Fecha	δ ¹⁸ O	δD	d
Mina Rofes	520	18/11/94	-6.57	-44	8.56
Molí Major	312	18/11/94	-6.99	-46.5	9.42
Les Comes	349	25/11/94	-7.27	-47.1	11.06
Orpi 1	355	25/11/94	-7.16	-48.4	8.88
F. Avellá	600	18/11/94	-6.83	-43.1	11.54
U.F.BOSC	530	18/11/94	-6.74	-41.9	12.02
Ayto. Carme	380	18/11/94	7.1	-48.1	8.7
Les Deus	340	11/11/94	-6.85	-43.5	11.3
Cuitora	680	11/11/94	-7.13	-48.3	8.74
Ay. Llacuna	600	11/11/94	-6.5	-44.6	7.4
P. Rofes	559	11/11/94	-6.77	-45.6	8.56
F. Bosc	480	11/11/94	-6.81	-40.2	14.28
Sta Candia	380	11/11/94	-7.19	-47.4	10.12
Viladevall	350	11/11/94	-7.2	-45.2	12.4
S-4	330	18/11/94	-6.93	-43.8	11.64
Dous	395	27/02/95	-6.54	-41.4	10.92
Marquet	680	27/02/95	-7.03	-46.2	10.04
F.Teula	360	03/05/95	-7.11	-45.7	11.18
P. Agost	300	03/05/95	-7.14	-47.8	9.32
P. Orpi	350	03/05/95	-7.05	-47.6	8.8
P. Gramunt	385	03/05/95	-6.97	-47.8	7.96
R. Carme	370	03/05/95	-6.91	-47.5	7.78
R.Agost	320	03/05/95	-6.99	-45.8	10.12
SPere	670	05/03/96	-7.08	-42.9	13.74
NTBusq	680	05/03/96	-7.13	-42.6	14.44

Tabla 3. Punto de muestreo, cota topográfica y composición isotópica (δ¹⁸O, δD y d) pertenecientes a la campaña de muestreo 1994-96 (d= exceso de deuterio = δD- 8 δ¹⁸O) Valores en ‰ SMOW

Estación	Altitud d	22/02/95			21/04/95			24/04/95			21-24/04/95			11/05/95		
		δ ¹⁸	δD	d	δ ¹⁸ O	δD	d									
La Pobra	300	-6.91	-45.1	10.18	-5.1	-35.3	5.5	-6.92	-40.1	15.26	—	—	—	—	—	—
Les Comes	360	-7.54	-44.4	15.92	-6.68	-35.3	18.14	-5.89	-38.3	8.82	—	—	—	—	—	—
S.M ^a Miralles	550	-7.34	-39.5	19.22	—	—	—	—	—	—	-7.13	-41	16.04	-4.44	-34.2	1.3
Sant Pere	700	-8.77	-59.5	10.66	—	—	—	—	—	—	-7.32	-46.9	11.66	-4.3	-33.6	0.8

Tabla 4. Punto de muestreo de agua de lluvia, altitud y composición isotópica (δ¹⁸O, δD y d) pertenecientes a la campaña de muestreo 1994-96 (d = exceso de deuterio = δD- 8 δ¹⁸O). Valores en ‰ SMOW

En relación con el agua de lluvia se han instalado cuatro tomamuestras en diferentes puntos de la unidad (*Figura 1a*):

- La Pobra de Claramunt (planta potabilizadora de Aigües de Rigat)
- Les Comes (captaciones de Aigües de Rigat)
- Restaurante L'Escola (Santa M^a de Miralles)
- Ermita de Sant Pere (proximidades de La Llacuna)

Los vasos de los tomamuestras contenían una lámina flotante de vaselina líquida para evitar la evaporación. Los datos isotópicos obtenidos para el agua de lluvia en cada uno de estos puntos se presentan en la *Tabla 4*. Todos los análisis han sido realizados por los laboratorios BSIA (Bureau of Stable Isotope Analysis) en Inglaterra.

Según Plata (1994), la composición isotópica media ponderada de la precipitación en Barcelona correspondiente a octubre-abril (la época preferente de recarga) durante 1984-86 es de δ¹⁸O = - 6‰ y δD = -36,5‰ ; las aguas subterráneas locales presentan una composición en δ¹⁸O de -6,7‰. Estos datos son coherentes con los valores medios obtenidos en la zona de estudio. Esta coherencia se observa tanto en la precipitación correspondiente al mismo periodo (-6,3 a -6,7‰ en δ¹⁸O y -38,2 a 46,6‰ en δD), como en la composición en δ¹⁸O de las aguas subterráneas (-6,5 a -7,3‰). Los valores mencionados se resumen en la *Tabla 5*.

	Precipitación		Agua subterránea
	δ ¹⁸ O	δD	δ ¹⁸ O
Barcelona	-6	-36.5	-6.7
U. Anoia	(-6.3 - -6.7)	(-38.2 - -46.6)	(-6.5 --7.3)

Tabla 5. Comparación de las composiciones isotópicas correspondientes a la precipitación y a las aguas subterráneas en Barcelona (Plata, 1994) y en la zona de estudio durante 1994-96. Los valores para la precipitación en Barcelona corresponden a la composición media ponderada por la cantidad de precipitación durante octubre-abril de 1984-86 (Plata, 1994), mientras que en la zona de estudio dichos valores corresponden a la composición media no ponderada durante febrero-mayo de 1995. Valores en ‰ SMOW

DATOS ISOTÓPICOS CORRESPONDIENTES A 1979-82 Y 1983-85

Se han representado las composiciones isotópicas correspondientes a las campañas de muestreo: 1979-82 (^{18}O -D) y 1983-85 (^{18}O). Se observa una gran variabilidad en todos los puntos muestreados: Santa Candia, Mina del Molí Major, Cal Tort (río Carme), Sondeo S4,

Lago de Capellades y Les Deus (Figura 2). Esta gran variabilidad se atribuye a la existencia de problemas durante la preparación de las muestras en el laboratorio entre diciembre de 1981 y noviembre de 1982 (Custodio y Bayó, 1983). Si se eliminan los análisis correspondientes a dicho periodo se obtienen mejores resultados (Tabla 6).

	Les Deus			Mina Molí Major			Sondeo S4			Santa Candia			Lago Capellades		
	$\delta^{18}\text{O}$	δD	d	$\delta^{18}\text{O}$	ΔD	d									
Media	-7.09	-42.69	14.03	-7.76	-46.3	16.18	-7.57	-45.4	15.16	-7.76	-47.9	14.25	-7.35	-43.5	15.2
Mediana	-7.2	-42.6	15.4	-7.7	-46.6	16.4	-7.6	-44.9	15.45	-7.8	-47.5	14.4	-7.35	43.3	14.8
Desviación	0.9	3	8.3	0.2	3	4.1	0.3	2.6	3.9	0.3	2.8	3.7	0.3	2.5	3

Tabla 6. Datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$, δD y d) pertenecientes a la campaña de muestreo 1979-82 una vez eliminados los análisis anómalos. Media, mediana y desviación típica correspondiente a los siguientes puntos de muestreo: Les Deus, Mina del Molí Major, Sondeo S4 (Capellades), Santa Candia y Lago de Capellades. (d = exceso de deuterio = $\delta\text{D} - 8 \delta^{18}\text{O}$). Valores en ‰ SMOW

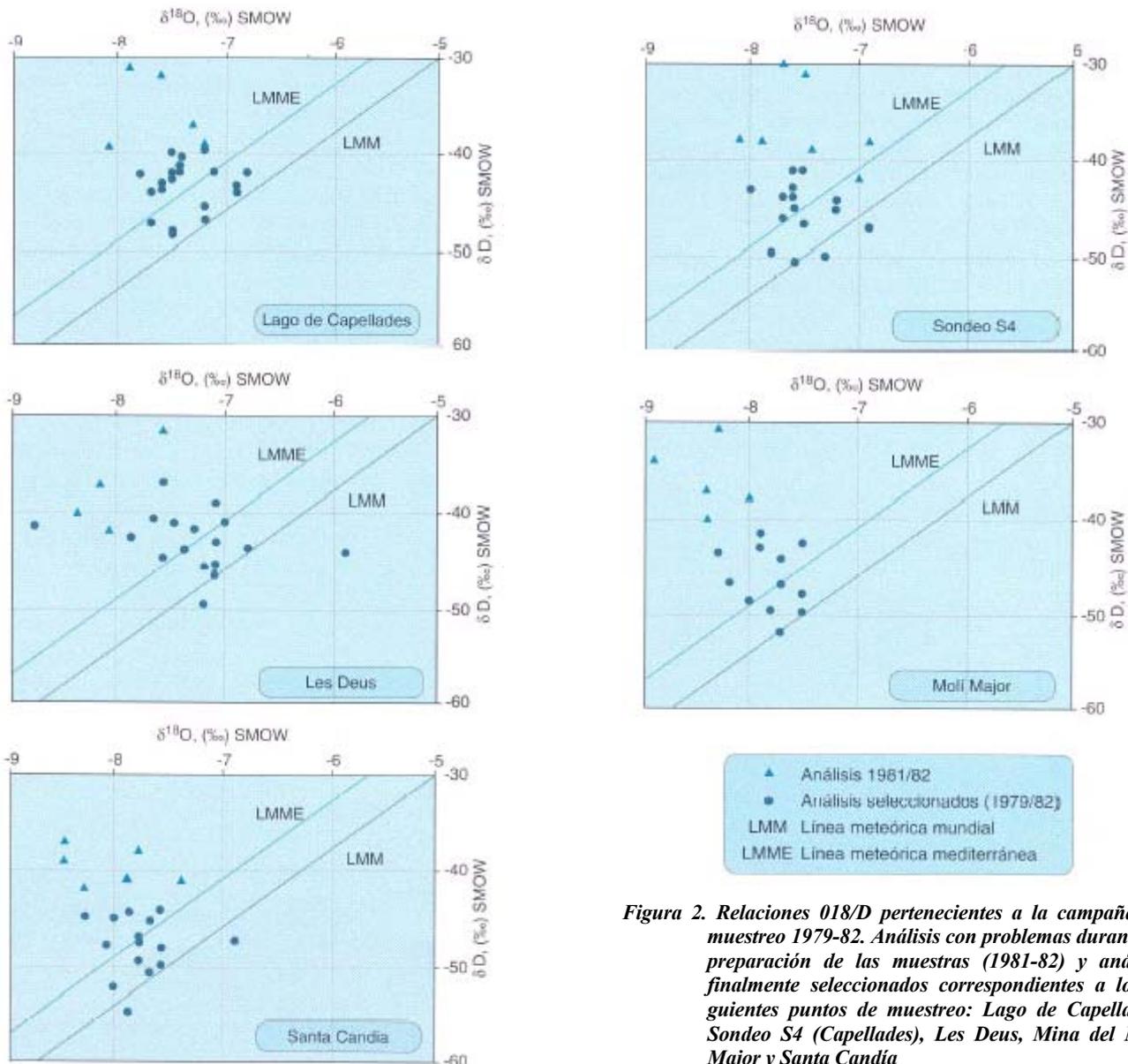


Figura 2. Relaciones $\text{O}18/\text{D}$ pertenecientes a la campaña de muestreo 1979-82. Análisis con problemas durante la preparación de las muestras (1981-82) y análisis finalmente seleccionados correspondientes a los siguientes puntos de muestreo: Lago de Capellades, Sondeo S4 (Capellades), Les Deus, Mina del Molí Major y Santa Candia

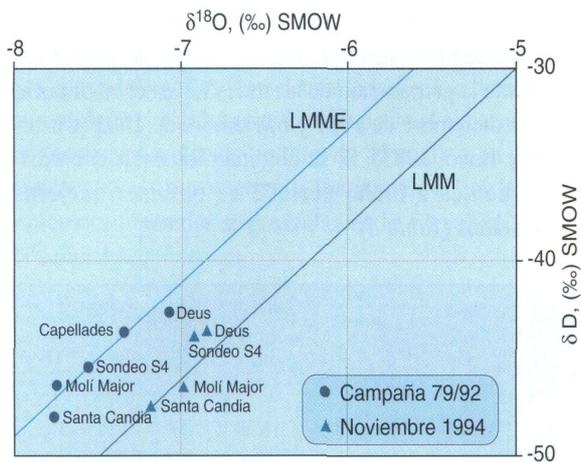


Figura 3. Valores medios de la relación O-18/D pertenecientes a la campañas de muestreo 1979-82 y noviembre 1994. Se indican los puntos de muestreo (LMM= Línea me-teórica mundial; LMME= Línea meteórica mediterránea).

Una vez eliminados estos análisis, la representación de los datos medios obtenidos para la campaña 1979-82 y su comparación con los análisis puntuales realizados en noviembre 1994 (Figura 3) pone de manifiesto la existencia de una aceptable coincidencia para el deuterio, mientras que para el O-18 se observa un claro desplazamiento, con composiciones más ligeras en 1979-82 con respecto a 1994.

Las mayores diferencias observadas en O-18 corresponden al Molí Major (-0,76 ‰), mientras que las menores diferencias corresponden a Les Deus (-0,21‰).

Es importante indicar que el error instrumental de medida del O-18 es de ± 0.2 ‰ (sin tener en cuenta el error introducido durante la preparación de las muestras) y que los análisis correspondientes a noviembre de 1994 son de lluvias puntuales en vez de acumulaciones men-

suales. A pesar de ello se observa un cierto desplazamiento en O-18, que también aparece en otras zonas de estudio, como la Serra de Tramuntana, Mallorca (Gelabert *et al.* 1996). Se atribuye a diferencias sistemáticas entre los distintos laboratorios utilizados: CEDEX (1979-82) y BSIA (1983-85). Los análisis realizados por el laboratorio BSIA fueron posteriormente comprobados y confirmados, así como el patrón de referencia utilizado. Con la finalidad de comparar los datos isotópicos (¹⁸O-D) correspondientes a las campañas 1979-82, 1983-85 y noviembre 1994, se han representado dichos datos en función del punto de muestreo. Para ello se han considerado tanto los valores medios como las desviaciones correspondientes a los periodos 1979-82 y 1983-85, así como el único dato disponible en noviembre 1994. Para la campaña 1979-82 estos valores se han obtenido una vez eliminados los análisis con problemas anteriormente comentados, mientras que para la campaña 1983-85 sólo ha podido considerarse el O-18 dada la inexistencia de datos de deuterio (Figura 4). Este tipo de representación pone de manifiesto una importante variabilidad en O-18, así como una aceptable correspondencia para el deuterio. Esta correspondencia ha permitido establecer un gradiente de concentraciones entre los distintos puntos de muestreo. Los resultados son coherentes con las diferencias observadas en la Figura 3.

El estudio de los datos isotópicos correspondientes a los periodos 1979-82 y 1983-85 permite concluir por tanto:

- Una mayor fiabilidad para el deuterio una vez eliminados los análisis con problemas correspondientes fundamentalmente al periodo comprendido entre diciembre 1981 y noviembre 1982.
- Un claro desplazamiento del O-18, obteniéndose composiciones más ligeras durante 1979-82 y 1983-85 con respecto a noviembre 1994, lo que se atribuye al distinto laboratorio utilizado.

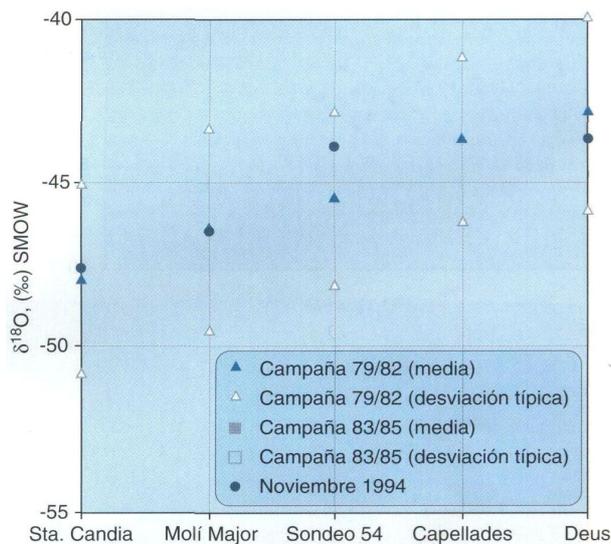
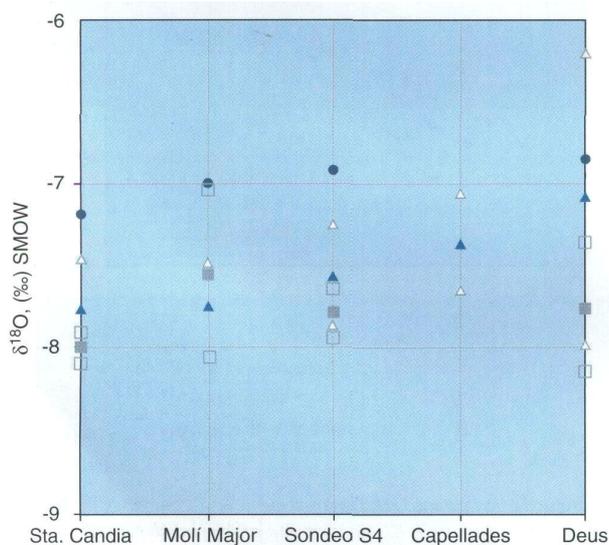


Figura 4. Valores isotópicos ($d^{18}O$ y dD) correspondientes a las campañas de muestreo 1979-82, 1983-85 y noviembre de 1994. Para las campañas 1979-82 y 1983-85 se ha representado tanto el valor medio como la desviación típica. Puntos de muestreo: Lago de Capellades, Sondeo S4 (Capellades), Les Deus, Mina del Molí Major y Santa Candia. Durante noviembre de 1994 no se muestreó el Lago de Capellades

ESTUDIO DE LA RELACIÓN ¹⁸O/D

En las Figuras 5 y 6 se representan los datos de ¹⁸O y D (precipitación y agua subterránea) obtenidos durante el periodo 1994-96, comparándolos con la línea meteórica mundial (LMM) $\delta D = 8 \delta^{18}O + 10$ y mediterránea local (LMME) $\delta D = 8 \delta^{18}O + 15$. Este tipo de representación permite poner de manifiesto las siguientes observaciones principales:

a. Composiciones isotópicas por lo general similares entre la precipitación y las aguas subterráneas. Las precipitaciones más ligeras corresponden a las recogidas en Sant Pere (700 m), mientras que las más pesadas corresponden a La Pobla (300 m) y Les Comes (360 m), lo cual resulta coherente con la altitud a la que se encuentran situados los diferentes tomamuestras.

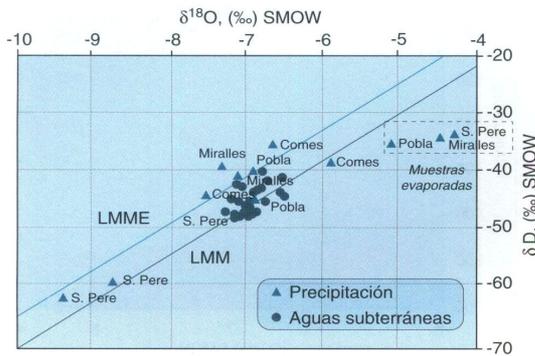
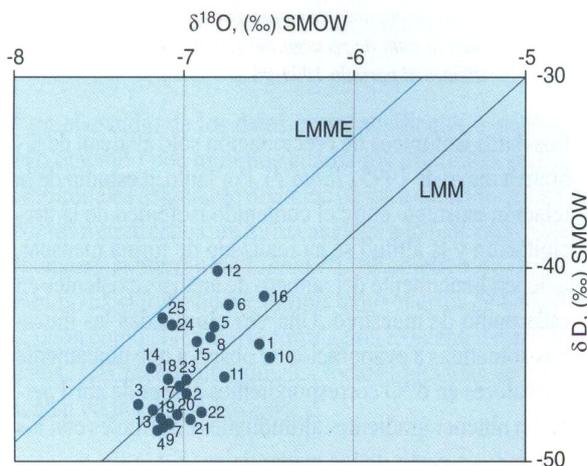


Figura 5. Composición isotópica (¹⁸O-D) correspondiente a la precipitación y las aguas subterráneas de la Unidad Anoia durante 1994-96 (LMM= Línea meteórica mundial; LMME= Línea meteórica mediterránea).

b. Evaporación en ciertas muestras de lluvia correspondientes a Les Comes (24/4/95), La Pobla (21/4/95), S.Mª de Miralles (11/05/95) y especialmente Sant Pere (11/05/95). Estos puntos se disponen formando una recta de pendiente 3,7 resultante del mayor enriquecimiento producido en ¹⁸O con respecto al D en el agua residual de evaporación. La existencia de vaselina líquida en los tomamuestras permite interpretar dicha evaporación como producida principalmente durante la caída de la lluvia (lluvia escasa en ambiente con pequeña humedad relativa).



- c. Posible evaporación en el agua subterránea correspondiente a la Mina de Rofes, Pozo de Rofes y Pozo de La Llacuna. El estudio únicamente de la relación ¹⁸O/D y la escasez de datos no permite asegurar la existencia de dicha evaporación.
- d. Coherencia de las composiciones isotópicas obtenidas con la línea meteórica mundial y mediterránea, observándose por lo general un mejor ajuste con respecto a la línea meteórica mundial (sobre todo en las aguas subterráneas). La línea meteórica local obtenida a partir de todos los datos isotópicos disponibles (a excepción de las muestras de lluvia evaporadas) es $\delta D = 7,15 \delta^{18}O + 5,4$. Si se eliminan los puntos con posible evaporación anteriormente mencionados la línea meteórica local es $\delta D = 7,6 \delta^{18}O + 9,34$ (muy próxima a la línea meteórica mundial).
- e. Confirmación de los resultados obtenidos en estudios anteriores (Custodio y Bayó, 1983), observándose dos zonas de recarga principales: una más alta, dando composiciones isotópicas más ligeras (cuenca del Carme y manantiales situados en las inmediaciones de La Llacuna), y otra más baja, con composiciones isotópicas más pesadas (Cuenca de Mediona y área de Capellades).

RELACIÓN CON LA ALTITUD

El escaso número de datos isotópicos de precipitación existentes, unido a la gran variabilidad espacial y temporal de la composición isotópica en la precipitación, ha llevado a obtener una recta altitudinal local a partir principalmente de la composición isotópica de las aguas subterráneas. Para ello se han seleccionado aquellos manantiales cuya cota topográfica representa razonablemente bien la altitud de recarga del sistema. Esta selección se ha realizado teniendo en cuenta las características topográficas e hidrogeológicas de la zona, eligiendo los siguientes puntos: Font Cuitora, Font Marquet, Font de Sant Pere, Font de Torribusquetá, Font de L'Avellá y Font del Bosc. Los puntos que mejor representan la cota de recarga son la Font de Sant Pere y la Font de Torribusquetá, ya que se trata de manantiales esporádicos muestreados tras un importante periodo de lluvias. El resto de puntos corresponde a manantiales permanentes representativos seguramente de una cota de recarga su-

1	Mina de Rofes	14	Pozo Viladevall (Can Bou)
2	Mina Molí Major	15	Sondeo S4
3	Pozo Les Comes	16	Font Les Dous
4	Pozo Orpí	17	Font Marquet
5	Font de Avellá	18	Font de La Teula
6	Pozo Urb. Font del Bosc	19	Piezómetro de Agost
7	Pozo Ayto. de Carme	20	Piezómetro de Orpinell
8	Font Les Deus	21	Piezómetro Can Gramunt
9	Font Cuitora	22	Riera de Carme
10	Pozo Ayto. de La Llacuna	23	Riera de Agost
11	Pozo de Rofes (J.A.C.)	24	Font de Sant Pere
12	Font del Bosc	25	Font de Torribusquetá
13	Font Santa Candia		

Figura 6. Composición isotópica (¹⁸O-D) correspondiente a las aguas subterráneas de la Unidad Anoia (1994-96). Número de identificación a la derecha del punto

	Factor de ponderación						a	B	E	r	100/b
	Avellá	Cuitora	Bosc	Marq	CSpere	Tbusq					
δO^{18}	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	-2753.11	-483.42	35.8	-0.87	-0.206
δO^{18}	0.12	0.006	0.24	0.006	0.3	0.3	-3162.5	-540.1	32.23	-0.92	-0.185
ΔD	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	-220.5	-19.41	64.74	-0.69	-5.14
ΔD	0.12	0.006	0.24	0.006	0.3	0.3	-1704.6	-55	43.81	-0.84	-1.81

Tabla 7. Rectas altitudinales obtenidas por mínimos cuadrados asignando distintos pesos (factor de ponderación) a cada uno de los manantiales considerados; a y b = coeficientes de las rectas de ajuste (a = pendiente y b = coordenada en el origen); E = error en la desviación; r = índice de correlación; 100/b = gradiente altitudinal en ‰ cada 100 m

terior a la cota topográfica. Como se verá más adelante, estas consideraciones se han tenido en cuenta a la hora de obtener la recta altitudinal local.

A partir de la composición isotópica de estos manantiales se han obtenido las rectas altitudinales para el $\delta^{18}O$ y para el δD presentadas en la Tabla 7.

Como se ha comentado anteriormente, dichas rectas se han calculado por mínimos cuadrados, asignando distintos pesos a cada uno de los manantiales considerados. Los pesos se han asignado de una forma subjetiva, aunque considerando las características de los manantiales anteriormente comentadas, es decir, dando mayor importancia a los puntos más representativos de la altitud de recarga (Font de Sant Pere y Font de Torrebusquetá) y minimizando los menos representativos (Font Cuitora y Font Marquet).

En la Tabla 7 se presenta el peso asignado a cada manantial así como el error de desviación (error), índice de correlación (r) y gradiente altitudinal (100/b) correspondiente a cada una de las rectas de ajuste. Los resultados obtenidos ponen de manifiesto un mejor ajuste para el oxígeno-18 que para el deuterio.

Los gradientes altitudinales obtenidos: $-0,18 \delta^{18}O \text{ ‰}/100 \text{ m}$ y $-1,81\delta D \text{ ‰}/100 \text{ m}$ son coherentes entre sí (relación entre gradientes 9,78, próximo al valor 8) y con los gradientes definidos en otras zonas (Tabla 8). Las rectas altitudinales locales elegidas se presentan en la Figura 7.

	$\delta^{18}O \text{ ‰}/100 \text{ m}$
Europa	-0.15 ± 0.5 (Custodio et al., 1973)
Gran Canaria (N)	-0.129 (Gonfiantini, 1973)
Gran Canaria (S)	-0.250 (Gonfiantini, 1973)
Tenerife	-0.222 (Gonfiantini, 1973)
Tenerife	-0.243 (Custodio et al., 1973)
Gomera	-0.243 (Custodio y Manzano, 1973)
País Vasco	-0.21 a -0.29 (Iribar y Antigüedad, 1996)
Unidad Anoia	-0.18 a -0.20 (este trabajo)

Tabla 8. Gradientes altitudinales $\delta^{18}O \text{ ‰}/100 \text{ m}$ obtenidos en otras zonas de estudio y comparación con el determinado para la Unidad Anoia.

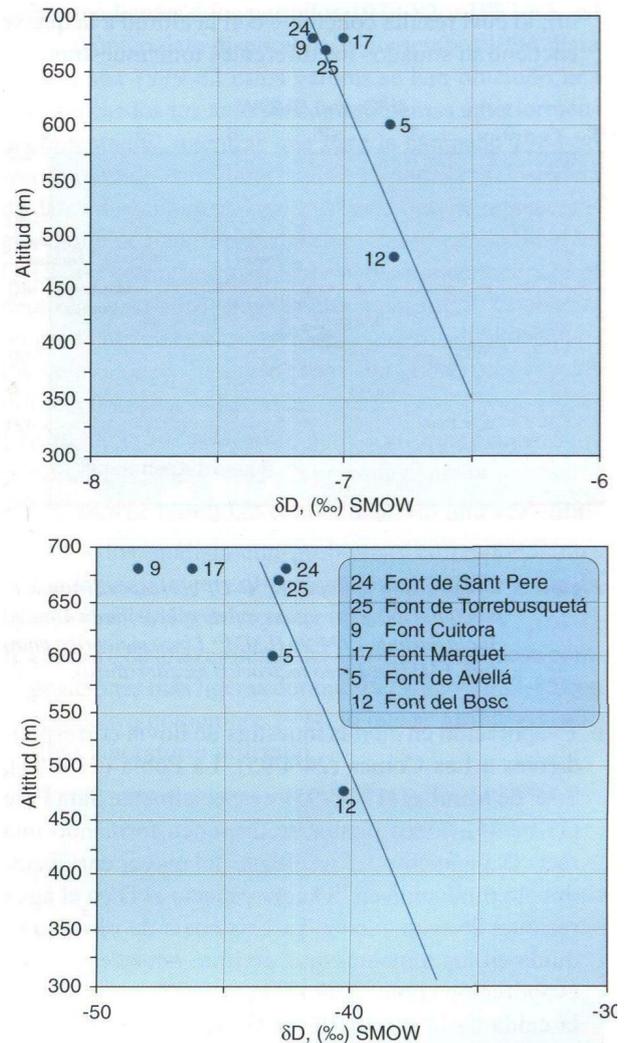


Figura 7. Rectas altitudinales locales obtenidas para el $O^{18}-D$ a partir de manantiales que representan razonablemente bien la cota de recarga del sistema. Datos correspondientes al periodo 1994-96

Los datos isotópicos de precipitación sólo abarcan de febrero a mayo de 1995 (Tabla 4). Por tanto el estudio de la relación existente entre el contenido isotópico de la precipitación y la altitud se ha realizado de forma mensual, independientemente del número de análisis existentes en cada punto de muestreo. Una vez eliminadas las muestras sometidas a evaporación se observa que únicamente los valores en $\delta^{18}O$ correspondientes al mes de abril permiten obtener gradientes altitudinales coherentes con los obtenidos a partir de los manantiales (Tabla 9).

	Factor de ponderación				a	b	E	r	100/b
	Comes	Pobla	Spere	Miralles					
O^{18}	0.25	0.25	0.25	0.25	-3604.8	-582.15	75.8	-0.87	-0.17
O^{18}	0.45	0.04	0.45	0.04	-3230.4	-535.6	39.87	0.97	-0.18
D	0.25	0.25	0.25	0.25	-808.8	-31.5	90.24	-0.82	-3.17
D	0.45	0.04	0.45	0.04	-694.2	-29.59	42.27	-0.96	-3.37
D	0.02	0.71	0.02	0.23	-1746.1	-52.44	94.5	-0.59	-1.9

Tabla 9. Rectas altitudinales obtenidas por mínimos cuadrados asignando distintos pesos (factor de ponderación) a cada uno de los puntos de muestreo de lluvia considerados; a y b= coeficientes de las rectas; E= error en la desviación; r = índice de correlación; 100/ b = gradiente altitudinal cada 100 m. Valores en ‰ SMOW.

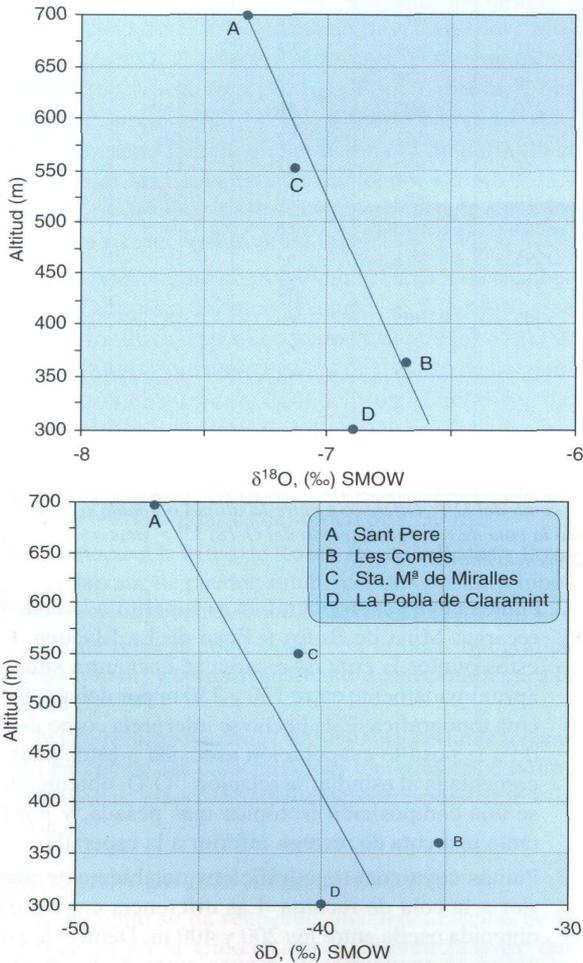


Figura 8. Rectas altitudinales locales obtenidas para el O^{18} -D a partir del agua de lluvia muestreada durante el periodo 1994-96

Para el estudio de los datos correspondientes a abril se han obtenido por mínimos cuadrados diferentes rectas altitudinales asignando distintos pesos a cada uno de los puntos muestreados, de forma análoga a lo realizado para las aguas subterráneas (Tabla 9). El objetivo de dicho estudio ha sido de nuevo definir tanto el error de la desviación como el índice de correlación existente entre los datos. Las rectas altitudinales locales elegidas se presentan en la Figura 8.

Tal y como se ha comentado anteriormente, para el $\delta^{18}O$ se obtienen gradientes altitudinales coherentes con los obtenidos hasta el momento. Con respecto al deuterio, sin embargo, se obtienen peores resultados con gradientes mucho mayores a lo esperado (Tabla 9). El mejor ajuste para el deuterio se obtiene minimizando las estaciones de Sant Pere y Les Comes, lo cual se opone a las mejores características para el muestreo que presentan dichos puntos con respecto a La Pobla de Claramunt y Sta. Mª de Miralles. Se puede concluir por tanto que para el deuterio no hay suficientes datos de precipitación que permitan contrastar la recta altitudinal definida a partir de los mananciales.

ESTUDIO DE LA RELACIÓN $\delta^{18}O$ - δD /ALTITUD EN LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

El principal objetivo de este apartado consiste en tener una idea de la cota de recarga aproximada correspondiente al resto de mananciales y pozos muestreados en la zona de estudio. Dicha cota se ha calculado a partir de la composición isotópica (^{18}O y D) medida en cada uno de estos puntos y de las rectas altitudinales anteriormente definidas. En la Tabla 10 se presenta tanto la composición isotópica y cota topográfica correspondiente a cada uno de estos puntos, como la altitud de recarga obtenida y su error asociado. Es importante considerar que la composición isotópica utilizada para cada uno de estos puntos corresponde a un único muestreo (1994-96).

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto una diferencia importante entre las altitudes obtenidas a partir del ^{18}O y del D. Dichas diferencias se atribuyen a que la recta altitudinal definida para el deuterio, a pesar de presentar una pendiente coherente con la del ^{18}O y con las características de la zona, se encuentra trasladada en su punto de corte con el origen. Esta traslación está de acuerdo con los peores resultados sistemáticamente obtenidos y comentados en relación al ^{18}O . El resultado de dicha traslación provoca unas cotas de recarga más elevadas a lo esperado, obteniéndose en la mayoría de los casos altitudes superiores a las máximas cotas topográficas de la zona. Una posible explicación de esta traslación es la elevada pendiente de la recta altitudinal correspondiente al deuterio, por lo que un pequeño desplazamiento en el deuterio provoca un significativo aumento en la cota de recarga. Para calcular el despla-

Punto	O-18	D	Cota	Altitud ⁽¹⁾	Diferencia	Altitud ⁽²⁾	X ⁽¹⁾	X ⁽²⁾	ΔX
Mina Rofes	-6.57	-44	520	386	-134	715	57	51	6
Molí Major	-6.99	-46,5	312	613	301	853	62	58	4
Les Comes	-7.27	-47,1	349	764	415	886	63	61	2
Orpi 1	-7.16	-48,4	355	705	350	957	66	61	5
F. Avellá	-6.83	-43,1	600	526	-74	666	55	53	3
U. F. Bosc	-6.74	-41,9	530	478	-52	600	53	51	2
Ayto. Carme	-7.1	-48,1	380	672	292	941	65	60	5
Les Deus	-6.85	-43,5	340	537	197	680	56	53	3
Cuitora	-7.13	-48,3	680	688	8	950	66	61	5
Ayto. Llacuna	-6.5	-44,6	600	348	-252	742	58	51	7
P.Rofes	-6.77	-45,6	559	494	-65	798	60	55	6
F.Bosc	-6.81	-40,2	480	516	36	495	49	50	0
Sta. Candia	-7.19	-47,4	380	721	341	900	64	61	3
Viladevall	-7.2	-45,2	350	726	376	776	59	58	1
S-4	-6.93	-43,8	330	580	250	697	56	54	2
Dous	-6.54	-41,4	395	370	-25	562	52	48	3
Marquet	-7.03	-46,2	680	634	-46	832	61	58	4
F.Teula	-7.11	-45,7	360	678	318	804	60	58	2
P. Agost	-7.14	-47,8	300	694	394	922	65	60	4
P. Orpí	-7.05	-47,6	350	645	295	911	64	59	5
P. Gramunt	-6.97	-47,8	385	602	217	922	65	59	6
R. Carme	-6.91	-47,5	370	570	200	905	64	58	6
R. Agost	-6.99	-45,8	320	613	293	810	61	57	4
CS Pere	-7.08	-42,9	670	661	-9	647	55	55	0
NT busq	-7.13	-42,6	680	688	8	630	54	55	-1

Tabla 10. Puntos muestreados durante 1994-96, cota topográfica y composición isotópica (¹⁸O y D) correspondientes a cada uno de estos puntos. Altitud de recarga obtenida a partir tanto del O-18 ⁽¹⁾ como del D ⁽¹⁾. Diferencia entre la altitud obtenida a partir del O-18 y la cota topográfica. X⁽¹⁾ = deuterio obtenido suponiendo la cota de recarga obtenida del O-18; X⁽²⁾ = deuterio obtenido suponiendo la cota de recarga obtenida del deuterio; ΔX = diferencia entre X⁽¹⁾ y X⁽²⁾

zamiento en deuterio correspondiente a la diferencia de cotas obtenidas se ha supuesto como cota de recarga real la deducida a partir del ¹⁸O. De esta forma el desplazamiento en deuterio medio obtenido es de 2,3 ± 1.9 ‰ (Tabla 10), muy próximo al error instrumental del 2 ‰ asociado a la medida del deuterio sin tener en cuenta además el posible error adicional producido durante la preparación de las muestras.

La representación de los puntos de agua subterránea en función de su relación δ¹⁸O/cota topográfica y su comparación con la recta altitudinal local permite diferenciar tres grupos principales de agua (Figura 9):

1. Puntos cuya cota topográfica es aproximadamente coincidente con la cota de recarga: dentro de este grupo se consideran los manantiales utilizados para definir la recta altitudinal local (Font Cuitora, Font Marquet, Font de Sant Pere, Font de Torrebusquetá, Font de L'Avellá y Font del Bosc), así como aquellos puntos que presentan una diferencia de ± 60 m entre la cota topográfica y la de recarga (Pozo de Rofes, Pozo Urbanización Font del Bosc y Les Dous). El margen de error utilizado se ha elegido teniendo en cuenta la máxima diferencia existente entre la cota topográfica y la de recarga correspondiente al primer grupo de manantiales (Font de Avellá : 74 m).

2. Puntos cuya cota topográfica es superior a la cota de recarga: Mina de Rofes y Pozo de La Llacuna. En estos puntos la cota de recarga se encuentra situada aproximadamente entre 130 y 250 m por debajo de la cota topográfica. Este hecho se interpreta como debido a la posible evaporación asociada a estos puntos comentada al estudiar la relación ¹⁸O/D, obteniéndose una composición isotópica más pesada, y por lo tanto una cota de recarga inferior a la esperada.

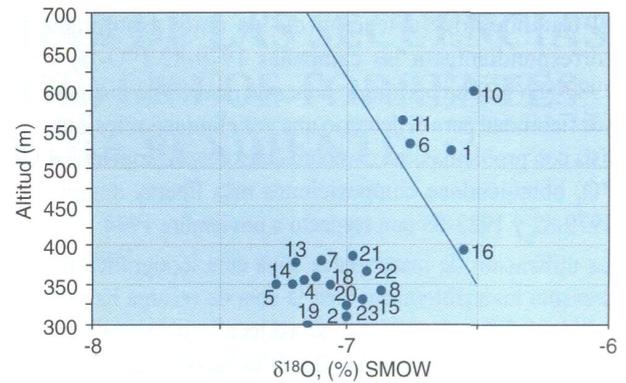
3. Puntos cuya cota topográfica es notablemente inferior a la cota de recarga. Las diferencia entre cotas obtenida oscila entre los 200 y 400 m. Dentro de este grupo se encuentran la mayor parte de los puntos muestreados.

Teniendo en cuenta las características topográficas e hidrogeológicas de la Unidad Anoia se pueden diferenciar tres zonas de recarga principales:

- Zona 1. Situada aproximadamente entre los 600-750 m de altitud y coincidente con gran parte de la denominada "zona drenada" en la subunidad Calizas de Alveolinas (Lambán *et. al*, 1996). Constituye la zona de recarga de los siguientes puntos: Pozo Les Comes, Santa Candia, Pozo Orpí 1, Pozo Viladevall, Piezómetro de Agost, Pozo del Ayuntamiento de Carme, Font de la Teula, Piezómetro de Orpinell, Piezómetro de Can Gramunt, Riera de Agost y Riera de Carme.

1 Mina de Rofes	13 Font Santa Candia
2 Mina Moli Major	14 Pozo Viladevall (Can Bou)
3 Pozo Les Comes	15 Sondeo S4
4 Pozo Orpí	16 Font Les Dous
5 Font de Avellá	17 Font Marquet
6 Pozo Urb. Font del Bosc	18 Font de La Teula
7 Pozo Ayto. de Carme	19 Piezómetro de Agost
8 Font Les Deus	20 Piezómetro de Orpinell
9 Font Cuitora	21 Piezómetro Can Gramunt
10 Pozo Ayto. de La Llacuna	22 Riera de Carme
11 Pozo de Rofes (J.A.C.)	23 Riera de Agost
12 Font del Bosc	

Figura 9. $\delta^{18}O$ /cota topográfica para el resto de aguas subterráneas y comparación con la recta altitudinal local



▪ **Zona 2.** Situada aproximadamente entre los 650-700 m de altitud, en el Triásico medio (nivel superior) aflorante al S de La Llacuna. Constituye la zona de recarga de los siguientes puntos: Font Cuitora, Font Marquet, Font de Sant Pere y Font de Torrebussquetá. Es importante indicar que esta zona se ha definido al considerar los manantiales mencionados como representativos del agua de lluvia homogeneizada a la hora de definir la recta altitudinal local.

▪ **Zona 3.** Afecta fundamentalmente al área S de la subunidad Complejo Triásico (Lambán *et. al.*, 1996) y se encuentra situada aproximadamente entre los 475-580 m de altitud. Constituye la zona de recarga de los puntos: Pozo Urbanización Font del Bosc, Font d'Avellá, Font del Bosc, Sondeo S4 y Les Deus.

La cotas de recarga obtenidas para cada punto muestreado se exponen en la Tabla 10. El error calculado para las altitudes obtenidas es del orden de ± 30 m.

Con respecto a la Mina de Rofes, Pozo de Rofes y Pozo de La Llacuna, se pueden establecer dos posibles hipótesis en relación con su zona de recarga:

- Cota de recarga coincidente con la cota topográfica (520-600 m) y aproximadamente correspondiente a la Zona 3.
- Cota de recarga máxima (700-840 m), definida teniendo en cuenta las características topográficas e hidrogeológicas y aproximadamente correspondiente a la Zona 2.

DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Recientemente se ha realizado una actualización de la piezometría en la Unidad Anoia, diferenciándose dos subunidades acuíferas principales: subunidad Calizas de Alveolinas y subunidad Complejo Triásico. En dicho documento se proponen diferentes hipótesis de funcionamiento para cada una de estas subunidades (Lambán *et. al.*, 1996). A continuación se exponen las implicaciones de los resultados isotópicos obtenidos en el funcionamiento hidrogeológico del sistema.

La subunidad Calizas de Alveolinas ocupa la parte N-NE del sistema. Incluye el nivel acuífero superior y se puede subdividir en dos zonas principales: "zona inundada", limitada a una franja paralela a la riera del Carme, y "zona drenada", situada a una cota superior al nivel freático principal (Lambán *et. al.*, 1996). Según los resultados anteriormente comentados la cota de recarga de

los puntos situados en esta subunidad se encuentra comprendida entre los 600 y 700 m de altitud (*Zona 1*), coincidente con gran parte de la denominada "zona drenada". Este hecho resulta coherente con la hipótesis de funcionamiento propuesta en trabajos anteriores (Custodio *et al.*, 1973; Lamban *et. al.*, 1996) según la cual la "zona drenada" recarga lateralmente a la "zona inundada".

En relación con el Triásico medio (nivel superior) se diferencian dos zonas principales: "zona drenada" (anticlinales de orientación NE-SO) y "zona inundada" (situada por debajo de las facies Keuper). Se establecen dos posibles hipótesis en relación con el funcionamiento hidrogeológico de la zona drenada:

- 1ª Franja superficial (localmente karstificada y permeable), que recarga lateralmente a la zona inundada
- 2ª Acuíferos colgados con respecto al nivel freático principal (Lambán *et. al.*, 1996).

La escasez de datos isotópicos unido a la posible evaporación en la Mina de Rofes, Pozo de Rofes y Pozo de La Llacuna no permite discernir entre una u otra hipótesis.

Con respecto al área de recarga del manantial de Les Deus se establecen otras dos hipótesis:

- 1ª Flanco sur del anticlinal de Font Rubí
- 2ª Sinclinal de Mediona. Teniendo en cuenta la cota de recarga obtenida para Les Deus de 500-600 m de altitud, resulta más coherente la segunda hipótesis planteada

Por último, la evaporación para la Mina de Rofes, Pozo de Rofes y Pozo de La Llacuna que parece deducirse de los estudios isotópicos realizados, resulta coherente con una cierta evaporación previa a la recarga por detención del agua en superficie. La baja permeabilidad de los materiales correspondientes al Triásico superior (facies Keuper) y la suavidad del relieve en esta zona, favorecen dicha detención, siendo muy frecuente observar encharcamientos en las inmediaciones de los puntos mencionados.

CONCLUSIONES

El estudio de los isótopos ambientales ^{18}O y D en la Unidad Anoia pone de manifiesto una composición isotópica en general similar entre la precipitación y las aguas subterráneas, obteniéndose una línea meteórica local de $\delta D = 7,15 \delta^{18}O + 5,4$ (considerando todos los puntos muestreados) y de $\delta D = 7,6 \delta^{18}O + 9,34$ (eliminando la Mina de Rofes, Pozo de Rofes y Pozo de La Llacuna).

El tratamiento y selección de los datos isotópicos correspondientes a las campañas 1979-82 ($^{18}\text{O-D}$) y 1983-85 (^{18}O) ha permitido poner de manifiesto una mayor fiabilidad para el deuterio una vez eliminados los análisis con problemas, así como un claro desplazamiento en ^{18}O , obteniéndose composiciones más ligeras durante 1979-82 y 1983-85 con respecto a noviembre 1994.

La utilización de manantiales cuya cota topográfica representa razonablemente bien la cota de recarga ha permitido definir una recta altitudinal local con un gradiente altimétrico aproximado de $-0,2 \delta^{18}\text{O} \text{‰} / 100 \text{ m}$, coincidente con el obtenido a partir de la composición isotópica de la precipitación correspondiente a abril de 1995.

El estudio de la relación $\delta^{18}\text{O}$ /altitud en las aguas subterráneas y su comparación con la recta altitudinal local ha permitido definir tres zonas de recarga principales, teniendo en cuenta las características topográficas e hidrogeológicas de la zona. Las zonas de recarga obtenidas son coherentes con los estudios realizados hasta el momento (Custodio y Bayó, 1983). La Zona 1 (600-750 m) coincide aproximadamente con la denominada "zona drenada", perteneciente a la subunidad Calizas de Alveolinas, constituyendo un argumento más en favor de la hipótesis de funcionamiento planteada para dicha unidad (Custodio *et. al.*, 1973; Lambán *et. al.*, 1996). La Zona 2 (650-700 m) corresponde al Triásico medio (nivel superior) aflorante al S de La Llacuna (subunidad Complejo Triásico). La Zona 3 (475-580 m) afecta también a la subunidad Complejo Triásico, tanto a los materiales carbonatados (facies Muschelkalk) como a las arcillas y yesos (facies Keuper): sinclinal de Mediona y zona de La Llacuna-Rofes.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se deriva del proyecto GRACE (EC Framework III Project RTD EV5V-CT 94-0471, Environment) así como de otros trabajos complementarios del Departamento de Ingeniería del Terreno de la UPC y de la Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea, Barcelona. Se reconoce la aportación de datos por parte de la Junta d'Aigües de Catalunya. Los autores agradecen en especial y sinceramente los frecuentes comentarios y aportaciones de D. Alfonso Bayó, profundo experto y notable hidrogeólogo, recientemente fallecido. Se agradecen los comentarios de las dos revisiones anónimas.

REFERENCIAS

Custodio, E., Bayó, A., Galofré, A., Batista, E., Iglesia, F., (1973) Estudio de los recursos de aguas subterráneas en la cuenca de la Riera del Carme y área de Capellades, alrededores de Igualada (Barcelona). Comisaría de Aguas del Pirineo Oriental y Servicio Geológico de Obras Públicas. Barcelona. 3 Vols. 1-625 (interno).

Custodio, E., Bayó, A., (1983) *Nuevas contribuciones al reconocimiento geohidrológico del acuífero de Carme-Capellades-San Quintin (Barcelona)*. Actas V Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Instituto Geográfico y Catastral. Madrid 4(III): 1795-1816.

Custodio, E., Llamas, M.R., (1983) Hidrología Subterránea. Ediciones Omega, Barcelona, 2 Vols. : 1-2350.

Custodio, E., Hoppe, J., Hoyos-Limón, A., Jiménez, J., Plata A. y Udluft, P., (1987) Aportaciones al conocimiento geohidrológico de Tenerife utilizando isótopos ambientales. Hidrogeología y Recursos Hidráulicos. Madrid XI: 263-280.

Custodio, E., Manzano, M., (1990) Estudio hidroquímico e isotópico ambiental preliminar de la isla de la Gomera. Plan Hidrológico de las Islas menores. Curso Int. de Hidrología Subterránea, UPC.

Gasparini, A., (1989) Hydrochimie et geochemie isotopique de circulations souterraines en milieu volcanique sous climat semi-aride (Gran Canaria, Iles Canaries). Tesis doctoral. Université de Paris Sud. Centre d'Orsay.

Gelabert, B., Cardoso, G., Custodio, E., Barón, A., Manzano, M., y Juncosa, M., (1996) *Nuevas perspectivas sobre la unidad hidrogeológica de S'Almadrava, Serra de Tramuntana (Mallorca): interpretación de datos químicos e isotópicos basada en estudios geológicos*. Simp. Rec. Hidr. en Regiones Kárticas. Gob. Vasco/AIH. Vitoria-Gasteiz, 1:201-216.

Gonfiantini, R., (1973) Isotope study of he Canary Island. Estudio científico de los Recursos de agua de las Islas Canarias, SPA-15, Final Report, UNES-CO-UNDP-Spanish Government: 1-22 (interno).

Iribar, V., Antigüedad, I., (1996) *Definición de zonas de recarga de manantiales kársticos mediante técnicas isotópicas ambientales*. Simp. Rec. Hidr. en Regiones Kárticas. Gob. Vasco/AIH. Vitoria-Gasteiz, 1:271-280.

Jouzel, J., Merlivat, L. (1984) *Deuterium ad oxygen-18 in precipitation: modelling of he isotopic effect during snow formation*. J.Geophys. Res., 89: 11749-11757.

Jouzel, J., Russel, G.L., Suozzo, R.J., Koster, E.D., White, J.W.C, Broecker, W.S. (1987) *Simulations of he HDO ad H218O atmospheric cycles using he NASA GISS general circulation model*. J.Geophys. Res., 92: 14739-14760.

Lambán, J., Custodio, E., Manzano, M. (1996) *El sistema acuífero de Carme-Capellades-La Llacuna-Sant Quintí de Mediona (Unidad Anoia)*. Groundwater Resources ad Climate Change Effect (GRACE).UPC: 1-31 (interno).

Manzano, M., Cardoso da Silva, G., Tore, C., Custodio, E. (1997) *Aplicación del programa BALAN a la determinación de la recarga en Anoia (Barcelona) y en la Serra de Tramuntana (Mallorca)*. Asoc. Intern. Hidrogeólogos. Grupo Español. ITGE: 339-346.

Plata, A. (1994) Composición isotópica de las aguas subterráneas de la Península Ibérica. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. Madrid, Pub. M-39: 1-139.