

Fig. 2.- Relación entre contenidos de deuterio y oxígeno 18

Fig. 2.- Plot of deuterium versus oxygen 18 contents

variaciones espaciales y temporales de los contenidos en cloruros, oxígeno 18 y deuterio del agua de precipitación del área citada.

Metodología

Se ha seleccionado la estación de Linares, a unos 420 m de cota, en la que se han tomado muestras de los principales episodios diarios de precipitación (superiores a 5 mm) entre octubre de 2002 y marzo de 2003, es decir, a lo largo del periodo en que se suele producir la mayoría de la recarga a los acuíferos. Se han obtenido así siete muestras, con una cantidad total de lluvia recogida de algo menos de 100 mm (tabla 1).

Por otra parte, se han seleccionado una serie de puntos con altitudes contrastadas, entre 500 y 2000 m, y facilidad de acceso, situados en diferentes sectores del área de estudio. De hecho, se ha aprovechado la circunstancia de que en dos de las principales cumbres provinciales, La Pandera y Almadén, existe acceso por carretera, lo que ha permitido tomar muestras a diferente cota en su entorno mediante dispositivos específicamente diseñados al efecto. Se han tomado 13 muestras de precipitación en dos situaciones favorables: a comienzos de diciembre de 2002 y a finales de marzo de 2003.

En la figura 1 se indica la situación de los puntos de muestreo y en la tabla 1 se incluye su toponimia y cota aproximada, así como valores estimados de tempera-

tura media y de cantidad de precipitación durante cada muestreo. La temperatura se ha obtenido a partir de la estación más cercana con registro, aplicando un gradiente de $-0,4^{\circ} \text{C}/100 \text{ m}$. La cantidad de precipitación corresponde a la de la estación más cercana, sin corregir. La muestra c del punto 4 era nieve.

Las muestras de isótopos se han analizado en el laboratorio de espectrometría

de masas de relaciones isotópicas de la Universidad Autónoma de Madrid. El patrón es el Viena-SMOW. El error analítico es $0,1\text{‰}$ para el D^{18}O y 1‰ para el δD . Las muestras de cloruros se han analizado mediante cromatografía iónica en el laboratorio del Instituto del Agua de la universidad de Granada.

Resultados

En la tabla 1 se indican los contenidos en las especies estudiadas. También se incluye el valor del parámetro "exceso en deuterio" (d), definido como $d = \delta\text{D} - 8\delta^{18}\text{O}$.

Para el conjunto de las 20 muestras, los contenidos en cloruros varían entre $0,2$ y $2,4 \text{ mg/L}$. El valor medio es $1,0 \text{ mg/L}$ y el coeficiente de variación 53% . El $\delta^{18}\text{O}$ varía entre $-13,4\text{‰}$ y $-3,0\text{‰}$, con una media de $-6,8\text{‰}$ y coeficiente de variación 34% . El deuterio varía entre $-100,3\text{‰}$ y $-15,7\text{‰}$, con una media de $-42,8\text{‰}$ y coeficiente de variación 44% . El valor del exceso en deuterio está comprendido entre $3,9\text{‰}$ y $21,8\text{‰}$, con un valor medio de $11,6\text{‰}$ y un 43% de coeficiente de variación. La figura 2 relaciona gráficamente los contenidos de los dos isótopos analizados en las 20 muestras.

En la tabla 1 se han estructurado los resultados en dos grupos: A y B. El grupo A integra todas las estaciones menos la de Linares y permite caracterizar variaciones espaciales y altitudinales en las va-

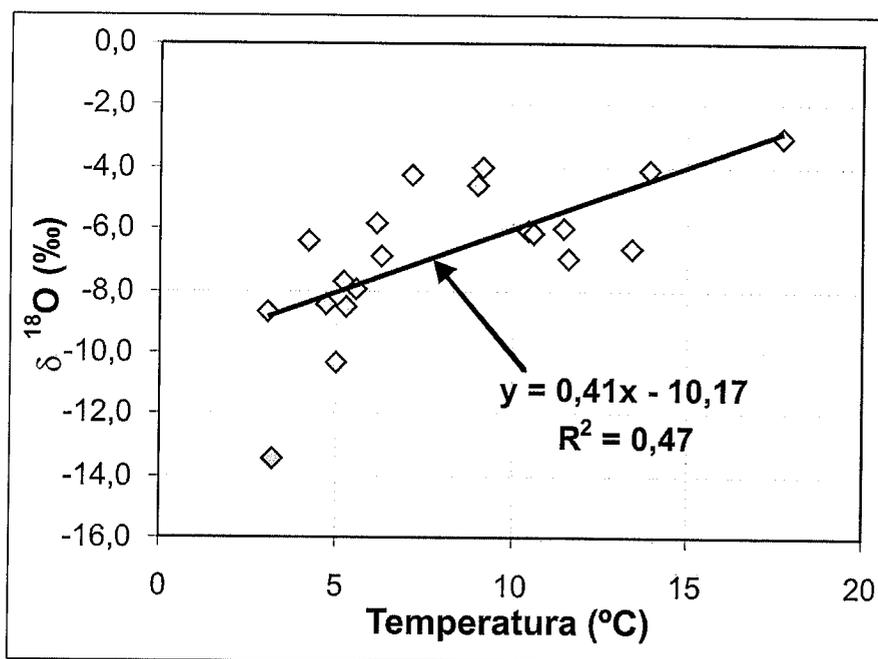


Fig. 3.- Relación entre contenido de oxígeno 18 y temperatura

Fig. 3.- Plot of oxygen 18 content versus temperature

Ref.	Toponimia	Cota (m)	Fecha	$\delta^{18}O_{vsnow}(0)$	$D_{vsnow}(0)$	T (°C)	P (mm)	Cl ⁻ (mg/l)	d=δD-8δ ¹⁸ O	
P-1a	La Pandera	1000	1-12/12/02	-5,80	-28,6	6,2	13	0,6	18	
P-1b	La Pandera	1500	1-12/12/02	-6,39	-29,4	4,2	13	0,8	22	
P-1c	La Pandera	1870	1-12/12/02	-8,66	-52,8	3,1	13	0,7	17	
P-2	Noalejo	1055	26-27/03/03	-6,10	-40,7	10,5	30	0,5	8	
P-3	La Guardia	500	1-12/12/02	-4,04	-21,5	9,2	13	1,6	11	
	La Guardia	500	26-27/03/03	-6,63	-48,9	13,4	24	1,2	4	
P-4a		1000	1-12/12/02	-4,30	-23,0	7,2	13	0,7	11	
P-4b		1500	1-12/12/02	-7,73	-44,5	5,2	13	1,5	17	
P-4c		2000	1-12/12/02	-13,43	-100,3	3,2	13	1,0	7	
P-6		1200	1-12/12/02	-10,37	-68,6	5	2	0,6	15	
P-7		740	1-12/12/02	-8,52	-59,3	5,3	3	1,1	9	
P-8	Pto. de las Palomas	1210	1-12/12/02	-8,48	-53,1	4,7	8	0,4	15	
P-9		810	1-12/12/02	-6,86	-45,0	6,3	8	0,5	10	
GRUPO A				Media	-7,49	-47,4	6,4	13	0,9	13
				Min.	-13,43	-100,3	3,1	2	0,4	4
				Max.	-4,04	-21,5	13,4	30	1,6	22
				C.V. (%)	32	43	45	58	44	39
Ref.	Toponimia	Cota (m)	Fecha	$\delta^{18}O_{vsnow}(0)$	$D_{vsnow}(0)$	T (°C)	P (mm)	Cl ⁻ (mg/l)	d=δD-8δ ¹⁸ O	
P-5	Linares	420	21/10/2002	-3,04	-15,7	17,7	5	1,8	8	
	Linares	420	14/11/2002	-6,11	-29,8	10,6	20	0,9	19	
	Linares	420	18/12/2002	-4,13	-28,5	13,9	8	2,4	4	
	Linares	420	27/12/2002	-5,96	-42,7	11,5	15	0,7	5	
	Linares	420	05/01/2003	-4,62	-27,2	9	8	1,2	10	
	Linares	420	09/01/2003	-7,94	-48,6	5,6	11	1,3	15	
	Linares	420	27/03/2003	-6,97	-47,5	11,6	21	0,2	9	
GRUPO B				Media	-5,54	-34,3	11,4	13	1,2	10
				Min.	-7,94	-48,6	5,6	5	0,2	4
				Max.	-3,04	-15,7	17,7	21	2,4	19
				C.V. (%)	28	33	31	47	55	48

Tabla I.- Resultados del muestreo

Table I.- Sampling results

riables consideradas. El grupo B corresponde a las muestras de Linares y permite ilustrar sobre variaciones temporales.

Los valores medios de contenidos isotópicos son más negativos en el grupo A, el de mayor altitud y menor temperatura media. La variabilidad de los datos es ligeramente superior en el A que en el B. Los valores más negativos en ambos isótopos se han medido en la muestra de nieve, que es la obtenida a la cota máxima (P-4c). Los menos negativos se han registrado en la estación de Linares, de menor cota y, consecuentemente, de mayor temperatura media. En los valores del contenido de cloruros, la media del grupo A es ligeramente inferior a la del B: 0,9 frente a 1,2 mg/L. En cuanto al exceso de deuterio, el valor medio es superior en el grupo A y la variabilidad mayor en el B.

Discusión

Los datos obtenidos de contenidos isotópicos son del mismo rango que los procedentes de un estudio previo -Cruz San Julián *et al.* (1992)- en que se incluyen muestras de precipitaciones del área aquí considerada, concretamente de su sector más oriental (13 muestras en la Sierra de Cazorla), entre febrero y abril de 1990, a cotas comprendidas entre 1000 y 1800 m. En ese caso, sin embargo, los valores del exceso en deuterio eran más homogéneos y superiores, próximos a 20‰ como media. Hay que señalar que los análisis fueron realizados en otro laboratorio, lo que puede influir de alguna manera en las comparaciones de resultados.

Los valores medios obtenidos en los contenidos isotópicos del área son inter-

medios entre los correspondientes a Madrid y Barcelona que se presentan en Plata (1994), lo cual parece acorde con las características climatológicas de la zona estudiada.

En cuanto a contenidos de cloruros en las precipitaciones, son escasos los datos publicados a partir de estudios sistemáticos. En un sector al sur del área estudiada, como es la vertiente meridional de Sierra Nevada, se han medido en una treintena de puntos valores entre 17 y 3 mg/L (Cardenal *et al.*, 1994). Los valores obtenidos en este

trabajo son coherentes con dicha información previa, pues la diferencia se debe al efecto de continentalidad que afecta con más incidencia al área que aquí nos ocupa.

Para el conjunto de las muestras, la figura 2 señala un muy buen ajuste a la Línea del Agua Meteorica Mundial, cuyo coeficiente angular es 8 y cuyo término independiente es 10. En términos generales, los resultados apuntan, en primer lugar, hacia un control fundamentalmente térmico en la dispersión en los contenidos de los isótopos estudiados, ya sea directo, debido a la estación del año en que se producen las precipitaciones, o indirecto, condicionado por la altitud de los puntos de muestreo. Diferencias en el origen del área fuente de las masas nubosas o la eventual incidencia de procesos evaporativos son efectos que también pueden influir en los resultados obtenidos. Otros efectos, como los inducidos por la cantidad de precipitación, la latitud o la continentalidad (Gat *et al.*, 2002) no parecen tener influencia significativa en el área estudiada.

La figura 3 refleja la relación entre el contenido de $\delta^{18}O$ y la temperatura estimada. Para el deuterio el ajuste lineal es peor, aunque la tendencia que manifiesta es similar. En ambos casos, el que no exista una mejor relación lineal debe estar motivado por la diferente procedencia de las masas de vapor de agua, que en la zona de estudio suele ser atlántica o mediterránea (Cruz san Julián *et al.*, 1992;

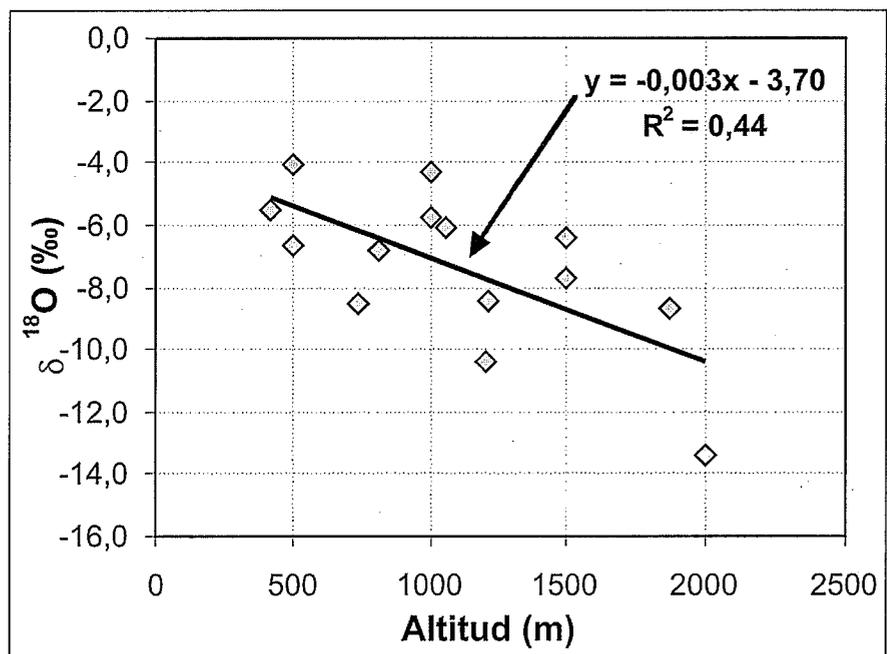


Fig. 4.- Relación entre contenido de oxígeno 18 y altitud

Fig. 4.- Plot of oxygen 18 content versus altitude

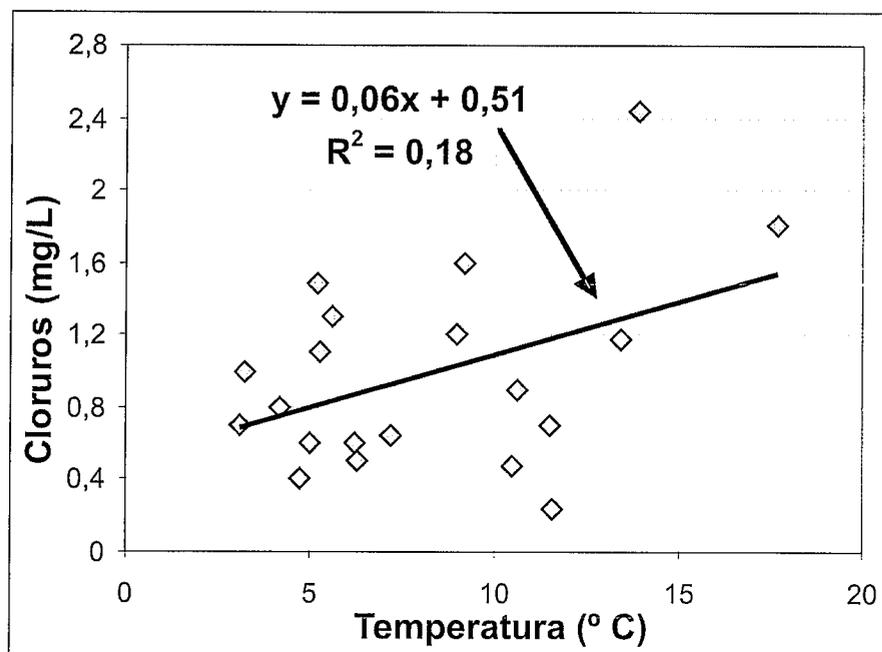


Fig. 5.- Relación entre contenido de cloruros y temperatura

Fig. 5.- Plot of chloride content versus temperature

Vandenshrick *et al.*, 2002), o del distinto grado de evolución de tales masas. A este respecto, es de destacar los valores muy diferentes que resultan para el exceso en deuterio (tabla 1), en algunos puntos de alrededor de 20 ‰, lo que sugiere la segunda de tales procedencias.

En la figura 4 se relaciona el contenido de ^{18}O y la altitud de los puntos de muestreo. Sólo se ha incluido para la estación de Linares el promedio de las siete muestras. Se deduce un gradiente de $-0,33$ ‰ por 100 m, lo cual está dentro del rango típico que señalan Yurtsever y Gat (1981) y es muy cercano al valor de $-0,25$ ‰ que Plata (1994) señala como más frecuente. Es, en cualquier caso, un valor muy semejante al de $-0,35$ ‰ por 100 m que encuentran Cruz San Julián *et al.* (1992) para las sierras de Cazorla, Segura y Baza, es decir, para un área que prolonga la aquí estudiada hacia el sureste. Para el deuterio, el gradiente encontrado es de $-2,2$ ‰ por 100 m, también dentro del rango más usual según los autores citados.

En cuanto al contenido en cloruros, ya se ha apuntado que presenta una cierta dependencia de la temperatura. Esta relación se ilustra en la figura 5, la cual permite constatar la tendencia, afectada de una notable dispersión, de incremento en los contenidos con la temperatura. Ello

puede reflejar un efecto de concentración evaporativa que afecta más a las muestras obtenidas a menor cota, que implican un mayor trayecto desde la nube hasta el punto de muestreo. No obstante, es de resaltar que la mayor variabilidad se registra en el grupo B, donde el efecto de la altitud no puede invocarse. En este caso, la causa podría ser la distinta procedencia y longitud de trayecto de las masas nubosas que producen precipitación en el área. Esta misma causa debe ser también responsable de la mayor variabilidad del exceso de deuterio en las muestras del grupo B.

Conclusiones

Las muestras de precipitación recogidas en diferentes puntos del alto Guadalquivir (provincia de Jaén), a cotas entre 400 y 2000 m y en distintas fechas entre octubre de 2002 y marzo de 2003, ponen de manifiesto una notable variabilidad en sus contenidos de cloruros y de los isótopos ^{18}O y deuterio. Los contenidos isotópicos se ajustan bien a la Línea del Agua Meteorica Mundial. En sus valores es patente la influencia de la altitud, de acuerdo con gradientes típicos para cada especie. El efecto de estacionalidad, con las variaciones térmicas que conlleva, es

también importante, aunque seguramente la influencia de la distinta procedencia de las masas nubosas afecta más este tipo de variabilidad, como se pone de manifiesto por la dispersión en los valores del exceso en deuterio.

Las diferencias en el contenido en cloruros deben también estar condicionadas por la procedencia de las precipitaciones, aunque el efecto evaporativo sobre las gotas motiva que los contenidos medios sean ligeramente más bajos en las muestras tomadas en las mayores altitudes.

Agradecimientos

Investigación realizada en el marco de un contrato entre la Universidad de Jaén y el Instituto Geológico y Minero de España (Clave Proyecto: Expediente 451/02). También constituye una aportación del primer firmante (J.B.H.) al Proyecto 448 del PICG (IUGS-UNESCO). Los autores agradecen la colaboración prestada por Amparo Carrillo (Universidad de Jaén) en la obtención de muestras de precipitación.

Referencias

- Cardenal, J., Benavente, J. y Cruz San Julián, J.J. (1994): *Geogaceta*, 16: 3-6.
- Cruz San Julián, J.J., Araguas, L., Rozanski, K., Benavente, J., Cardenal, J., Hidalgo, M.C., García-López, S., Moral, F. y Olías, M. (1992): *Tellus*, 44B, 226-236.
- DPJ-ITGE (1997): *Atlas hidrogeológico de la provincia de Jaén*. 175 p.
- Gat, J., Mook, W.G. y Meijer, H.A.J. (2002): *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico. Principios y aplicaciones* (W.G. Mook, editor), 173-235. Gufas y manuales IGME, nº 1.
- Plata, A. (1994): *Composición isotópica de las precipitaciones y aguas subterráneas en la península ibérica*. Monografías CEDEX, 139 p.
- Vandenshrick, G., van Wesemael, B., Frot, E., Pulido, A., Molina, L., Stievenard, M. y Souchez, R. (2002): *Journal of Hydrology* 265, 43-55.
- Yurtsever, Y. y Gat, J. (1981). Atmospheric Waters. In *Stable Isotope Hydrology: D and ^{18}O in the Water Cycle*, Technical Report Series 210, 103-142. IAEA, Viena.