

HIDROGEOQUÍMICA E ISOTOPIA AMBIENTAL DEL SECTOR NORESTE DE LA SERRA DE TRAMUNTANA, ISLA DE MALLORCA (ESPAÑA)

Gerson Cardoso da Silva Jr.

Departamento de Geología, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Cidade Universitária, 21949-916 Rio de Janeiro, Brasil
gerson@acd.ufrj.br

Emilio Custodio

Departamento de Ingeniería del Terreno, Universidad Politécnica de Cataluña (UPC)
Campus Nord, Edificio D2, Jordi Girona, 1-3, 08034 Barcelona, España

Resumen: El conocimiento de las características hidroquímicas de la Serra de Tramuntana, en la porción nordoccidental de la Isla de Mallorca, España, es primordial para la evaluación y gestión de sus recursos hídricos subterráneos. Estos recursos tienen un valor estratégico para Mallorca ya que hay un notable potencial de agua subterránea. Actualmente se ha iniciado su desarrollo con el trasvase del manantial de Sa Costera, en operación desde 2008. Se han estudiado las características hidroquímicas e isotópicas de tres zonas en el sector noreste de la Serra de Tramuntana: 1) Manantial de Sa Costera, en el acantilado marino del noroeste de la isla; 2) Ses Ufanes de Gabellí, fuentes intermitentes que descargan en el Llano Central de Mallorca cerca de la villa de Campanet; 3) Manantial de S'Almadrava, que descarga una mezcla de agua dulce y salada en el llano costero de Pollença, en el extremo norte de la isla. Se ha revisado el modelo conceptual de flujo de agua subterránea en el sistema kárstico de la Serra de Tramuntana, con una nueva cartografía geológica y datos hidrodinámicos básicos (Cardoso da Silva y Custodio, 2008), y ahora con ayuda de la interpretación hidroquímica e isotópica ambiental. Se ha refinado la interpretación isotópica radioactiva con el código MULTIS. Los resultados indican que el flujo del agua subterránea en los acuíferos de la Serra de Tramuntana están en general de acuerdo con los modelos conceptuales existentes, con algunas modificaciones. El agua subterránea es predominantemente bicarbonatada cálcica. Sólo se encuentran altas concentraciones de cloruro en el área de S'Almadrava, debido a intrusión marina. Los altos contenidos de sulfato, principalmente en las áreas de Ses Ufanes y Sa Costera, se pueden asociar a niveles de yeso en el Keuper. La tasa de recarga es del 0.3 al 0.5 de la precipitación anual, tanto más cuanto más alta sea el área.

INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos subterráneos de la Serra de Tramuntana de Mallorca, importante macizo carbonatado situado en la parte nordoccidental de ésta isla (Figura 1) del Archipiélago Balear, tienen importancia primordial para el abastecimiento de agua potable. En conjunto se han inventariado unos 700 manantiales, de caudales y características muy diversas (Llobera y Ferriol, 1994). El comportamiento hidrogeológico de la Serra de Tramuntana es bastante incierto a causa de su compleja geología. Por esta razón es importante esclarecer cuestiones hidrogeológicas a partir de la interpretación hidrogeoquímica e

isotópica ambiental de los análisis de aguas de los pozos y manantiales de la sierra. Los trabajos realizados han tratado de mejorar la comprensión del funcionamiento hidrogeológico de las unidades a que pertenecen los manantiales de Sa Costera, Ses Ufanes de Gabellí y S'Almadrava (Figura 1) a partir de sus características hidrogeoquímicas e isotópicas ambientales, partiendo de la información disponible en trabajos anteriores (MOPU, 1973; Custodio *et al.*, 1991), y poniendo énfasis en los datos obtenidos para el desarrollo de la tesis doctoral del primer autor (Cardoso da Silva, 1997) y trabajos relacionados (Gelabert *et al.*, 1996; Gelabert, 1997).

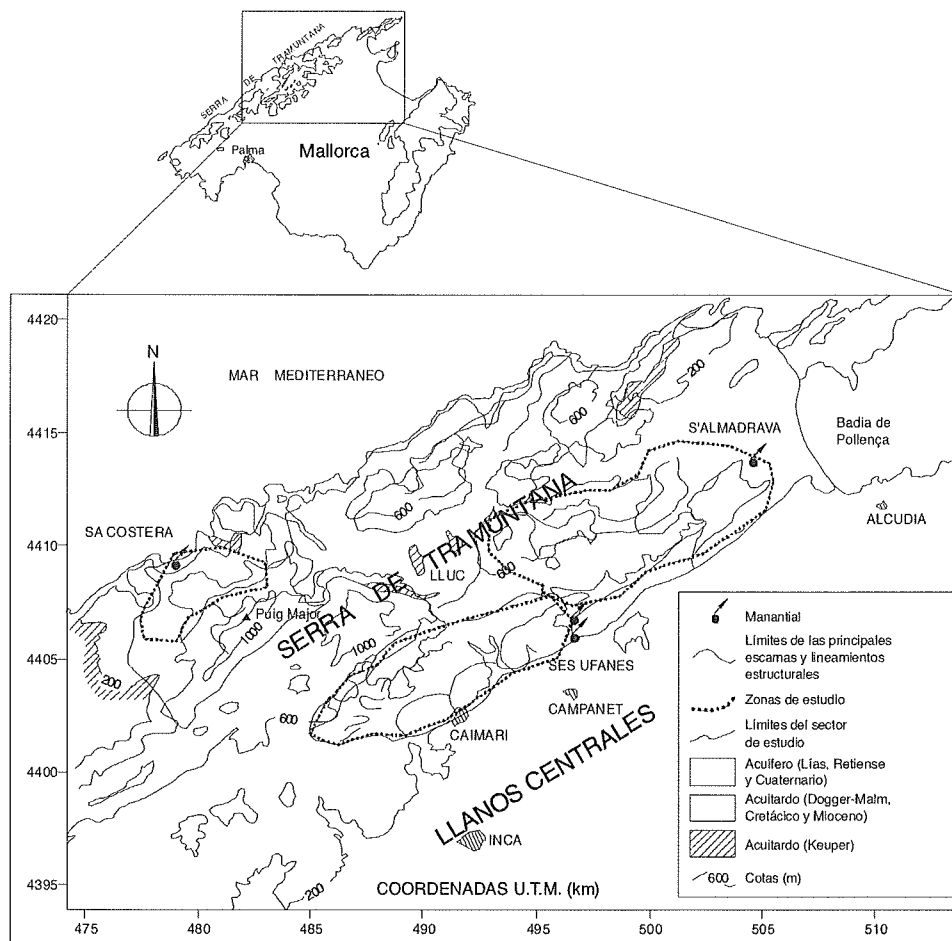


Figura 1. Isla de Mallorca y situación de los manantiales de estudio en la Serra de Tramuntana: Sa Costera, Ses Ufanes y S'Almadrava

Este artículo trata de aspectos hidrogeoquímicos e isotópicos y se complementa con otro (Cardoso da Silva y Custodio, 2008) que trata de los aspectos hidrodinámicos y del balance hídrico, y que se ha de considerar como el complemento de este artículo. La elección de las tres zonas de estudio está relacionado con la existencia de tres grandes manantiales, uno recientemente captado y los otros dos sin uso directo, pero conocidos y accesibles, que tienen información histórica y para los que existe un interés local. Otros manantiales y acuíferos están en explotación y han sido objeto de otros trabajos (Custodio *et al.*, 1991). Se ha buscado también contribuir a la discusión y perfeccionamiento de metodologías para el estudio hidrogeoquímico de acuíferos carbonáticos kársticos.

METODOLOGÍA

La metodología empleada para deducir el funcionamiento hidrogeológico de sistemas acuíferos mediante parámetros químicos e isotópicos

ambientales sigue la pauta habitual de otros casos: a) elección de puntos significativos y bien distribuidos de muestreo de agua, b) adopción de medidas de control de calidad de los análisis y c) confirmación de los resultados de las determinaciones analíticas de campo y laboratorio. En sistemas kársticos, como en el caso presente, la naturaleza compleja e incertidumbres inherentes llevan a la necesidad de utilizar herramientas que permitan averiguar el funcionamiento del sistema a través de la aplicación simultánea de varias técnicas. Ello permite obtener una visión de los mecanismos de circulación y recarga del sistema, que es el objetivo final de la investigación.

El estudio hidrogeoquímico e isotópico ambiental se ha centrado inicialmente en una red de muestreo de puntos de agua en las tres zonas de trabajo (Sa Costera, Ses Ufanes y S'Almadrava). Dicho muestreo se ha llevado a cabo periódicamente en varias campañas durante unos dos años y medio (1994-1997), tanto en cuanto a obtener un promedio representativo de las características químicas e isotópicas ambientales,

como de la posible evolución estacional de las aguas subterráneas. Se han analizado muestras de agua de los manantiales, pozos y sondeos de la red de observación de la Junta de Aguas de Baleares (actual Dirección General de Recursos Hídricos), de las tres zonas del estudio. También se ha muestreado el agua de lluvia de la Serra de Tramuntana a diversas altitudes, desde el nivel del mar hasta mil metros de altitud. Las muestras fueron tomadas entre Mayo de 1994 y Junio de 1997, excepto algunas muestras de los manantiales de fechas anteriores y provenientes de otros estudios.

En general, los análisis químicos efectuados en laboratorio se han limitado a los iones mayoritarios (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-), tanto de las aguas de los acuíferos como de la lluvia caída en la Serra de Tramuntana. También se han efectuado determinaciones de SiO_2 , NH_4^+ y PO_4^{3-} en la mayoría de las muestras. En el momento del muestreo se determinó in situ el pH, temperatura, conductividad eléctrica y alcalinidad, y en algún caso algunos iones disueltos como cloruro, sulfato y nitrato en lugares de interés particular, con el fin de contrastar los resultados de campo con los del laboratorio. Los análisis de laboratorio se han llevado a cabo lo antes posible, pero eso no ha impedido que a veces se superase un par de semanas entre muestreo y análisis.

Como resultado de las campañas de muestreo comentadas anteriormente se han obtenido cerca de 200 muestras de agua de la Serra de Tramuntana, de las cuales unas 35 son de agua de lluvia a las diversas altitudes en donde se han instalado colectores (a las cotas 1 m, 400 m, 600 m, 700 m, 800 m y 1000 m). Las restantes 165 muestras corresponden a sondeos de la red de observación, a manantiales (fonts) y a pozos.

Para la interpretación se han considerado las relaciones iónicas, representaciones gráficas a través de diagramas usuales en hidrogeoquímica y el seguimiento del comportamiento temporal de iones específicos, como el cloruro, para ver si se aprecian tendencias a partir de hipótesis previamente formuladas, para su confirmación y posible cuantificación (Custodio, 1990; Appelo y Postma, 2005). Se han calculado los índices de saturación y las presiones parciales de CO_2 , y se ha estudiado la génesis de la composición química. Los resultados de la modelación geoquímica no se incluyen, por brevedad; las elaboraciones pueden encontrarse en Cardoso da Silva (1997).

Se han realizado análisis isotópicos del agua en 20 muestras de lluvia (oxígeno-18, deuterio

y tritio) en los varios puntos y altitudes de la Serra de Tramuntana y en cerca de un centenar de muestras de agua subterránea de las tres áreas de estudio. Además se ha analizado el contenido en carbono-13 del carbono inorgánico disuelto en aguas de Sa Costera y S'Almadrava. Los datos de tritio en la lluvia son el resultado de aproximadamente las mismas campañas que han generado los demás datos isotópicos y químicos, a los que hay que añadir las campañas de muestreo de tritio de la lluvia realizadas al final de la década de 1970 por el entonces Servicio Hidráulico de Baleares (después Junta de Aguas de Baleares) en el área de Ses Ufanos (Barón y González, 1978).

Los datos de isótopos estables han sido tratados mediante representaciones convencionales para la interpretación del comportamiento hidrodinámico de las aguas de recarga y subterráneas. Para interpretar los datos de tritio se ha utilizado el modelo matemático MULTIS (Richter, 1993) para el cálculo del tiempo de renovación del agua. Se ha reconstruido la serie de valores mensuales de la lluvia por correlación con la serie extendida de Barcelona. Como complemento se ha utilizado información hidrogeoquímica e isotópica ambiental de estudios hidrogeológicos de los Llanos Centrales, en especial del área Inca-Sa Pobla.

RESULTADOS HIDROGEOQUÍMICOS E ISOTÓPICOS AMBIENTALES

En todo lo que sigue, cuando se indica simplemente el símbolo químico se supone que su concentración es ponderal (mg/L), y con una r delante (por ejemplo rNa) que la concentración se expresa en meq/L.

En la Tabla 1 se presentan valores representativos de las seis diferentes estaciones de muestreo de lluvia, a diferentes altitudes. Los datos completos, con la serie de valores, se encuentran en Cardoso da Silva (1997). Se trata de captaciones que incluyen la deposición húmeda y la deposición seca, la cual es importante. Así hay un apreciable efecto terrígeno en el polvo atmosférico, que afecta a todos los iones excepto al Cl^- y al Na^+ , a los que se les supone poco alterados en cuanto a la contribución del aerosol marino, preponderante para esos iones. El efecto terrígeno se manifiesta en el aumento de las relaciones $r\text{Ca}/r\text{Mg}$, $r\text{Na}/r\text{K}$ y $r\text{Na}/r\text{Cl}$ y en la disminución de la $r\text{Cl}/r\text{SO}_4$ (aporte de caliza y silicatos), además del alto pH y presencia de SiO_2 , y a veces de NO_3^- .

Lugar	Altitud m	P mm/año	Fecha	Valores en mg/L (laboratorio)										(campo)				Relaciones iónicas		
				Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	SiO ₂	NO ₃	pH a 25°C	rCa/rMg	rCl/rSO ₄	rNa/rK	rNa/rCl	C		
L1	1000	930	03-01-96	2,0	0,6	6,8	0,3	4,1	1,9	12,4	<0,1	<0,5	6,95	2,0	8,8	38	0,8	T		
L2	800	1250	27-04-94					14,4	21,0				5,85		2,0			T		
L3	700	1120	14-02-97	19,2	1,9	19,0	1,1	87,0	8,4	40,6		0,0	7,78	6,1	6,5	29	0,7	T		
L4	600	1080	14-02-97	22,4	1,9	10,2	0,3	67,6	8,4	28,1		0,0	7,64	7,1	4,5	58	0,6	TT		
L5	400	1050	05-10-96	1,6	2,9	4,8	0,8	12,6	25,9	21,3	0,1	10,6	6,24	0,3	1,1	10	0,3	TT		
L6	S'Albufera	0	11-09-96	17,6	0,0	6,3	10,8	57,6	12,7	14,2	1,7	0,8	6,51		1,5	1	0,7	T		

Tabla 1. Resultados analíticos seleccionados como representativos de la lluvia recogida en las estaciones de deposición total instaladas en la Serra de Tramuntana. P = precipitación media del lugar en mm/año. C = comentarios: T efecto terrígeno; TT marcado efecto terrígeno del polvo atmosférico, según el pH y las relaciones rCl/rSO₄, rCa/rMg, rNa/rK y rNa/Cl. Véase la situación en la Figura 2

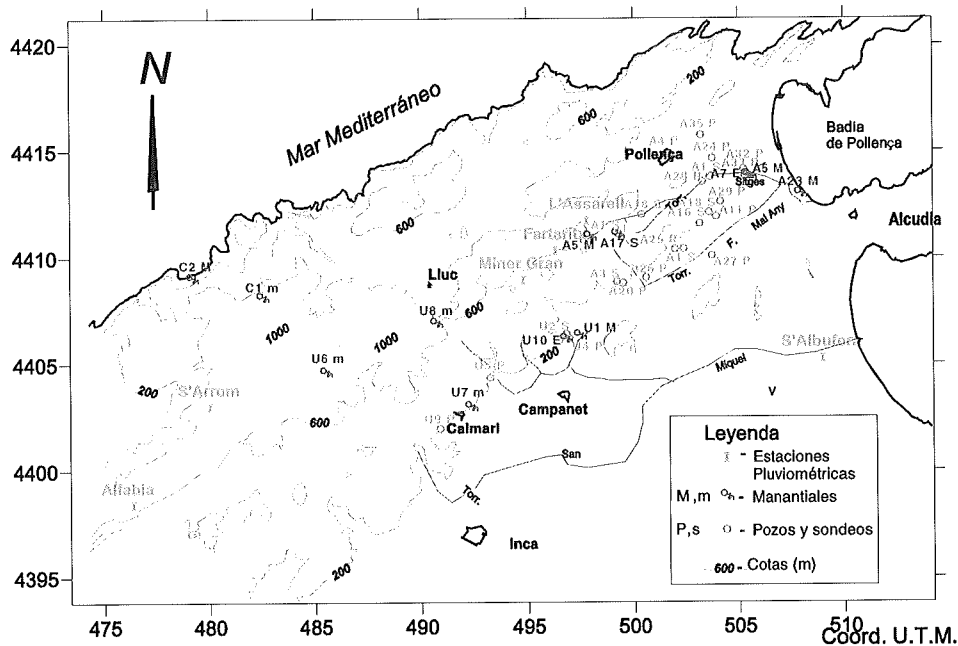


Figura 2. Situación de los puntos utilizados en la investigación, con la simbología de las Tablas 1 y 2

En la Tabla 2 se dan valores representativos de las tres áreas de estudio de la Serra de Tramuntana, además de algunas relaciones iónicas representativas. En el área de Sa Costera sólo existe el manantial principal (Sa Costera), y un pequeño manantial colgado (Sa Bauma), muestreados repetidamente a lo largo del estudio. En el área de Ses Ufanés se tienen 10 puntos, que incluyen el Torrent d'en Massana, además de un pozo de abastecimiento a Palma (Caimari) y de una embotelladora de agua mineral (Binibona). En el área de S'Almadrava se tienen 35 puntos, muchos de ellos con varios análisis químicos. La relación completa de análisis se puede encontrar en Cardoso da Silva (1997). En la Tabla 3 se relacionan los valores isotópicos representativos del agua, por áreas. Los diferentes puntos muestreados se indican en la Figura 2 con la clave de las Tablas 1 y 2.

DISCUSIÓN

Caracterización hidrogeoquímica

El muestreo del agua de lluvia se ha hecho mediante colectores abiertos permanentes, con lo cual se recoge la deposición total. Con los datos obtenidos se ha determinado el valor aproximado de la tasa de recarga a los acuíferos de las tres áreas de estudio. Dada la gran variabilidad de resultados puntuales se evalúa el aporte (deposición) atmosférico medio de Cl^- en el periodo de casi dos años por acumulación, para mejorar la estimación (Alcalá, 2006; Alcalá y Custodio,

2008)

$$A = 0,365 \sum_{i=1}^n P_i \cdot Cl_i^- / \sum_{i=1}^n t_i \quad (1)$$

donde A es el aporte atmosférico medio en $\text{g m}^{-2}\text{año}^{-1}$, P_i la precipitación muestreada (mm); Cl_i^- cloruros en la muestra de precipitación i (mg/L) y t_i el periodo de tiempo que abarca la muestra (días).

Los resultados figuran en la Tabla 4. De acuerdo con las observaciones de campo de que sólo lluvias muy intensas producen algo de escorrentía en esos terrenos de escasa vegetación y con epikarst, para el balance de cloruro en el suelo se supone que la escorrentía superficial es suficientemente pequeña como para poder ser despreciada y que el medio está en régimen estacionario, incluido todo el perfil del medio no saturado. El valor del Cl^- en la recarga se substituye por el valor obtenido de manantiales pequeños bien localizados, o de perforaciones locales poco penetrantes. Como pluviometría se utiliza una media representativa de las áreas basada en el conjunto de pluviómetros operativos en el periodo 1970-1995. Como la recarga media interanual, en ausencia de escorrentía, viene dada por (Custodio y Llamas, 1983; Custodio, 1997; Alcalá, 2006; Iglesias *et al.*, 1997)

$$R = A/Cl_R \quad (2)$$

donde A es la deposición atmosférica media, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\text{año}^{-1}$, R la recarga media interanual, m/año , y Cl_R los cloruros en la recarga, mg/L .

Lugar	Fecha	Valores en mg/L (laboratorio)										(campo)				Relaciones iónicas		
		Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	SiO ₂	NO ₃	pH a 25°C	rCa/rMg	rCl/rSO ₄	rNa/rK	rNa/rCl	Com.		
Área de Sa Costera																		
C1 m	09-05-95	50	3	17	0,7	144	21	23	2,8	0,4	7,95	10,4	1,5	41	1,1	N, C		
C2 M	25-04-97	79	22	14	0,6	220	109	42	1,4	3,2	7,84	2,2	0,5	40	0,5	N, D		
Área de Ses Ufanes																		
U1 M	07-12-95	90	7	15	0,7	273	12	34	2,4	1,0	7,80	7,7	3,8	36	0,7	N, C		
U2 S	14-04-97	86	16	20	1,0	268	45	49	5,0	0,5	7,52	3,2	1,5	34	0,6	N, C		
U3 S	14-04-97	95	6	30	1,3	216	89	71	8,7	7,8	8,05	9,5	1,1	39	0,7	N, C		
U4 P	10-12-95	54	19	20	1,7	256	28	42	6,8	3,5	7,74	1,7	2,0	20	0,7	N, C		
U5 P	10-12-95	79	23	22	1,3	329	8	42	4,4	2,3	7,90	2,1	7,1	29	0,8	N, D		
U6 m	12-05-95	100	31	12	1,2	105	202	28	6,5	<0,1	7,65	1,9	0,2	17	0,7	Y		
U7 m	08-12-95	87	14	38	1,0	254	29	81	9,7	1,4	7,45	3,7	3,8	64	0,7	N		
U8 m	23-06-96	481	101	46	2,5	405	1201	96	7,6	0,5	7,65	2,9	0,1	31	0,7	Y		
U9 P	14-06-79	54	26	27	2,0	262	18	43		12,0	7,80	1,2	3,2	23	1,0	N, D		
U10 E	08-12-95	91	8	13	3,8	281	15	35	2,8	1,0	7,85	6,8	3,2	6	0,6	N, C		

Tabla 2. Resultados analíticos representativos de las aguas subterráneas de la Serra de Tramuntana muestreadas y relaciones iónicas ($r = \text{meq/L}$). P = pozo; S = sondeo; M = manantial principal; m = manantial menor; E = escorrentía en cauce. Ver la situación en la Figura 2. Com. = comentarios; N = normal; C = efecto de calizas; D = efecto de dolomías y otros; Y = efecto de yeso. R = recarga poco modificada; M = contaminación marina

Lugar	Fecha	Valores en mg/L (laboratorio)											(campo)				Relaciones iónicas				Com.
		Ca	Mg	Na	K	HCO ₃	SO ₄	Cl	SiO ₂	NO ₃	pH a 25°C	rCa/rMg	rCl/SO ₄	rNa/rK	rNa/rCl						
Área de S'Almadrava																					
A1 S	11-05-95	22	3	24	3,4	73	3	46	0,5	0,5	7,75	4,4	20,7	12	0,8	N, R					
A2 S	12-04-96	46	7	28	2,1	132	8	64	4,1	0,7	7,75	3,9	10,8	23	0,7	N, R					
A3 S	13-12-95	133	5	38	1,4	329	62	74	6,3	3,3	7,50	16,0	1,6	46	0,8	N, C					
A4 P	03-07-95	285	189	1498	41,2	329	424	2836	11,5	11,5	7,48	0,9	9,0	62	0,8	M					
A5 M	12-04-97	171	32	703	19,6	305	242	1163	10,0	25,6	7,91	3,2	6,5	61	0,9	M					
A6 S	20-09-83	361	267	1602	45,0	403	745	2836	0,0	0,0	7,30	0,8	5,1	60	0,9	M					
A7 E	10-10-95	173	12	68	7,5	342	116	129	7,9	55,5	7,90	9,0	1,5	15	0,8	Y					
A8 P	14-01-89	150	24	52	2,0	464	34	105	8,9	10,7	7,08	3,7	4,2	44	0,8	N					
A9 P	05-09-95	190	69	369	5,0	270	131	832	10,3	3,0	7,50	1,7	8,6	125	0,7	N					
A10 P	12-04-97	189	37	314	4,2	390	126	659	9,1	5,5	7,39	3,1	7,1	124	0,7	N, M					
A11 P	31-05-95	237	39	330	5,7	378	131	723	5,4	5,4	7,46	3,6	7,5	98	0,7	N					
A12 P	06-10-96	313	53	251	4,7	512	121	709	7,3	7,3	7,04	12,6	40,8	211	1,0	M					
A13 P	27-05-95	93	11	22	2,1	317	35	42	1,6	1,6	7,87	5,1	1,8	18	0,8	N, C					
A14 P	14-12-95	13	3	278	9,5	410	154	106	1,5	16,4	8,79	2,7	0,9	50	4,0	Y					
A15 m	09-12-95	72	5	14	0,7	195	14	41	5,0	0,9	7,45	8,6	4,0	34	0,5	N, R					
A16 S	12-05-95	130	49	64	2,2	522	48	128	9,6	7,4	7,40	1,6	3,6	49	0,8	N, M					
A17 S	12-05-95	128	18	69	2,5	310	106	128	11,2	0,5	7,45	4,3	0,4	47	3,8	Y					
A18 S	20-06-96	104	24	121	16,0	444	60	156	10,8	<0,5	7,80	2,6	3,5	13	1,2	N, R					
A19 S	04-11-95	130	33	107	3,4	478	58	170	9,3	1,5	7,50	2,4	4,0	53	1,0	N					
A20 P	01-11-95	189	13	95	3,8	259	101	284	9,7	18,1	7,20	9,0	3,8	42	0,5	N, Y					
A21 P	22-07-95	151	31	107	5,3	295	26	329	5,0	6,6	7,65	2,9	17,1	34	0,5	M					
A22 P	06-06-95	147	15	104	4,6	317	94	227	6,6	6,6	7,42	5,9	3,3	38	0,7	M					
A23 M	09-12-95	49	2	12	0,7	134	14	21	1,5	1,6	8,00	14,7	2,0	29	0,9	N, R					
A24 P	23-11-95	112	19	22	1,3	390	12	78	2,3	2,3	7,10	5,9	8,8	29	0,4	N, R					
A25 P	20-06-96	115	13	25	1,8	356	27	56	5,6	1,9	7,55	5,3	2,8	24	0,7	N, R					
A26 P	03-07-95	263	105	943	25,1	378	309	1914	27,1	27,1	7,27	1,5	8,4	69	0,8	M					
A27 P	07-07-95	97	50	83	7,0	414	86	156	15,4	15,4	7,85	1,2	2,5	20	0,8	N, D					
A28 P	07-06-95	149	35	64	9,8	439	116	113	29,1	29,1	7,34	2,6	1,3	11	0,9	Y					
A29 P	22-09-95	133	60	65	4,4	525	100	149	2,1	2,1	6,96	1,3	2,0	25	0,7	Y					
A30 m	07-06-95	160	18	113	2,2	329	106	248	50,1	50,1	7,40	5,4	3,2	87	0,7	Y					
A31 P	06-06-95	158	19	67	4,2	415	81	149	28,8	28,8	7,42	5,1	2,5	27	0,7	N, C					
A32 P	03-06-95	190	22	60	1,0	525	79	135	75,5	75,5	6,89	5,1	2,3	102	0,7	N, C					
A33 P	14-06-95	198	12	64	2,4	512	92	142	16,6	16,6	7,36	9,9	2,1	45	0,7	N, C					
A34 m	14-04-97	155	46	630	17,3	451	225	1077	10,8	13,2	7,23	2,0	6,5	60	0,9	N					
A35 P	10-04-97	135	10	48	1,8	397	34	92	11,2	2,2	7,24	6,7	3,7	45	0,8	N, C					

Tabla 2. Continuación

Lugar	Fecha	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	UT	Lugar	Fecha	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	UT
Muestras de Lluvia									
S'Albufera (1 m)	16-03-95	-5,4	-30,6	1,6±0,5	Área de Sa Costera F.Sa Costera (15 m)				
	29-08-95	-3,15	-12,7						
	10-12-95	-6,35	-32,8	7,0±0,6					
	02-01-96	-4,75	-30,2						
	15-02-96	-5,83	-35,1	5,9±0,6					
	18-04-96	-8,22	-47,9	4,2±0,4					
	22-06-96	-6,13	-40,2	8,6±0,4					
Ses Ufanes (79,5 m)	09-11-75		47,0±4,2						
	13-03-76		20,3±2,2						
	05-04-76		20,2±2,2						
	01-04-76		36,2±2,6						
	09-05-76		39,7±2,7						
	30-05-76		51,0±3,2						
	27-06-76		90,5±3,2						
	29-09-76		19,8±1,7						
	11-10-76		17,3±1,8						
	21-10-76		16,3±1,9						
	01-10-76		12,7±1,8						
L'Assarell (410 m)	09-12-95	-6,5	-33,3	7,0±0,5	Área de Ses Ufanes Ses Ufanes (79,5 m)				
	02-01-96	-3,84	-22,7	7,1±0,6					
	07-02-96	-7,35	-44,6	7,4±0,6					
	18-04-96	-6,98	-42,6	2,2±0,6					
	30-05-96	-6,88	-36,8	7,7±0,7					
	24-06-96	-8,8	-59,7	11,9±0,5					
Miner Gran (600 m)	24-02-96	-6,3	-37,5	6,6±0,6					
Alfàbia (1028 m)	22-04-94			6,2±0,4					
	29-06-94	-5,26	-26,1						
	16-11-94	-5,09	-31,5	8,2±0,7					
	14-09-95	-5,73	-30,8	4,32±1,3					
	15-03-95	-7,48	-43,5	3,5±0,5					
	03-01-96	-6,47	-33,1	7,5±0,6					
F. des Prat (780 m)									
	06-02-95	-7,96	-48,7	5,7±1,3	F. Son Sastre (187 m) F.dés Guix (578 m)				
	22-07-95	-7	-46,6	0,5±0,4					
	04-11-95	-8,2	-49,4						
	10-12-95	-5,7	-34,7						
	13-05-95	-6,64	-44,4	4,0±0,5					
	08-01-94	-7	-38,2						
	01-11-95	-7,1	-43,3						
	08-12-95	-6,5	-39,8						
Pozo Binibona (150 m)	01-11-95	-7	-40,4						
	10-12-95	-7,2	-42,8						
Pozo UF-9 (69 m)	07-12-95	-6,4	-38,6		Torr. Massana (60 m)				
Pozo UF-10 (66 m)	06-02-95	-7,1	-45,5	7,9±1,4					
Pozo UF-11 (67 m)	07-12-95	-6,8	-39,8						
	08-12-95	-6,6	-39,7						

(1) $\delta^{13}\text{C} = -13,9\text{‰PDB} - \text{Sa Costera}$

Tabla 3. Valores isotópicos del agua representativos de las diferentes áreas. Valor entre paréntesis: altitud del punto de muestreo

Lugar	Fecha	‰ V-SMOW $\delta^{18}\text{O}$	‰ V-SMOW $\delta^2\text{H}$	UT ^3H
F. Binifaido (395 m)	01-01-94	-7,1	-38,67	
	22-07-95	-7,9	-49,9	7,1±0,4
	12-09-95	-7,9	-46,9	
P. Campo de Golf (2701-11-96)		-5,7	-34,7	
P. Can Puig	12-05-95	-6,1	-39,7	3,8±0,5
P. Can Puig	13-12-95	-5,7	-32,4	
S-33 (70 m)	12-05-95	-6,3	-35,7	5,3±0,5
	01-11-95	-6	-35,9	
	10-12-95	-6,4	-35,9	
S-34 (26 m)	05-12-95	-6,3	-39,8	2,1±0,5
S-34	11-01-95	-6,3	-37,7	
S-34	14-12-95	-6,6	-36,7	
S-37 (27 m)	11-04-95	-6,4	-37,1	
SUFA-21_46m (100 r02-06-95)		-6,4	-37,9	3,9±1,3
SUFA-21_46m	05-11-95	-6,8	-40,5	2,7±0,5
SUFA-21_80m	21-07-95	-6,7	-40,6	
SUFA-21_80m	13-12-95	-6,8	-38,5	

Lugar	Fecha	‰ V-SMOW $\delta^{18}\text{O}$	‰ V-SMOW $\delta^2\text{H}$	UT ^3H
Es Pontarró (23 m)	13-05-95	-6,5	-35,4	1,7±0,5
	22-07-95	-6	-39,7	0±0,4
	01-11-95	-5,2	-31,8	
	10-12-95	-5,2	-32,9	
F. S'Almadrava (8 m)	06-02-95	-4,8	-31,7	8,1±1,4
	11-05-95	-5,4	-36,4	3,6±0,5
	21-07-95			6,2±0,4
	11-04-95	-5,5	-36,7	
	14-12-95	-5,9	-32,4	
	10-01-96	-3,7	-20,9	
F. L'Assarelleta (460 m)	11-02-95	-6,4	-36,1	
	12-09-95	-6,7	-34,7	
Pozo L'Assarelleta (241 m)	14-12-95	-6,6	-40,4	
Torr. S'iges (12 m)	10-12-95	-5,7	-33,7	
S'Albufera (1 m)	18-04-96	-8,2	-47,9	4,2

(2)

(2) $\delta^{13}\text{C} = -16,1\text{‰PDB} - \text{S'Almadrava}$

Tabla 3. Continuación

Lugar	Altitud (m)	A ($\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{año}^{-1}$ Cl)	Comentarios
Alfabia	1000	13,4	cumbres
Miner Gran	600	20,2	sotavento, este
S'Assarell	400	12,7	este
S'Albufera	1	12,8	humedales del este, litoral

Tabla 4. Deposición atmosférica media de cloruro (A) en el Este de la Serra de Tramuntana, a partir de la acumulación de datos. Si se excluye Miner Gran, a sotavento, A resulta relativamente homogénea

Los resultados se dan más adelante, al comentar cada área de estudio.

En las áreas de estudio dominan las aguas subterráneas bicarbonatadas cálcicas, mas o menos sulfatadas, con altas concentraciones de cloruro y sodio en algunos puntos del área de S'Almadrava, indicando una fuerte influencia marina directa. La presencia de contenidos relativamente elevados de sulfato en algunos manantiales pequeños en el entorno de las zonas estudiadas (Font d'Es Guix, Font de Son Sastre, Font Monnaber) se puede asociar a lixiviado de los niveles yesíferos del Keuper. En épocas de sequía y bajos caudales se nota la tendencia a mayores contenidos de sulfato y mayor salinización, en general en todos los manantiales.

Los resultados analíticos químicos de las Tablas 1 y 2 se sintetizan en la Tabla 5 y se representan en la Figura 3 mediante diagramas de cajas. Además del efecto de contaminación marina de las muestras del área de S'Almadrava más próxima al litoral y del propio manantial, se pueden extraer las siguientes consideraciones generales, desde la Serra hacia el mar:

- Progresivo mayor contenido en Cl^- debido a cada vez menor recarga absoluta y relativa, con menor precipitación y mayor efecto de salinidad en la precipitación, con mayor evapotranspiración por suelo más desarrollado (mayor retención) y más vegetación.
- Similar tendencia del sulfato, con notable exceso en algunos puntos a causa de la disolución de yesos del Keuper.
- La progresiva mayor presencia de vegetación se manifiesta en un crecimiento de HCO_3^- , que procede de la reacción del CO_2 tomado del suelo con el material carbonatado.
- La sílice disuelta está a concentraciones bajas y moderadas, como corresponde a un medio predominantemente carbonatado

con tránsito moderadamente rápido. Esto es especialmente notable para las aguas salinas del área de S'Almadrava.

- El pH tiende a decrecer, atribuible al mayor efecto de la disolución del CO_2 del suelo a mayor presión parcial.
- La relación $r\text{Ca}/r\text{Mg}$ ($r=\text{meq/L}$) tiene una tendencia poco definida, salvo la disminución que corresponde a las aguas salinas, con una progresiva mayor influencia dolomítica por circulación por niveles más profundos.
- La relación $r\text{Cl}/r\text{SO}_4$ crece paulatinamente, atribuible al mayor peso relativo del Cl^- .
- La relación $r\text{Na}/r\text{K}$ tiene una evolución poco definida, con algunos valores anormalmente elevados, atribuibles a cambio iónico por contaminación marina creciente.
- La relación $r\text{Na}/r\text{Cl}$ está en el entorno del valor marino, con algunas notables desviaciones. Las aguas relativamente más sulfatadas parecen presentar excesos de Na, lo que puede indicar que el Keuper no sólo aporta disolución de yeso sino que también libera Na en la meteorización, posiblemente debido a su contenido en rocas volcánicas. Sin embargo este efecto puede ser también a causa de errores analíticos. Las aguas más salinas tienden a tener un déficit de Na, indicativo de un proceso creciente de salinización.
- En general, las aguas están subsaturadas respecto al yeso y anhidrita -aunque acercándose a la saturación las más sulfatadas- y con respecto a la dolomita, y en el entorno de la saturación respecto a la calcita.

Lluvia	mg/L			pH		r=meq/L			
	Cl	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂	25°	rCa/rMg	rCl/rSO ₄	rNa/rK	rNa/rCl
Mínimo	12,4	1,9	4,1		5,85	0,3	1,1	1	0,3
Per. 25%	21	8,4	12,6		6,24		1,5	10	0,6
Per. 50%	~25	~12	57,6		~6,7	~4	~3	29	0,7
Per. 75%	28	14,4	67,6		7,64		6,5	38	0,7
Máximo	40,6	25,9	87,0		7,78	7,1	8,8	58	0,8
Área de Sa Costera									
Mínimo	23	21	144	1,4	7,84	2,2	0,5	40	0,5
Mediana	33	65	182	2,2	7,90	6	1	40	0,8
Máximo	42	109	220	2,8	7,95	10,0	1,5	41	1,1
Área de Ses Ufanes									
Mínimo	28	8	105	2,4	7,45	1,2	0,1	6	0,6
Per. 25%	35	15	254	4,4	7,52	2,1	1,1	20	0,7
Per. 50%	42	29	268	6,5	~7,7	~2,5	~3	30	0,7
Per. 75%	71	89	281	7,6	7,80	6,8	3,8	36	0,8
Máximo	96	1201	1405	9,7	8,05	9,5	7,1	64	1,0
Área de S'Almadrava no salina (Cl <300 mg/L)									
Mínimo	21	3	73	0,5	6,89	1,3	0,2	11	0,4
Per. 25%	46	34	317	6,3	7,40	3,6	1,6	25	0,7
Per. 50%	49	81	378	9,3	7,45	3,7	2,5	34	0,8
Per. 75%	92	100	444	9,3	7,50	5,1	3,6	47	1,2
Máximo	226	131	525	11,2	8,00	16,0	20,7	127	3,8
Área de S'Almadrava salina (Cl >300 mg/L)									
Mínimo	329	121	295	0,8	7,04	0,9	4,4	34	0,5
Per. 25%	609	225	329		7,30	2,4	6,5	61	0,8
Per. 50%	1100	242	400	1,5	7,35	2,9	~6,8	62	0,8
Per. 75%	1900	309	403		7,48	3,2	8,4	64	0,9
Máximo	2836	745	512	~3	8,05	3,6	17,1	91	0,9

Tabla 5. Resumen estadístico de los valores químicos y relaciones iónicas, basados en los análisis de las Tablas 1 y 2. No se refieren a la serie completa de datos, sino a los más recientes

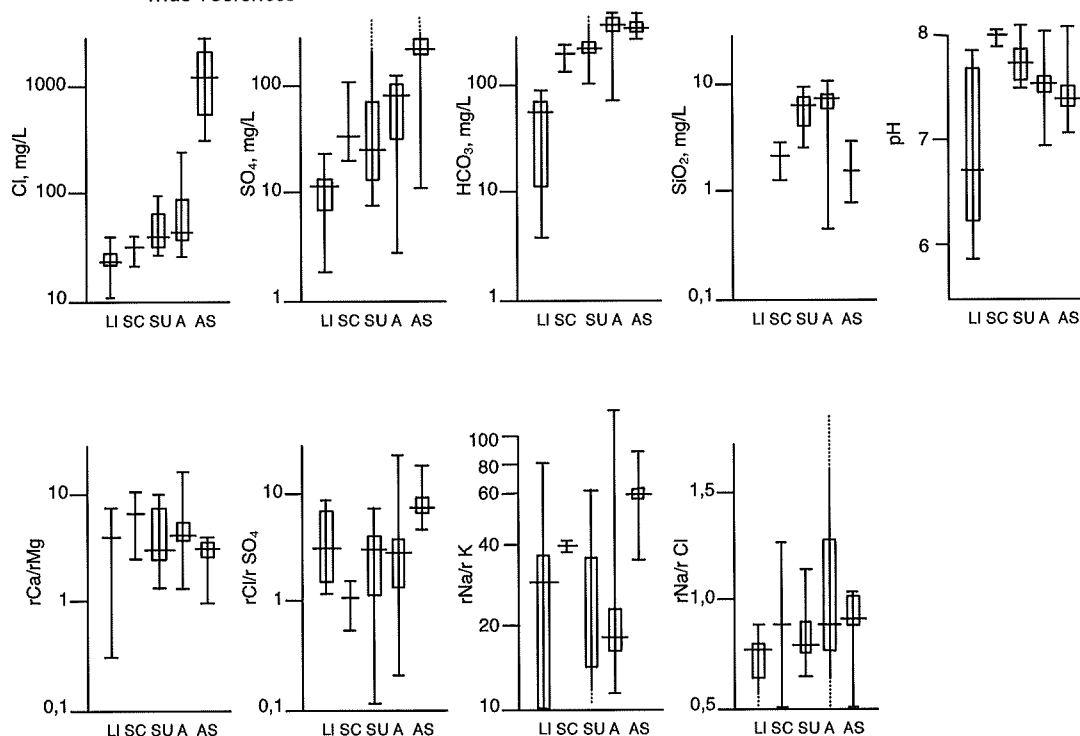


Figura 3. Representación mediante diagramas de cajas de parámetros hidroquímicos representativos de las áreas de estudio (Tabla 4). LI = lluvia; SC = Sa Costera; SU = Ses Ufanes; A = S'Almadrava (<300 mg/L Cl⁻); AS = S'Almadrava (>300 mg/L Cl⁻)

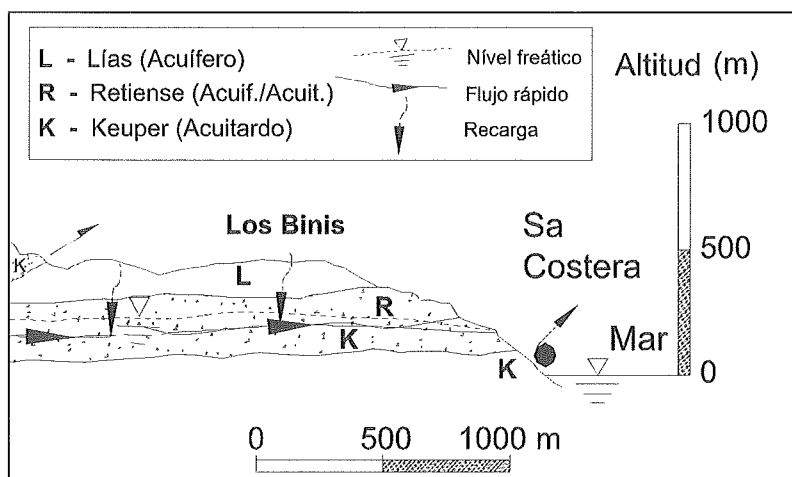


Figura 4. Esquema de flujo en el área de captación de Sa Costera

	Temperatura °C	rCl	r(Ca+Mg)	rHCO ₃
Man. Ses Ufanes	16,9 → 16,6	1,2 → 0,9	2,2 → 2,0	4,3 → 4,2
Sondeo UF-5	16,0 → 16,2	1,5 → 0,9	2,3 → 1,9	4,7 → 4,2
Sondeo UF-4	-	0,8 → 0,9	0,5 → 0,4	1,2 → 1,1

Tabla 6. Evolución de la composición química en una crecida entre el 13 y el 19 de Enero de 1980 en el Manantial de Ses Ufanes y en la descarga de dos sondeos surgentes durante la crecida, UF-5 aguas abajo y UF-4 aguas arriba (datos de la Junta de Aguas de Baleares). r = meq/L

El comportamiento hidrogeoquímico del Área de Sa Costera se puede sintetizar con el esquema de flujo propuesto en la Figura 4. El flujo basal tiene un mayor tiempo de contacto con el Keuper, lo que conlleva un aumento de la salinización. Las aguas de rápida renovación son menos mineralizadas. En periodos de caudales elevados en el manantial esto se refleja en la disminución del contenido en sulfatos, en especial a partir de cierto umbral. La correlación entre el caudal del manantial y el contenido salino, aunque es débil, apunta hacia una circulación rápida del agua, aunque hay interacción con el aire del suelo dado el incremento que se produce en el valor de la presión parcial de CO₂ (pCO₂). El predominio de los iones HCO₃⁻ y Ca²⁺ enmascara otras relaciones.

En épocas de caudales bajos se tiene una tendencia a un aumento del contenido de sulfato y magnesio, atribuible a una influencia de las aguas que drenan las rocas basales que se encuentran en la trayectoria de flujo del agua de Sa Costera, probablemente conteniendo en parte materiales de origen volcánico.

Las aguas de descarga del Área de Ses Ufanes

son normalmente de composición bicarbonatada cálcica, poco salinizadas, aunque con considerable variación. Hay unas pocas muestras de aguas sulfatadas cálcicas correspondientes a los pequeños manantiales de la Serra que escurren sobre el Keuper, que tienen un mayor contenido relativo en sulfatos y secundariamente de magnesio.

En este área se dispone de una cierta cantidad de datos físicos y químicos (Barón y González, 1978; Barón *et al.*, 1984) que han permitido una evaluación coherente del área. Los datos analíticos de las surgencias del manantial y los sondeos próximos muestran una diferencia de contenido salino entre las aguas del bloque superior (menor) y del bloque inferior (mayor) de la falla de Biniatró, que es un importante rasgo geológico del área, pues las aguas del bloque alto han tenido probablemente mucho menos tiempo de contacto con la roca. Esto se indica en la Tabla 6, viéndose que hay una diferencia notable en los valores de HCO₃⁻ y rCa/rMg, y menor en el Cl⁻, que se mantiene durante la crecida, salvo el Cl⁻ que tiende a homogeneizarse.

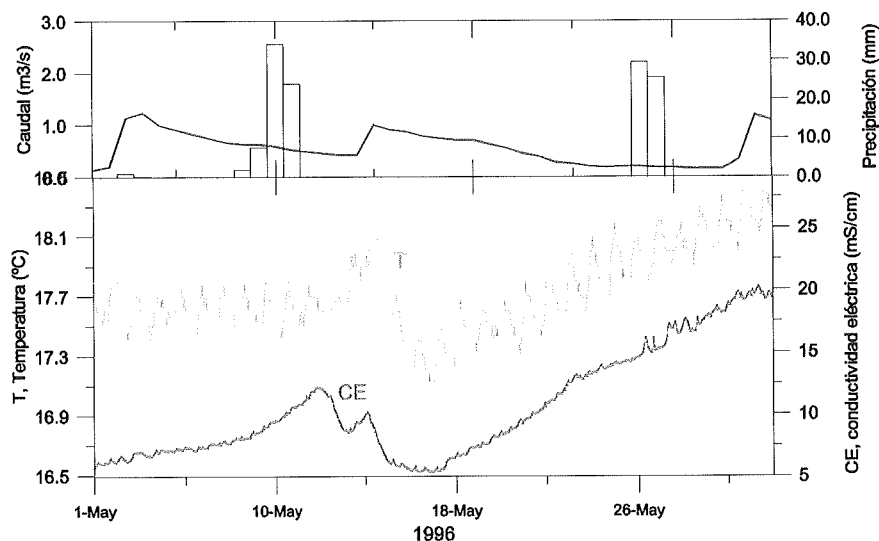


Figura 5. Variación del caudal y de la conductividad eléctrica en la Font de S'Almadrava durante un mes

Las variaciones hidroquímicas temporales de las aguas de Ses Ufanes son relativamente pequeñas y en ningún caso se ha observado que se llegue a alterar significativamente la composición química. Sin embargo, durante los episodios en que manan Ses Ufanes, al inicio de la crecida se producen notables variaciones en el contenido químico de sus aguas, en particular del ion cloruro, para luego estabilizarse a caudales menores.

Los manantiales de la parte alta del área de captación presentan valores muy bajos de la relación rCl/rSO_4 (0,1-0,2) por aporte de SO_4^{2-} litológico.

Se dispone de series de cloruros en las precipitaciones locales, en el pozo UF-5 y en los manantiales (Custodio *et al.*, 1991). Se puede considerar un valor promedio de 23 mg/L de Cl^- en la precipitación. El agua de sondeos/manantiales de los alrededores de Ses Ufanes es de cerca de 48 mg/L de Cl^- , tomado del total de análisis disponibles a partir de los reconocimientos hidrogeológicos realizados en el área.

El Área de S'Almadrava es la más compleja de las tres zonas estudiadas, por la multiplicidad de factores que concurren en su funcionamiento hidrogeológico, y también por la abundancia y diversidad de datos. Para caracterizar los aspectos hidroquímicos de dicha área se han estudiado los rasgos generales geológico-estructurales (Gelabert 1995; 1996; Gelabert *et al.*, 1996), a partir de los cuales se pueden relacionar los posibles sistemas de flujo condicionados por la disposición geológica y su composición química. En el área de S'Almadrava hay dos escamas tectónicas

que definen sendos subsistemas hidrogeológicos (Figura 5): subárea 1 (NW o Tomir), que es un conjunto delimitado por la lámina del Puig Tomir, al NW de la zona, con las aguas fluyendo a través de Vall de Colonya, y subárea 2 (SE o Aixartell), que es otro conjunto cuyos límites coinciden con los de la lámina cabalgante del Puig d'Aixartell, situada hacia el flanco SE de la Serra de Tramuntana, que localmente sigue a lo largo del Camí Vell de Pollença, en el entorno del valle de Binicreixenç. Las aguas subterráneas de ambas subáreas de captación desaguan y eventualmente confluyen en el Llano de Pollença, constituyendo éste una tercera subárea desde el punto de vista hidroquímico, a causa de la notable influencia marina en la composición de sus aguas. El límite inferior general de las unidades citadas anteriormente viene dado por los estratos semipermeables del Keuper o del Retiense margoso. Las características hidroquímicas generales de las subáreas resultantes de esta revisión conceptual son:

- Subárea 1), cuyos límites geográficos coinciden básicamente con la lámina cabalgante del Tomir (Figura 5). Se trata de aguas bicarbonatadas cálcicas de muy baja a baja mineralización. Se observa un incremento en el contenido iónico de las aguas en sentido SW-NE, indicando probablemente el sentido del flujo, ya que cada vez hay menos recarga (infiltración más evapoconcentrada) y o mayor influencia del aerosol marino.

- Subárea 2), que coincide prácticamente con la lámina cabalgante de Aixartell. Son aguas también bicarbonatadas cálcicas, con relativamente abundante contenido en magnesio, de moderada mineralización.
- Llano de Pollença, con aguas cloruradas cálcicas, de moderada a alta mineralización, exceptuando el manantial de S'Almadrava y pozos cercanos, que tienen alta mineralización por influencia marina directa.

La buena coincidencia de los resultados del análisis hidrogeoquímico con los estudios geológicos previos refuerza la hipótesis de partida, que tiene por base la compartimentación estructural de la Unidad hidrogeológica de S'Almadrava (Gelabert *et al.*, 1996).

El contenido del ion cloruro es bastante elevado en algunos puntos, como es el caso del pozo de Can Puig (Tabla 3), de abastecimiento a la ciudad de Pollença, a más de 4 km del mar, que presenta contenidos de Cl incluso superiores a 0,5 g/L. De un modo general, las aguas en el área de S'Almadrava tienen un contenido más o menos similar de iones calcio y bicarbonato, y en algunos puntos son predominantemente bicarbonatadas cálcicas, pero su carácter final viene dado por su contenido en agua marina, que puede llegar a más del 10 %, como en la Font de S'Almadrava y otras aguas por debajo de la misma (Ramón *et al.*, 1994). El agua salobre y salada de la Font de S'Almadrava surge lejos de la costa y a unos 6 m por encima del nivel del mar (Cardoso da Silva, 1997; Sanz *et al.*, 2002). Esto no es un hecho aislado en el Mediterráneo (Arfib *et al.*, 2007; Fleury *et al.*, 2007).

Las relaciones iónicas en general muestran valores típicos de macizos carbonatados, pero en el caso del Llano de Pollença, bien sea en el extremo de la subárea 1 o en el de la subárea 2, están fuertemente influenciadas por aguas marinas. La relación rCl/rSO_4 presenta una alta variación en las aguas, atribuible, como en el resto de la sierra, a la influencia del Keuper, que constituye el límite inferior de flujo. En cambio, se presenta un poco más homogénea en la Font de S'Almadrava, con valores alrededor de 10 - vale 11 para el agua marina-, lo que se interpreta como una consecuencia del efecto sobrepuesto dominante de la aportación marina.

La relación rCa/rMg presenta un valor medio dentro de los valores esperados para rocas carbonatadas cálcicas, pese a que en la subárea 1 hay una considerable variación. La excepción es la misma Font de S'Almadrava, con un valor me-

dio de $9 \pm 0,5$, lo que se debe al mayor aporte de magnesio por el agua marina y al escaso tiempo de contacto de esas aguas con las formaciones insulares, que no permite un intercambio de Ca^{2+} y Mg^{2+} con la roca.

En los alrededores de la Font de S'Almadrava hay algunos puntos de muestreo que han sido agrupados por su proximidad y alta salinidad como representativos del entorno de la descarga principal de la Unidad. Tales puntos presentan una composición química intermedia entre el agua de la sierra y la del manantial principal. Sin embargo, los valores medios de los iones Mg^{2+} y en especial el Ca^{2+} son más elevados en los pozos que en el manantial, aunque no pasa lo mismo con los demás iones principales. Tal hecho indica la posible existencia de procesos de cambio iónico alcalinos-alcalinoterreos alrededor de la Font de S'Almadrava, con el conducto del mar-manantial representando un punto de entrada de agua marina tierra adentro. Se trata de un proceso de incremento progresivo de la salinización. Tal fenómeno puede estar relacionado con el creciente uso de agua subterránea en el área.

La estimación de la recarga a partir de la deposición atmosférica de cloruro se da en la Tabla 7, además de evaluar la incertidumbre. La variabilidad espacial de dicho valor es pequeña (Tabla 4), salvando la estación de Miner Gran, que se interpreta como un efecto local. Estos valores son similares si se obtienen por acumulación o como producto de valores medios. Dado que la mayor parte de la recarga se realiza en zonas altas se ha tomado un único valor de la precipitación en cada área, así como una escorrentía no significativa desde el punto de vista del balance de cloruro, de acuerdo con las observaciones.

La recarga disminuye de Oeste a Este de acuerdo con la decreciente altitud y mayor presencia de vegetación y suelo. Los resultados de recarga, en mm/año, y en fracción de la pluviometría que es recarga son respectivamente: Sa Costera 435 y 0,48, Ses Ufanés 290 y 0,36 y S'Almadrava 215 y 0,29, con una variabilidad en el entorno del 10 %. Estos valores son menores que los que se dan en Cardoso da Silva (1997) y también menores que los que se dan en Gelabert (1996) y en Gelabert *et al.* (1996) para S'Almadrava, pero se suponen más ajustados. En este caso la mayor parte del agua que circula por la unidad sale por el manantial de S'Almadrava, excepto en las puntas de caudal tras lluvias torrenciales, en las que aparecen otras descargas. No obstante, el valor de esco-

Área	\bar{P}	\bar{A}	C_P	\bar{A}^*	C_R	\bar{R}	\bar{R}/\bar{P}	Comentarios
Sa costera	900	13	15	13	30	435	0,48	karst casi sin suelo
Ses Ufanes	800	13	13	10	45	290	0,36	bosque ralo en carbonatos
S'Almadrava	750	13	17	13	60	215	0,29	bosque poco denso en carbonatos

Incertidumbre estimada, medida por σ

Área	σ_P	σ_A	σ_{CR}	σ_R	$\sigma_{R/P}$
Sa costera	100	1,0	5	80	0,10
Ses Ufanes	100	1,5	10	70	0,10
S'Almadrava	100	1,5	5	30	0,06

A = tasa de deposición atmosférica calculada según $\bar{P} \cdot \bar{C}_P$; \bar{P} = precipitación media;

\bar{C}_P = contenido medio de Cl de la precipitación; R = recarga;

σ = desviación estandar; \bar{P} , σ_P , \bar{R} , σ_R en mm/año; CR , σ_{CR} en mg/L Cl; \bar{R}/\bar{P} adimensional

Tabla 7. Estimación de la tasa de recarga media en las áreas de captación de los tres manantiales principales del Este de la Serra de Tramuntana, considerando un acuífero en ladera que integra flujo de diferentes altitudes (Custodio, 2009)

rentía subterránea directa hacia el mar es incierto, lo mismo que el caudal superficial por los torrentes que desaguan en S'Albufereta (Badía de Pollença) es desconocido, aunque se estima que es relativamente pequeño. Además, buena parte del caudal superficial, si no la casi totalidad, proviene de salidas difusas o puntuales de aguas que circulan por el acuífero principal, como en el caso del área de Ses Ufanes.

Las mayores variaciones químicas temporales en el área se dan en el manantial de S'Almadrava y en el pozo de Can Puig, que abastece de agua a Pollença. En este último se tiene un intervalo de registro mayor que en los estudios anteriores (datos de los años 1989 a 1996). Las variaciones temporales del contenido en iones del agua salobre que descarga por el manantial de S'Almadrava son conocidas desde hace años (MOPU, 1973; Barón y González, 1978), así como el hecho de que el contenido en cloruros del agua de S'Almadrava presente una compleja relación con el caudal del manantial.

La representación de $rHCO_3$ y $rHCO_3 + rSO_4$ en función de $rCa + rMg$ (Figura 6) indica que en buena parte la suma $rHCO_3 + rSO_4$ explica el contenido en $rCa + rMg$, pero no el $rHCO_3$ por sí solo, salvo para salinidades pequeñas y moderadas, lo que indica el predominio de la disolución de calcita. Se trata del efecto combinado de la disolución de calcita, dolomita y yeso. No obstante, cabe resaltar una tendencia al exceso de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ para parte de las salinidades medias y altas, atribuible un efecto de cambio iónico de Ca^{2+} por Na^+ en las áreas afectadas por salinización. Eso indicaría una evolución hacia salinización creciente (Custodio y Llamas, 1983; Custodio y Bruggeman, 1987). Los notables ex-

cesos de Na^+ sobre Cl^- en algunas muestras no se reflejan en la figura.

La representación rNa/rCl respecto a rCl/rSO_4 (Figura 7) muestra una cierta tendencia a la disminución de rNa/rCl al aumentar rCl/rSO_4 , lo que está de acuerdo con el proceso de salinización descrito.

Las temperaturas ambientales anuales medias medidas en las áreas de recarga de Ses Ufanes y S'Almadrava están entre 14 °C y 15 °C, con una media de las mínimas y máximas anuales respectivamente de 6 °C y 22 °C. La temperatura media anual del aire en el área de captación en Sa Costera es de unos 13 °C.

En Sa Costera el agua del manantial tiene una temperatura media de $16,4 \pm 0,9$ °C. Al parecer existe una variación que depende de las crecidas del manantial, hecho común en la Serra de Tramuntana, pero de forma compleja no conocida.

En Ses Ufanes hay pocos datos de temperatura del agua, pero que indican valores relativamente homogéneos y con pequeño rango de variación. En un episodio de surgencia de los manantiales la temperatura medida fue de 15,8 °C, la misma de un punto a otro en las varias salidas de los manantiales.

El aparato registrador automático en la salida principal de agua del manantial de S'Almadrava muestra una oscilación considerable de la temperatura, con un valor medio alrededor de los 18 °C. Hay picos de hasta casi 21 °C que están asociados a épocas de caudal alto del manantial, considerablemente más elevadas que la temperatura media ambiental. El notorio pico de temperatura, y en menor medida de conductividad

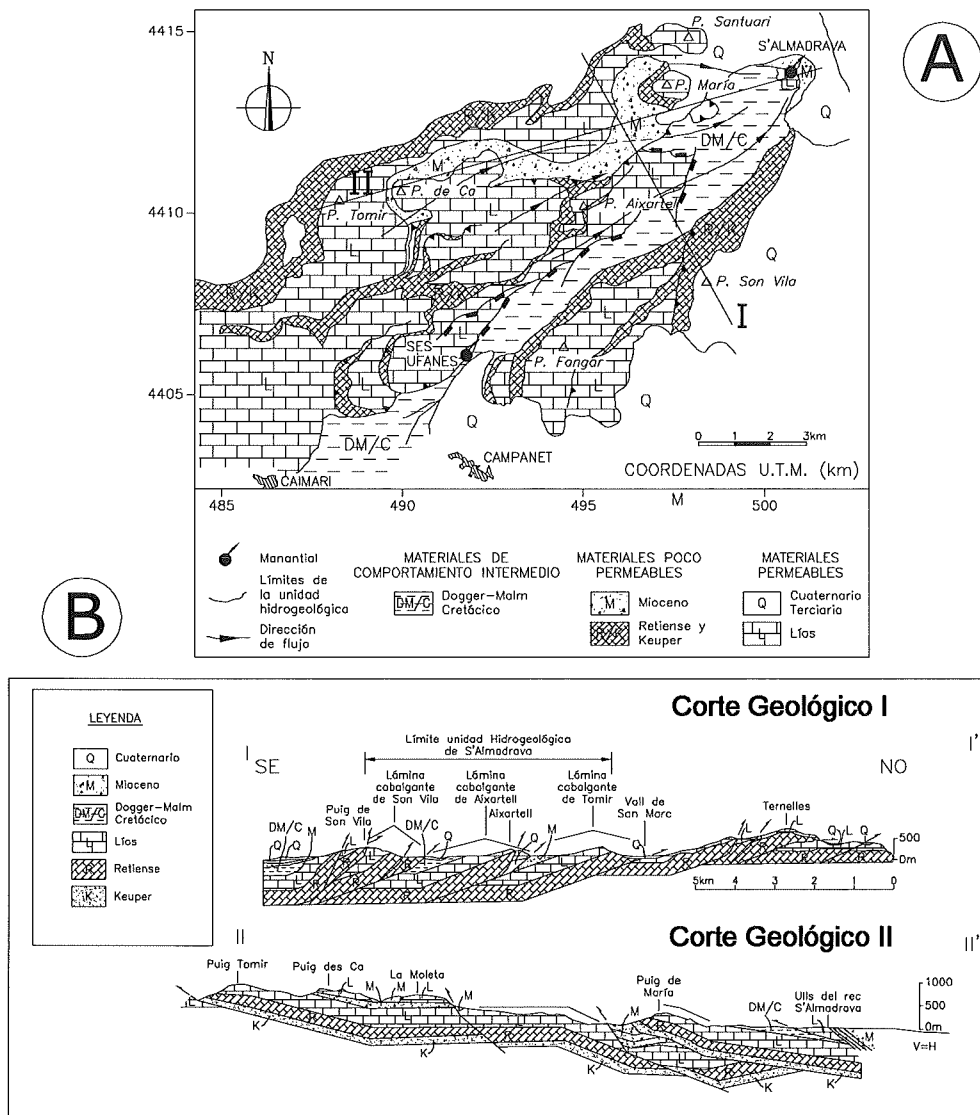


Figura 6. Secciones geológicas del área de S'Almadrava (A). Localización de la secciones en planta y esquema geológico (B) (Gelabert, 1997)

eléctrica, después de una precipitación importante, indica que puede ocurrir una movilización de aguas profundas durante las épocas de mayor caudal debido al proceso de recarga aguas arriba. Los cambios asociados en el contenido salino refuerzan tal hipótesis (Sanz *et al.*, 2002).

Caracterización isotópica ambiental

Las variaciones isotópicas del agua: oxígeno-18 (^{18}O), deuterio (^2H) y tritio (^3H), presentan una enorme ventaja sobre otros tipos de trazadores ambientales químicos del agua por el hecho de que forman parte de la propia molécula del agua, con lo que resultan muy minimizados los efectos de retardo, reacciones químicas, sor-

ción, etc. La composición isotópica del oxígeno y del hidrógeno prácticamente no cambia en el agua subterránea durante la interacción agua-roca a temperaturas bajas, inferiores a $80\text{ }^\circ\text{C}$ (Gat y Gonfiantini, 1981; Cheng, 1996). Se han seleccionado aguas de manantiales, pozos y sondeos, y también de lluvia a diversas altitudes, con el objetivo de conocer las posibles variaciones isotópicas altitudinales y estacionales (Tabla 3). En la Figura 8 se representa $\delta^{18}\text{O}$ en función de $\delta^2\text{H}$, en la que δ indica la desviación de la relación isotópica R entre el isótopo raro (^{18}O , ^2H) respecto al abundante (^{16}O , ^1H), referido a un estándar, que es el V-SMOW. $\delta = (\text{R}_m - \text{R}_s) / \text{R}_s$; m = muestra; r = estándar. δ se suele dar en ‰ (por mil, multiplicado por 1000).

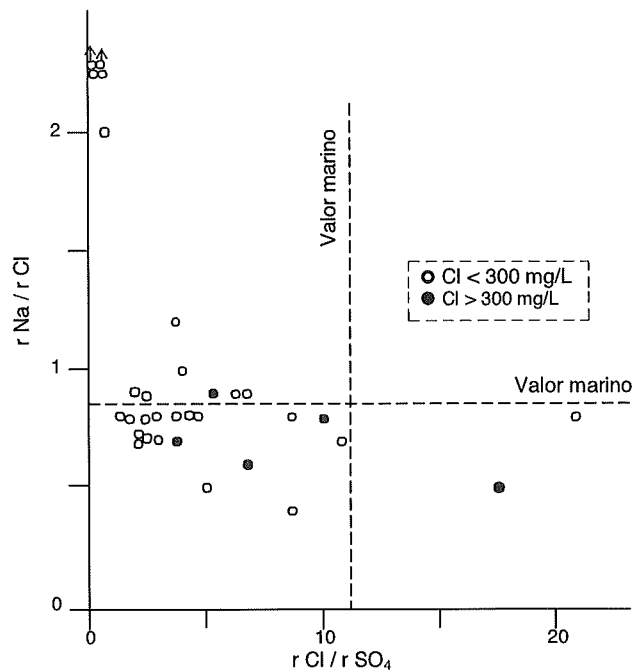


Figura 7. Representación de rNa/rCl en función de rCl/rSO_4 , con una tendencia decreciente atribuible a cambio iónico (endurecimiento) al aumentar la salinidad por contaminación marina. Las muestras de bajo rCl/rSO_4 y alto rNa/rCl son debidas a resultados analíticos posiblemente erróneos a causa de las bajas concentraciones

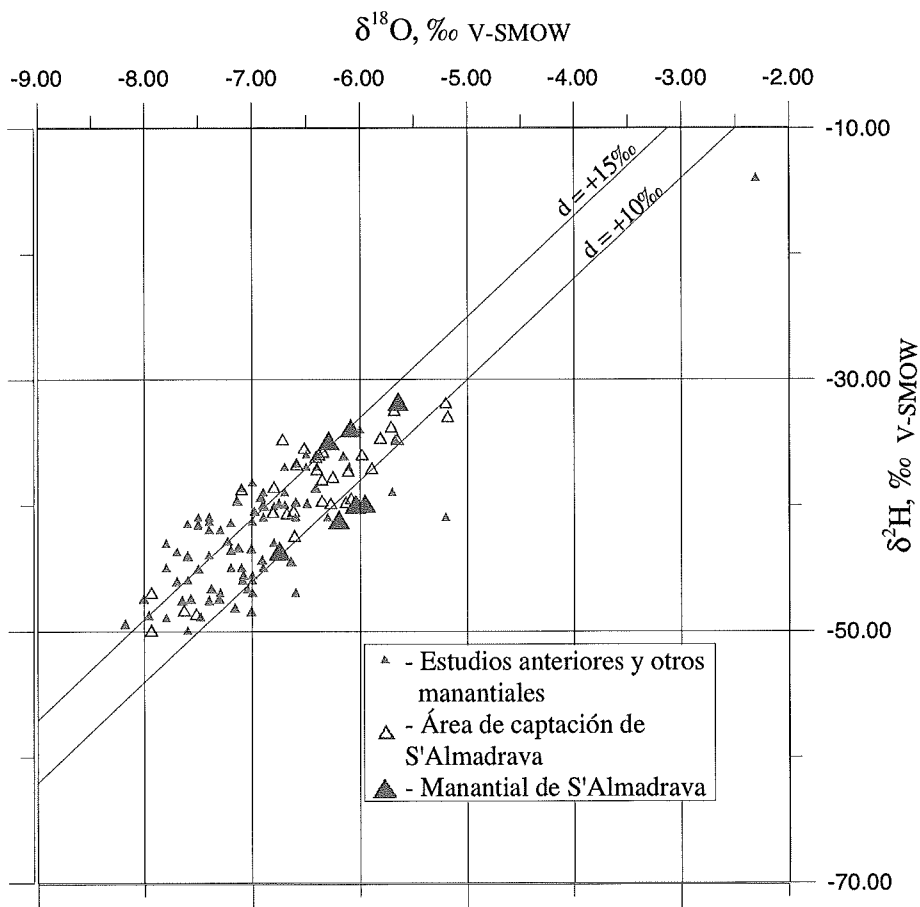


Figura 8. Relación entre $\delta^{18}O$ ‰ y δ^2H ‰ para las aguas subterráneas

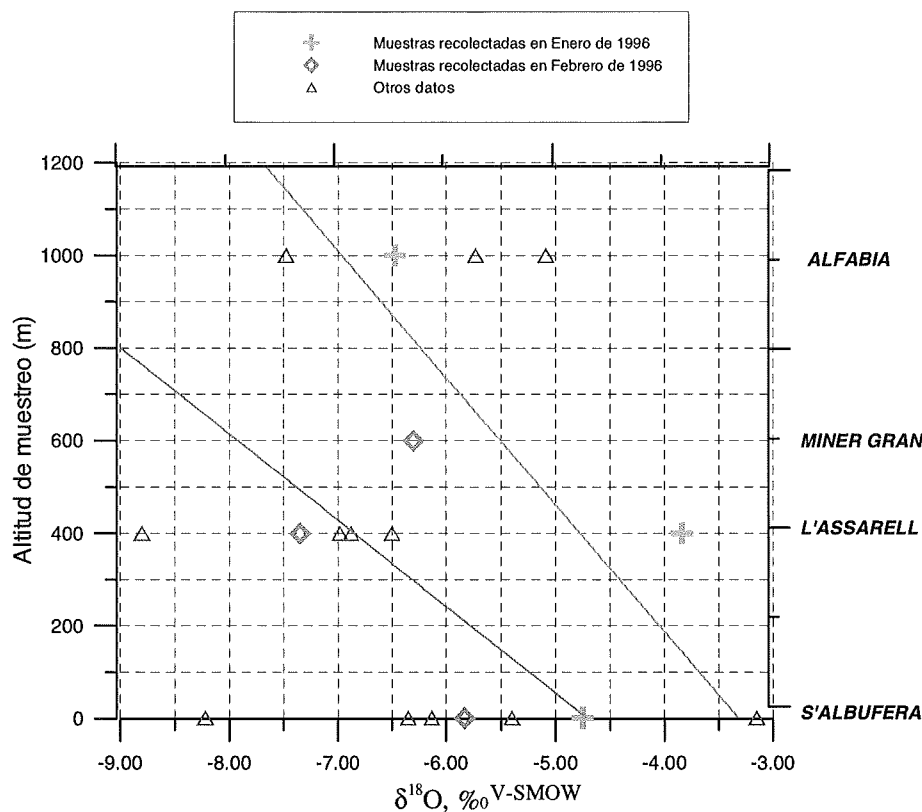


Figura 9. Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ ‰ de las aguas de lluvia y la altitud de la estación

La recta de regresión lineal entre el oxígeno-18 y el deuterio de la lluvia, de todas las estaciones, se ajusta a la pendiente 8 de la línea media meteórica mundial, con exceso de deuterio entre $+10$ ‰, valor medio mundial (Dansgaard, 1964), hasta $+15$ ‰, valor típico del Mediterráneo Occidental (Custodio *et al.*, 1992; Plata, 1994; Araguás, 1991; Jiménez y Custodio 2008). El exceso de deuterio se define como $d = \delta^2\text{H} - 8 \delta^{18}\text{O}$. Las lluvias pequeñas, de corta duración, y que por lo tanto están más sujetas a efectos de evaporación en la caída, son más pesadas isotópicamente, y con menor exceso de deuterio.

El estudio de la variación de la composición isotópica con la altitud de recolección de la lluvia (Figura 9) no proporciona un patrón claro y definido de comportamiento, con baja correlación entre la altitud del muestreo y la composición isotópica de la lluvia debido a que las muestras son de distintas fechas de muestreo dentro del mismo mes y, más importante aún, con diferentes intervalos de tiempo entre tomas (Clark y Fritz, 1997; Bowen y Wilkin, 2002). No obstante, con notable incertidumbre, se apunta a un valor en el entorno de $-0,4$ ‰/100 m para el $\delta^{18}\text{O}$.

A partir de los datos resumen de la Tabla 8, para las aguas subterráneas se obtiene un gradiente isotópico altitudinal para el ^{18}O de $-0,28$ ‰/100 m (Figura 10), similar al indicado por Custodio *et al.* (1992) en un estudio previo de la sierra. El ajuste se ha hecho con datos de pequeños manantiales colgados. El valor obtenido es similar al de otras áreas montañosas ($-0,2$ a $-0,3$ ‰/100 m), aunque este resultado hay que considerarlo como provisional, hasta que nuevos muestreos permitan mayor precisión. Los manantiales importantes y los pozos quedan por debajo de la recta de ajuste a causa de la mayor elevación media de la cuenca de recarga. Para el manantial de S'Almadrava, la corrección por la contribución marina desplaza el punto representativo hacia la izquierda. En los pozos pueden haber flujos verticales (Custodio *et al.*, 1991; Van Meir *et al.*, 2007), por lo que sin un estudio de detalle no se puede saber la profundidad real a que corresponde una muestra, y así referir las medidas al sistema tridimensional de flujo.

Las determinaciones de $\delta^{13}\text{C}$ del carbono inorgánico disuelto en el agua (CID) han dado $-16,1$ ‰ PDB en la Font de S'Almadrava y $-13,9$ ‰ PDB en el manantial de Sa Costera. Las especies vegetales dominantes en Mallorca

son del ciclo fotosintético de tipo Calvin, o sea, producen un CO_2 en el suelo edáfico con un valor de $\delta^{13}\text{C}$ próximo a -25‰ PDB. El $\delta^{13}\text{C}$ atmosférico es de -8‰ PDB y el de las calizas de origen marino (como es el caso de la Serra de Tramuntana) de cerca de 0‰ PDB. Tanto en S'Almadrava como en Sa Costera los valores obtenidos apuntan hacia una recarga con incorporación de CO_2 del gas del suelo en sistema abierto, o sea con equilibrio entre el ^{13}C del

gas del suelo y los bicarbonatos del agua, que es la especie carbonática acuosa dominante. Sin embargo, como en el área de captación de Sa Costera prácticamente no hay suelo edáfico, las cantidades observadas necesitan un estudio adicional, ya que es probable que el CO_2 del suelo sea en promedio más pesado que el procedente de la descomposición de la materia orgánica por influencia del CO_2 atmosférico.

		‰ V-SMOW				
		$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	d	3H (UT)	
Sa Costera	Font de Sa Costera (15 m)	-7,3	-46	+13	7-11	(1995)
	Font de Sa Bauma (725 m)	-7,2	-46	+12	4-8	(1995)
Ses Ufanes	Font de Ses Ufanes (79,5 m)	—	—	—	27-32	(1977)
	Font des Prat (780 m)	-8,0	-49	+15	0,5-6	(1995)
	Font de Son Sastre (187 m)	-5,7	-35	+11	—	—
	Font d'es Guix (578 m)	-6,9	-42	+13	~4	(1995)
	Pou Binibona (150 m)	-7,1	-42	+15	—	—
	Àrea Ses Ufanes (65 m)	-6,7	-40	+12	~8	(1995)
S'Almadrava no salinos	Font de Benifaldó (595 m)	-7,9	-47	+16	~7	(1995)
	Font S'Almadrava (8 m)	-5,3	-33	+10	4-8	(1995)
	Pous Camp Golf/Can Puig (~40 m)	-5,7	-35	+11	~4	(1995)
	S-33 (70 m)	-6,3	-36	+14	~5	(1995)
	S-34/S-27 (26 m)	-6,3	-37	+13	~2	(1995)
	SUFA-21 (100 m)	-6,7	-40	+14	~3	(1995)
	Pou L'Assallereta (460 m)	-6,6	-37	+15	~4	(1996)
	Torrent de Sitges (12 m)	-5,7	-34	+12	—	—
S'Almadrava salinos	Es Pontarró (23 m)	-5,6	-34	+11	~1	(1995)
	S'Albufera (1 m)	-8,2	-48	+17	~4	(1996)

Tabla 8. Resumen de datos isotópicos de las aguas subterráneas

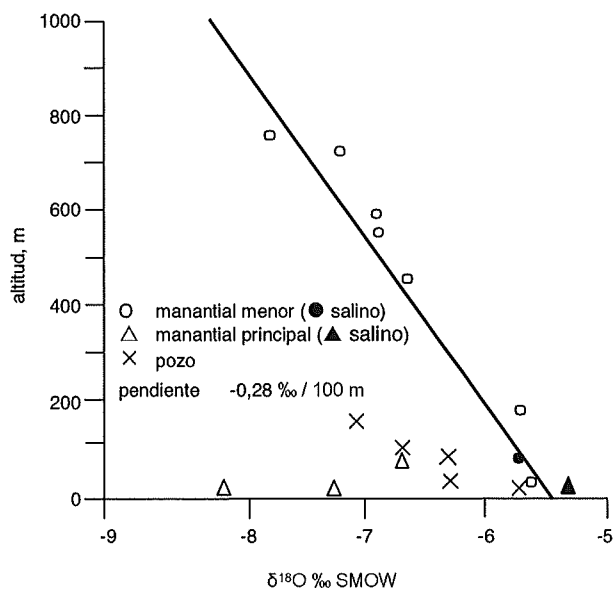


Figura 10. Relación entre $\delta^{18}\text{O}$ ‰ de las aguas subterráneas y la altitud. La recta altitudinal queda definida por los manantiales menores. Los pozos y manantiales principales quedan muy por debajo y muestra que reciben agua de altitudes mucho mayores (la intersección de la vertical con la recta altitudinal)

En los siguientes párrafos se discuten los principales aspectos referentes a cada manantial estudiado, a la luz de los datos obtenidos en este estudio y en otros trabajos recientes.

En *Sa Costera* se han obtenido datos isotópicos del agua del manantial a lo largo de cerca de dos años. La altitud de recarga oscila entre 600 y 800 m, de acuerdo con los datos isotópicos, lo que está dentro de la variación esperada en función de la geología y topografía, pero con un sesgo hacia las altitudes más elevadas. No se aprecia fraccionamiento isotópico significativo en la recarga hacia Sa Costera. Aparentemente no hay recarga significativa a bajas altitudes en el manantial de Sa Costera, lo que es esperable por la pequeña superficie que representan en el contexto de la extensión que se supone para el área de captación. Las oscilaciones observadas señalan una importante contribución de aguas de muy rápida circulación al caudal de Sa Costera.

En el área de *Ses Ufanes* hay pocos datos para formar una secuencia temporal, en parte a causa de la imprevisibilidad e intermitencia del manantial principal de la unidad (Ses Ufanes de Gabellí). El agua del manantial principal es la que se presenta como más pesada isotópicamente. En el área coinciden aguas procedentes de varias altitudes.

En el área de S'Almadrava es patente que la composición isotópica del manantial principal es variable, con valores relativamente pesados, alrededor de $-6,1\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$, después de la corrección a partir del contenido en Cl^- para eliminar el efecto de mezcla con agua de origen marino. Ello coincide con las demás aguas de baja altitud de la unidad. El agua de los manantiales de la parte alta de la sierra es un poco más ligera, con un promedio de $-7,0\text{‰}$ $\delta^{18}\text{O}$. Se puede apreciar un efecto de evaporación en dos agrupaciones en el gráfico $\delta^{18}\text{O}$ en función del $\delta^2\text{H}$ (Figura 8), lo que podría ser el resultado de la variación de los vientos dominantes, bien sean procedentes del NW, con influencia atlántica (Guijarro, 1995), bien sean de las otras direcciones dominantes, principalmente SE, con la marca isotópica Mediterránea. El modo de recarga al acuífero responde a un modelo de mezcla de tipo exponencial, con un progresivo cambio isotópico en la dirección del flujo por el continuo aporte de aguas nuevas precipitadas a altitudes menores.

Se puede estimar el tiempo de permanencia o de renovación del agua en el acuífero con auxilio del tritio como trazador difuso de recarga constante y concentración variable en el tiempo, si

se considera el sistema acuífero como hidráulicamente estacionario, lo que es una aproximación razonable en el sector estudiado dada la rápida tasa de renovación del agua. Los modelos de parámetros agregados son los generalmente utilizados en estos casos, ya que permiten importantes simplificaciones cuando se dispone de pocos datos del agua del acuífero (Richter *et al.*, 1993; Małoszewski y Zuber, 1982). Para sistemas con flujo en régimen permanente con un trazador que varía temporalmente, el contenido en tritio puede ser descrito por la integral de convolución:

$$C_s(t) = \int_{-\infty}^t C_e(t-t') \exp(-\lambda t') g(t') dt' \quad (3)$$

donde t es el momento en que se quiere determinar la concentración de salida (fecha del calendario), t' la variable de integración, C_s la concentración de salida del sistema, C_e la concentración de entrada distribuida al sistema en un tiempo anterior a t , $g(t')$ la función de ponderación o de respuesta del sistema para un modo de inyección-detección dado, que es función de uno o varios parámetros agregados y λ la constante de desintegración radioactiva del tritio = $\ln 2/T$; $T = 12,43$ años.

Los valores esperables de ^3H en la lluvia son una extrapolación de los de Barcelona, aunque algo más diluidos por mayor efecto de ambiente húmedo marino, para lo que se ha hecho una corrección de acuerdo con los valores medidos en la lluvia local.

Se ha utilizado el código de ordenador MULTIS (Richter *et al.*, 1993), desarrollado para la interpretación de datos de isótopos ambientales en estudios hidrogeológicos, para permitir el acoplamiento de modelos de mezcla exponencial y de pistón. Se ha utilizado como función de entrada para las tres zonas de estudio la concentración de tritio en la precipitación, puesto que no hay elementos de campo para efectuar una ponderación a partir de los valores de recarga. Esto introduce un error sistemático al sobrevalorar el efecto de las lluvias estivales, aunque dicho efecto no debe ser importante dadas las elevadas tasas de recarga para las diferentes precipitaciones.

La distribución general del contenido en tritio (^3H) en las muestras de agua subterránea permite elaborar algunas consideraciones preliminares. Las aguas de pozos profundos tenían un contenido en tritio comprendido entre 2 y 8 UT (unidades de tritio = 10^{-18} $^3\text{H}/1\text{H}$) en el periodo 1994-1997, en concordancia con las

precipitaciones recolectadas en el mismo periodo. Los contenidos en tritio se pueden considerar como normales para acuíferos con funcionamiento regido por mezclas de tipo exponencial ya que hay una gran variación de líneas de flujo del agua subterránea si se consideran las cotas de recarga. No obstante, los valores anómalos observados podrían explicarse por la posibilidad de que el flujo tenga localmente un desplazamiento de tipo pistón.

En el área de *Sa Costera*, los valores de tritio observados en los dos puntos de control son coherentes con el comportamiento general esperado y observado en la Serra de Tramuntana respecto a la lluvia y a las demás aguas subterráneas. Utilizando el modelo de funcionamiento más coherente para el sistema de *Sa Costera* resulta que el tiempo medio de residencia, para las soluciones más plausibles, tanto numéricamente como a nivel conceptual, está comprendido entre 30 meses (2,5 años) para flujo de pistón (PFM) + mezcla exponencial (EM) y 54 meses (4,5 años) para mezcla exponencial (EM).

En el área de *Ses Ufanes* hay, a diferencia de las otras dos zonas de estudio, datos de tritio, tanto de la lluvia como del manantial principal, de un periodo anterior (Noviembre de 1975 hasta Noviembre de 1976), obtenidos por la Junta de Aguas de Baleares. Los análisis más recientes de tritio en las aguas subterráneas de *Ses Ufanes* comprenden aguas de los manantiales de la sierra, además de datos de algunos pozos y sondeos representativos. El funcionamiento hidrogeológico de *Ses Ufanes*, teniendo en cuenta sus aspectos geométricos, se puede simular como un modelo de flujo de mezcla total (exponencial) en la zona de recarga, pero es posible que haya flujo asimilable al de pistón en parte del área. Los resultados indican que el tiempo medio de residencia, para la solución con menor error y conceptualmente más atractiva de las hipótesis de funcionamiento, es de un 64 % de PFM y 36 % de EM, para un tiempo medio de residencia entre 2 y 3 años. Esto podría estar en concordancia con el esquema de dos reservorios descargando hacia *Ses Ufanes*, uno superior, más pequeño, y otro inferior, mayor y parcialmente confinado durante su recorrido.

En *S'Almadrava* se dispone de una cantidad considerable de muestras de agua subterránea, lo que permite variantes interpretativas. No obstante, se ha optado por ensayar las hipótesis de trabajo más importantes que han surgido a lo largo de este estudio, como son: 1) existencia de dos subáreas con flujo paralelo entre sí, con-

vergiendo al manantial principal de la Unidad al final del trayecto; 2) un sistema claramente asimilable a una mezcla exponencial, con la ocurrencia de tramos confinados/semiconfinados en que puede haber localmente flujo de tipo pistón. Como consecuencia de lo expuesto se ha decidido elaborar la simulación tanto con mezcla total (exponencial) como con el modelo en serie de pistón y mezcla total, pero acoplado en este caso dos líneas de flujo en paralelo. La complejidad de este modelo hace que la fiabilidad de los resultados obtenidos sea dudosa, pero estos indican una buena concordancia con lo planteado como hipótesis de partida. El modelo más realista puede ser el que supone la existencia de dos almacenes distintos, cada uno con flujo de mezcla total, uno respondiendo al flujo rápido y otro al lento. En este caso, el tiempo de renovación del flujo rápido sería de cerca de 8 años, y para el lento sería superior a 300 años, pero con una contribución volumétrica reducida.

CONCLUSIONES Y CONSIDERACIONES FINALES

La precipitación en la Serra de Tramuntana tiene características químicas variables, con baja mineralización en general, pero que en ocasiones puede presentar valores relativamente elevados en algunos iones. El contenido en isótopos ambientales de la precipitación se ajusta a una línea meteórica local que está entre la línea meteórica mundial (exceso de deuterio +10‰) y la Mediterránea Occidental (exceso de deuterio +15‰). La dispersión observada en los datos puede ser debida a fraccionamiento isotópico por evaporación previa a la recarga. A partir de los datos de aguas subterráneas del sector de estudio se deduce un gradiente altitudinal de -0,28‰/100m para el ^{18}O . Los datos de tritio en la lluvia muestran, como era de esperar, un pico en junio/julio, y mínimos en marzo y noviembre, muy similares a los de Barcelona, aunque las cantidades absolutas de tritio son menores en Mallorca por mayor humedad atmosférica.

La composición química del agua subterránea de las áreas de estudio no presenta gran variación. En general dominan las aguas bicarbonatadas cálcicas, más o menos sulfatadas. Las mayores diferencias entre las tres áreas de muestreo son las altas concentraciones de iones cloruro y sodio, en particular en el área de *S'Almadrava*, donde algunas aguas tienen carácter francamente clorurado sódico, indicando intrusión marina, y en crecimiento. La presencia de contenidos elevados de sulfato, principalmente en las áreas de

Ses Ufanes y Sa Costera, se puede asociar a los niveles yesíferos del Keuper. En épocas de sequía y bajos caudales en los manantiales se nota la tendencia a mayores contenidos de sulfato y una cierta mayor salinización en general.

En *Sa Costera* hay oscilaciones importantes en el contenido en sales disueltas, con ligera tendencia a un mayor contenido salino en verano. Se trata de un agua de circulación rápida, pero con una cierta interacción con el suelo edáfico. Las relaciones iónicas indican enriquecimiento en calcio debido al tránsito por calizas, y en sulfato por efecto de niveles yesíferos. Isotópicamente las aguas son de circulación rápida, recargadas entre 600 y 800 m de altitud. La recarga media se estima en el 50 % de la precipitación media.

Las aguas de circulación regional del área de *Ses Ufanes* presentan baja mineralización, con unos contenidos pequeños en sulfato, y casi siempre saturadas en calcita aunque subsaturadas en dolomita. En general se observan relaciones iónicas con valores típicos de macizos carbonatados. La recarga media estimada mediante el balance de cloruros es de cerca del 40 % de la precipitación media. En *Ses Ufanes* se concluye que solamente es posible el flujo de agua subterránea por el bloque superior de la falla de Biniatró hacia *S'Almadrava* si se considera una incertidumbre elevada en el balance iónico, pero aun así es más probable que el flujo hacia aguas abajo de la falla. Son aguas isotópicamente algo más pesadas que en los demás puntos de agua existentes en la unidad, lo que se interpreta como el resultado de una mezcla de aguas de varias altitudes, con predominio de las que provienen de 300 m a 600 m de altitud. El funcionamiento hidrogeológico se puede simular con un modelo de mezcla total con flujos de pistón en paralelo, correspondientes a las escamas tectónicas que propician la existencia de dos niveles acuíferos, uno superior libre y otro inferior parcialmente confinado en las cercanías de la zona de descarga de los manantiales.

Desde el punto de vista hidroquímico, las aguas del área de *S'Almadrava* presentan un carácter diverso, debido a la variable influencia del mar y también a la multiplicidad de orígenes del agua. En líneas generales se trata de aguas de carácter insular, bicarbonatadas cálcicas, con varios grados de mezcla con aguas cloruradas sódicas de influencia marina. La química revela un aporte de agua dulce al caudal del manantial del orden de 70 % en épocas secas y el 80-90 % en épocas lluviosas. Aparentemente el contenido de ion cloruro viene creciendo a lo lar-

go de los últimos años, lo que se puede atribuir al bombeo para riego y consumo doméstico en el entorno de Pollença. De una manera general las aguas tienen un contenido más o menos similar de iones calcio y bicarbonato, y en algunos puntos son bicarbonatadas cálcicas, pero su carácter final viene dado por su contenido en agua marina, que puede llegar a más del 10 %, como en la Font de *S'Almadrava*. Los resultados preliminares señalan que la evolución hidrogeoquímica desde la subárea 1 (*Tomir*) sugiere una mezcla de sus aguas con las del Llano de *Pollença*. En la subárea 2 (*Aixartell*), el paso del agua a través del tubo de flujo previsto parece muy plausible termodinámicamente ya que las transferencias de masa siguen siempre el mismo patrón. El agua del manantial principal es isotópicamente una mezcla de aguas de distintas procedencias, de carácter pesado y muy cambiante temporalmente. En los puntos de agua de este área se observa un progresivo enriquecimiento isotópico desde la Serra de *Tramuntana* hacia el manantial, lo que indica un efecto de mezcla progresivo con aportes locales en el recorrido hacia la descarga principal. Los modelos aplicados para el estudio del tiempo de permanencia en el acuífero apuntan hacia un modelo mixto exponencial-pistón, con claro predominio del flujo exponencial y tiempo medio de residencia de 8 años, lo que puede ser razonable dado el largo recorrido y las condiciones generales del acuífero. La recarga media se estima alrededor del 30 % de la precipitación media.

El estudio hidrogeoquímico en terrenos kársticos tectónicamente complejos, como en el área de estudio, representa un desafío por la incertidumbre en cuanto al comportamiento hidrogeológico. La interpretación de datos queda sometida a dudas en cuanto a las influencias externas, geometría de los conductos kársticos y heterogeneidades presentes, las que no suelen estar presentes en otros tipos de acuíferos. El empleo de varias técnicas complementarias asociadas a estudios hidrodinámicos (Cardoso da Silva y Custodio, 2008), con una interpretación conjunta, ofrece la posibilidad de sopesar el efecto de los diversos componentes, permitiendo una interpretación más afinada del funcionamiento hidrogeológico del sistema.

AGRADECIMIENTOS

Los trabajos aquí referidos se realizaron parcialmente con recursos del proyecto GRACE, financiado por el programa Environment de la UE (EC Framework III Project RTD EV-SV-CT94-

0471), y con la colaboración de la Junta d'Aigües de Balears y de IBAGUA, en convenio con la Universitat Politècnica de Catalunya y el Centro Internacional de Hidrología Subterránea (Barcelona). El primer autor ha recibido el apoyo de una beca CAPES/Universidade Federal do Rio de Janeiro (Brasil). También se agradece la colaboración de la Oficina en Baleares del Instituto Geológico y Minero de España. Personalmente se agradece el apoyo, información e ideas recibidas del Dr. José A. Fayas, de los Geólogos Alfredo Barón y Concha González, además del soporte geológico de los Drs. Francesc Sabat y Bernardí Gelabert.

REFERENCIAS

- Alcalá, F.J., (2006). Recarga a los acuíferos españoles mediante balance hidrogeoquímico. Tesis doctoral, Univ. Politéc. Cataluña, 2 Vols, 1-719. <http://www.tesisenxarxa.net/TDX-0607106-104930/>
- Alcalá, F.J. y Custodio E., (2008). Atmospheric chloride deposition in continental Spain. *Hydrological Processes*, 22, 3636-3650.
- Araguás, L., (1991). Adquisición de los contenidos isotópicos (^{18}O y D) de las aguas subterráneas: variaciones en la atmósfera y en la zona no saturada del suelo. Tesis doctoral. Universidad de Barcelona.
- Appelo, C.A.J. y Postma, D., (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. 2nd Ed., A.A. Balkema, 1-649.
- Arfib, B., de Marsily, G. y Ganoulis, J., (2007). Locating the zone of saline intrusion in a coastal karst aquifer using springflow data. *Ground Water*, 45(1), 28-35.
- Barón, A., Fayas, J.A., González, C., (1984). Estudio hidrogeológico de un manantial kárstico intermitente: las Ufanes de Gabellí (Mallorca): posibilidades de regulación. *Actas 1er Cong. Español de Geología, Segovia, Vol. IV*.
- Barón, A. y González, C., (1978). Evaluación de los recursos del manantial de S'Almadrava 1972-1977. Informe interno, Servicio Hidráulico Balear, Palma de Mallorca, 1-32.
- Bowen, G.J. y Wilkinson, B., (2002). Spatial distribution of ^{18}O in meteoric precipitation. *Geology*, 99(4), 315-318.
- Cardoso da Silva, G., Gelabert, B., Custodio, E., Barón, A. y Manzano, M., (1996). Nuevas perspectivas sobre la hidrogeología de Sa Costera, noroeste de la Serra de Tramuntana (Mallorca): interpretación de datos químicos e isotópicos basada en estudios geológicos. *Jornadas sobre Recursos Hidráulicos en el Karst, Vitoria*, 1, 217-232.
- Cardoso da Silva, G., (1997). Comportamiento de los manantiales del karst nororiental de la Serra de Tramuntana, Mallorca. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1-365 + Anejos, (inédito).
- Cardoso da Silva, G. y Custodio, E., (2008). Aspectos hidrodinámicos del sector NE de la Serra de Tramuntana, Mallorca, España. *Ingeniería del Agua*, 14(4), 319-340.
- Cheng, S., (1996). Isotopic tracing of the source water for Cedar Bog in west-central Ohio, USA. *Journal of Hydrology*, 186, 31-42.
- Clark, I. y Fritz, P., (1997). *Environmental isotopes in hydrogeology*. CRC Press, USA, 1-328.
- Custodio, E. y Bruggeman, G., (1987). Saline water problems in coastal areas. *Studies and Reports in Hydrology*, no. 45, UNESCO Press, Paris, 1-670.
- Custodio, E. y Llamas, M.R., (1983). *Hidrología subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, 2 vols, 1-2350.
- Custodio, E., (1990). Saline groundwater in the Canary Islands (Spain) resulting from aridity. *Greenhouse Effect, Sea Level and Drought*. NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, no. 325, Kluwer, Dordrecht, 593-618.
- Custodio, E., (2009). Estimation of aquifer recharge by means of atmospheric chloride deposition balance. *Contributions to Science*, 5(2).
- Custodio, E., Poncela, R., Badiella, P. y Bayó, A., (1991). Hidrología subterránea del sector comprendido entre Palma y Alcudia, con énfasis en la explotación de agua subterránea para el abastecimiento de Palma, Mallorca. *Curso Intern. Hidrología Subterránea*, Univ. Politécnica de Cataluña, Barcelona, 1, 222, (interno).
- Custodio, E., Poncela, R., Badiella, P. y Bayó, A., (1992). Técnicas hidrogeoquímicas e isotópicas ambientales aplicadas al estudio

- hidrogeológico de la Serra Nord de Mallorca. *Hidrogeología y Recursos Hidráulicos, Asociación Española de Hidrología Subterránea*, Madrid, XIX, 405–420.
- Dansgaard, W., (1964). Stable isotopes in precipitation. *Tellus*, 16(4), 4365–468.
- Fleury, P., Bakalowicz, M. y de Marsily, G., (2007). Submarine springs and coastal karst aquifers: a review. *Journal of Hydrology*, 339, 79–92.
- Gat J.R. y Gonfiantini, R., (1981). Stable isotope hydrology: Deuterium and oxygen-18 in the water cycle. IAEA Techn. Report Series, no. 210, Vienna.
- Gelabert, B., (1995). Estructura geològica del sector septentrional de la Serra de Tramuntana de Mallorca. *Junta d'Aigües de Balears*, Palma, 1, 119, (incl. Anexos).
- Gelabert, B., (1996). Estructura del sector septentrional de la Serra de Tramuntana de Mallorca. *Junta d'Aigües de Balears*, Palma, 1, 85 (incl. Anexos).
- Gelabert, B., (1997). L'estructura geològica de la meitat occidental de l'illa de Mallorca. Tesis doctoral, Universidad de Barcelona, Barcelona, 1, 372, (inédito).
- Gelabert, B., Cardoso da Silva, G., Custodio, E., Barón, A., Manzano, M. y Junco, 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. *Jornadas sobre Recursos Hidráulicos en el Karst*, Vitoria, 1, 201–216.
- Guijarro, J., (1995). Aspectes bioclimàtics del carst de Mallorca. *ENDINS, Federació Balear d'Espeleologia*, 20, 17–26.
- Iglesias, M, Lambán, J., Cardoso da Silva, G. y Custodio, E., (1997). El balance de cloruros como indicador de la recarga: ejemplos recientes. *La Evaluación de la Recarga a los Acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Asoc. Intern. Hidrología Subterránea, Grupo Español/ITGE, Madrid, 357–366.
- Jiménez, J. y Custodio, E., (2008). El exceso de deuterio en la lluvia y en la recarga a los acuíferos en el área circum-mediterránea y en la costa mediterránea española. *Bol. Geol. Min.*, Madrid, 119(1), 21–32.
- Llobera, M. y Ferriol, A., (1994). Seasonal fluctuations in the chemistry of limestone springs from the Tramuntana mountain Range (Mallorca, Spain). *Verh. Internat. Verein. Limmol.*, 25, 1445–1448.
- Małozzewski, P. y Zuber, A., (1982). Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers. 1: Models and their applicability. *Journal of Hydrology*, 57, 207–231.
- MOPU, (1973). Estudio de los recursos hidráulicos totales de la isla de Mallorca: informe de recopilación y síntesis. *Memoria-Informe*, Tomo 1, Memoria: Tomo 2 y Anejos.
- Parkhurst, D.L. y Appelo, C.A.J., (1999). User's guide to PHREEQC (Version 2)—a computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, Report 99-4259, 1-312.
- Plata, A., (1994). Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas de la Península Ibérica. *Monografías CEDEX, MOPTMA*, Madrid, 1–139.
- Ramón, G., Barón, A., Fernández, M.I., Massanat, M.F., Tur, M., Vicens, M. y Vidal, A., (1994). Fonts de l'Almadrava (Pollença), an unusual spring site on the island of Mallorca. *Verh. Internat. Verein. Limmol.*, 28, 1452–1454.
- Richter, J., (1993). Use of combinations of lumped parameter models to interpret groundwater isotopic data. *Journal of Contaminant Hydrology*, 14, 1–13.
- Sanz, E., Custodio, E., Carrera, J., Ayora, C., Barón A. y González, C., (2002). Modelling coastal salty springs: first approach in carbonate media (S'Almadrava, Mallorca, Spain). *Proc. 17th Salt Water Intrusion Meeting*, Delft University of Technology, Fac. Civil Eng. and Geosciences, 195–203.
- SHB, (1987). *Hidrogeología de la Isla de Mallorca*. Servicio Hidráulico de Baleares, Palma de Mallorca, 1, 83 + 12 planos.
- Van Meir, N., Jaeggi, D., Herfort, M., Loew, S., Pezard, Ph.A. y Lods, G., (2007). Characterizing flow zones in a fractured and karstified limestone aquifer through integrated interpretation of geophysical and hydraulic data. *Hydrogeology Journal*, 15, 225–240.

HYDROGEOCHEMISTRY AND ENVIRONMENTAL ISOTOPE ANALYSIS OF THE NORTH-EASTERN SECTOR OF SERRA DE TRAMUNTANA RANGE, MALLORCA ISLAND (SPAIN)

G. Cardoso da Silva Jr. and E. Custodio

*Departamento de Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro
Cidade Universitária
21949-916 Rio de Janeiro, Brasil*

Summary

A good knowledge of the hydrogeochemical characteristics of the Serra de Tramuntana, a karstified carbonate mountain range located in the north-western portion of Majorca Island, Spain, is a key factor for the accurate evaluation and management of its groundwater resources. These resources have a strategic value for Mallorca, since a significant amount of groundwater is available there. Since 2008 exploitation development is being undertaken with the Sa Costera spring diversion system. The hydrogeochemical and isotopic characteristics of three zones in the north-eastern sector of the Serra de Tramuntana have been studied: 1) Sa Costera spring, in the northeastern sea cliffs of the island; 2) Ses Ufanés de Gabellí, intermittent springs discharging to the Central Plain of Mallorca, near the village of Campanet; 3) S'Almadrava spring, discharging mixed salt and fresh water in the Pollença coastal plain at the island's extreme north. The groundwater flow conceptual model of the Serra de Tramuntana karst system has been revised after new basic geologic and hydrogeological works (Cardoso da Silva and Custodio, 2008), and now by means of chemical and environmental isotopic data. Radioactive isotope data interpretations have been refined with the MULTIS code.

Results indicate that groundwater flow patterns in the Serra de Tramuntana aquifers confirm previous conceptual models, with some modifications. Calcium bicarbonate waters dominate. High concentrations of sodium and chloride are only found in the S'Almadrava zone, pointing to marine intrusion. The presence of high sulfate contents, mainly in the areas of Ses Ufanés and Sa Costera can be associated to gypsum lenses in the Keuper formation. Recharge rate is between 0.3 to 0.5 of yearly precipitation, being greater the higher the area.

Keywords: Hydrogeology, hydrogeochemistry, environmental isotopes, karst, recharge, Mallorca island