

Cambios climáticos cortos en el Pirineo central durante el final del Pleistoceno superior y Holoceno a partir del registro estalagmítico de la cueva de Sesó (Huesca)

Short climatic changes in the Central Pyrenees at the end of the Upper Pleistocene and Holocene from stalagmite records in the Sesó Cave (Huesca, Spain)

Miguel Bartolomé^(1,2), Ana Moreno⁽¹⁾, Carlos Sancho⁽²⁾, John Hellstrom⁽³⁾ y Anchel Belmonte⁽²⁾

⁽¹⁾ Departamento de Procesos Geoambientales y Cambio Global, Instituto Pirenaico de Ecología-CSIC, Avda. Montañana 1005, 50059 Zaragoza, España. mbarolomeucar@hotmail.com, amoreno@ipe.csic.es

⁽²⁾ Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, España. csancho@unizar.es, anchelbr@unizar.es

⁽³⁾ School of Earth Sciences, University of Melbourne, Victoria 3010, Melbourne, Australia. j.hellstrom@unimelb.edu.au

ABSTRACT

The Sesó Cave (Boltaña, Huesca province) in the Pyrenees houses stalagmites recording climate variability during the end of Upper Pleistocene and Holocene times. Six growing periods have been deduced by U/Th dating at 12.9-11.5 ka, 9.1-8.3 ka, 6.3-6.2 ka, 3.0-2.5 ka, 1.8-1.4 ka and 0.6-0.2 ka, respectively. These intervals correspond to cold and/or wet short climate changes identified at a regional scale. Isotopic data ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$) indicate that environmental conditions during the Younger Dryas were cooler and drier than in the Holocene.

Key-words: Stalagmites, Younger Dryas, Holocene, Central Pyrenees.

RESUMEN

Las estalagmitas de la cueva de Sesó (Boltaña, provincia de Huesca) registran cambios climáticos cortos durante el final del Pleistoceno superior y el Holoceno los Pirineos centrales. Mediante U/Th se diferencian seis fases de crecimiento estalagmítico (12.9-11.5 ka, 9.1-8.3 ka, 6.3-6.2 ka, 3.0-2.5 ka, 1.8-1.4 ka y 0.6-0.2 ka) que se correlacionan con etapas frías y/o húmedas a escala regional. Los datos isotópicos ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) indican que durante el Younger Dryas las condiciones fueron más frías y áridas que durante el Holoceno.

Palabras clave: Estalagmitas, Younger Dryas, Holoceno, Pirineos centrales.

Geogaceta, 51 (2012), 59-62.
ISSN:2173-6545

Fecha de recepción: 15 de julio de 2011
Fecha de revisión: 3 de noviembre de 2011
Fecha de aceptación: 25 de noviembre de 2011

Introducción

Los estudios paleoclimáticos resultan necesarios para comprender la variabilidad climática existente a diferentes escalas de tiempo. Los espeleotemas constituyen una importante fuente de información paleoclimática ya que pueden registrar variaciones en algunos parámetros climáticos (temperatura y precipitación), cambios en la cobertura vegetal y modificaciones en la circulación atmosférica general (McDermott, 2004). Su crecimiento lento y continuo permite realizar reconstrucciones paleoclimáticas de alta resolución basadas en las variaciones de los isótopos estables (^{18}O y ^{13}C) de la calcita (Hendy, 1971), contextualizadas de manera precisa mediante un control cronológico, cada vez más eficiente, proporcionado por las series de desintegración de U-Th (Edwards *et al.*, 1986).

En el ámbito de la Península Ibérica existen trabajos elaborados recientemente, sobre la utilización de espeleotemas como indicadores paleoclimáticos (*ej.* Muñoz-García *et al.*, 2007; Domínguez-Villar *et al.*, 2008; Moreno *et al.*, 2010; Muñoz *et al.*, 2009). No obstante a escala regional, y concretamente en la Cordillera Pirenaica, la información disponible a este respecto resulta todavía escasa e insuficiente (Durán, 1989; López-Martínez y Freixes, 1989).

En este trabajo se analiza la información paleoclimática contenida en las formaciones estalagmíticas de la cueva de Sesó, localizada en el sector central surpirenaico. Concretamente, se pretende establecer una cronología absoluta mediante U/Th y determinar la composición isotópica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) de la calcita de los espeleotemas datados. Bartolomé *et al.* (2011) aportan los primeros datos relativos a la espeleogénesis de la cueva.

Área de estudio

La cueva estudiada se localiza en las proximidades del caserío de Sesó, perteneciente al municipio de Boltaña (provincia de Huesca) (Fig. 1). Las coordenadas UTM de la entrada de la cavidad son 31T 256674 E 4704903 N, y la altura es 825 m. El clima es de transición Mediterráneo-Oceánico, caracterizado por precipitaciones en torno a los 1000 mm/año y temperaturas medias anuales de 13°C. La cueva de Sesó se sitúa en el flanco oriental del anticlinal de Boltaña y se abre en los materiales calcáreos cuisienses de la Fm Boltaña (Soto y Casas, 2001) (Fig. 1a). Sobre este sustrato geológico se desarrollan suelos de tipo calcisol cámbico que soportan una cobertura vegetal, relativamente densa, de pino y matorral.

La cavidad presenta un desarrollo longitudinal de 326 m y un desnivel de 46 m

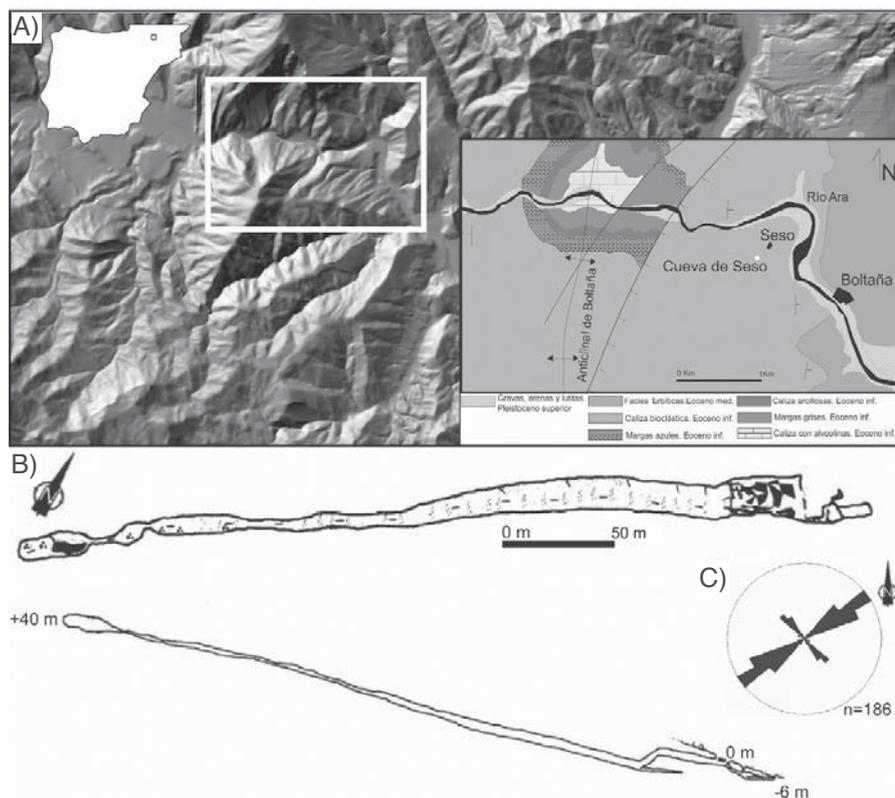


Fig. 1.- A) Situación geográfica y geológica de la cueva de Seso. B) Cartografía de la cavidad. C) Rosa de orientación de la red de fracturas del entorno.

Fig. 1.- A) Location and geologic setting of the Seso Cave. B) Cave mapping. C) Rose diagram of joints.

(Fig. 1) (Mas y Fuertes, 2007). Su geometría está directamente controlada por el buzamiento de la serie estratigráfica (20-25° E) y por el patrón de la fracturación (familia dominante de orientación 060-070 E) (Fig. 1B y C).

Materiales y metodología

El reconocimiento morfo-sedimentario de la cueva de Seso evidencia la presencia de depósitos internos clásticos (bloques desprendidos) y calcícticos (estalactitas, estalagmitas y gours) (Fig. 2A). Las relaciones espaciales entre los diferentes depósitos permiten identificar dos etapas de desarrollo estalagmítico. Se muestrearon seis estalagmitas correspondientes a la etapa más reciente (Seso-09-1, Seso-09-2, Seso-09-3, Seso-09-4, Seso-09-5 y Seso-09-6). Se trata de piezas cilíndricas de longitud decimétrica y diámetro centimétrico que fueron cortadas longitudinalmente. De las estalagmitas se extrajeron 24 muestras (100-200 mgr de carbonato) mediante un microtaladro, que fueron datadas a partir de series de desintegración de U/Th en la Universidad de Melbourne (Australia). Las relaciones de actividad se han determinado mediante ICP-MS-

MC (*parallel ion-counting multicollector*) (Hellstrom, 2003). Por otro lado, fueron extraídas 199 muestras destinadas al análisis de isotopos estables de $\delta^{18}O$ y $\delta^{13}C$. El muestreo se realizó siguiendo el eje de crecimiento con una resolución de 5 mm (Fig. 2B). También se practicó el Test de Hendy (Hendy, 1971) sobre 9 láminas correspondientes a 4 estalagmitas diferentes. Los análisis isotópicos de O y C se han realizado en el Servicio de

Espectrometría de masas de relación isotópica de la Universidad de Barcelona. Las concentraciones isotópicas se expresan como desviaciones en relación al PDB en tanto por mil.

Resultados

Datos cronológicos

Los resultados obtenidos de los análisis de U/Th (Tabla I) indican una alta fiabilidad de las edades resultantes. Tan solo algunas muestras de las estalagmitas Seso-09-3 y Seso-09-4 presentan errores mayores debidos al contenido de Th detrítico. Por otro lado, existe una buena consistencia entre edades obtenidas y posición estratigráfica de las muestras. Las dataciones realizadas sobre las estalagmitas indican edades del final del Pleistoceno superior (Younger Dryas) y el Holoceno. Su formación se produjo durante periodos cortos de tiempo (12,9-11,5 ka, 9,1-8,3 ka, 6,3-6,2 ka, 3,0-2,5 ka, 1,8-1,4 ka y 0,6-0,4 ka, respectivamente) interrumpidos por hiatos importantes. La fase de crecimiento más reciente aparece replicada en las estalagmitas Seso-09-2, Seso-09-3 y Seso-09-4.

Geoquímica isotópica

Los análisis isotópicos realizados apuntan hacia una clara diferenciación en función de las estalagmitas (Fig. 3). Así, la estalagmita Seso-09-06 presenta los valores más pesados de $\delta^{13}C$ y los más ligeros de $\delta^{18}O$. Por otro lado, los valores más ligeros de ^{13}C y los más pesados de $\delta^{18}O$, corresponden a la estalagmita Seso-09-1. Los tests de Hendy practicados indican que la precipitación de la calcita se produce en condiciones de equilibrio

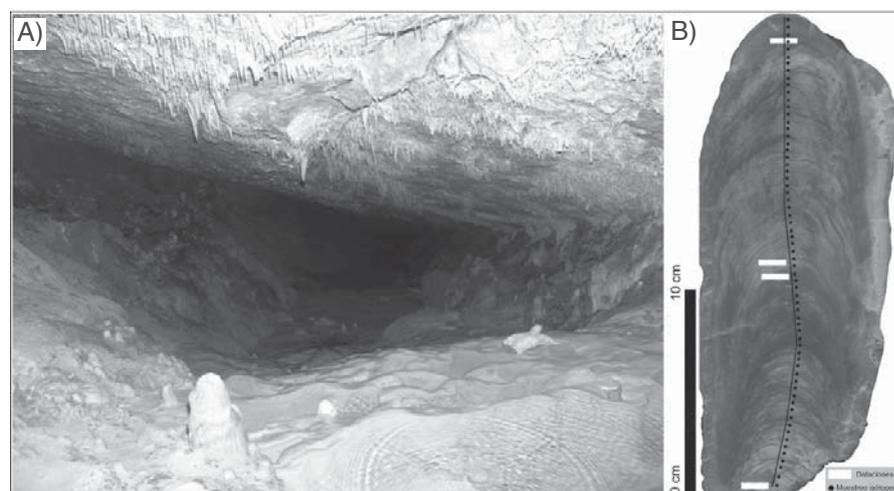


Fig. 2.- A) Sección transversal de la cueva de Seso y depósitos internos. B) Estalagmita Seso-09-1.

Fig. 2.- A) Cross-section of the Seso Cave and internal deposits. B) Stalagmite Seso-09-1.

Muestra	$[^{230}\text{Th}/^{238}\text{U}]$	$[^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]$	$[^{232}\text{Th}/^{238}\text{U}]$	$[^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}]$	Edad±ka	$[^{234}\text{U}/^{238}\text{U}]$
Cm desde la base	actividad	actividad	actividad	actividad	corregida	Inicial
SE-09-1 2cm	0,0384±05	1,4330±33	0,000243±00	157,9	2,946±0,041	1,4366±33
SE-09-1 11cm	0,0353±06	1,3994±28	0,000130±00	271,0	2,777±0,049	1,4026±29
SE-09-1 12cm	0,0339±06	1,3771±28	0,000255±00	132,6	2,701±0,050	1,3800±28
SE-09-1 23cm	0,0326±05	1,3995±25	0,000125±00	260,6	2,562±0,040	1,4024±25
SE-09-2 0cm	0,0886±05	1,5560±29	0,000176±00	504,6	6,369±0,039	1,5661±29
SE-09-2 6.5cm	0,0860±06	1,5479±35	0,000163±00	529,5	6,211±0,047	1,5576±35
SE-09-2 7cm	0,0861±06	1,5414±28	0,000099±00	869,8	6,250±0,046	1,5510±29
SE-09-2 13cm	0,0018±03	1,4296±27	0,000129±00	13,7	0,129±0,023	1,4298±27
SE-09-3 0cm	0,0227±04	1,3412±27	0,000291±00	78,2	1,842±0,035	1,3430±27
SE-09-3 5cm	0,0186±05	1,3588±26	0,000290±00	64,2	1,483±0,043	1,3603±26
SE-09-3 5.5cm	0,0058±10	1,3569±28	0,000270±01	21,6	0,448±0,08	1,3573±28
SE-09-3 10.5cm	0,0060±04	1,3547±27	0,002668±08	2,3	0,290±0,092	1,3550±27
SE-09-3 11.5cm	0,0057±04	1,3540±27	0,002791±08	2,0	0,258±0,096	1,3543±27
SE-09-3 14-14.5cm	0,0050±03	1,3579±27	0,002861±07	1,7	0,196±0,095	1,3581±27
SE-09-4 0cm	0,0090±04	1,3601±26	0,000613±02	14,7	0,681±0,037	1,3608±26
SE-09-4 5cm	0,0062±03	1,3551±28	0,000114±00	53,9	0,493±0,024	1,3556±28
SE-09-4 6cm	0,0087±04	1,3585±24	0,002067±07	4,2	0,551±0,074	1,3591±24
SE-09-4 11cm	0,0055±01	1,3574±25	0,000215±00	25,4	0,428±0,011	1,3578±25
SE-09-5 1cm	0,1170±09	1,4508±25	0,001189±05	98,4	9,064±0,082	1,4625±26
SE-09-5 25cm	0,1121±06	1,4663±29	0,000667±02	168,2	8,605±0,055	1,4778±29
SE-09-5 26cm	0,1150±06	1,5008±27	0,000633±02	181,5	8,627±0,053	1,5132±28
SE-09-5 30cm	0,1123±09	1,4973±34	0,001356±04	82,8	8,390±0,083	1,5093±34
SE-09-6 1cm	0,1649±17	1,4566±32	0,000939±02	175,6	12,977±0,150	1,4737±33
SE-09-6 15cm	0,1454±13	1,4253±28	0,001537±08	94,6	11,583±0,123	1,4395±28

Tabla I. Dataciones de U/Th de las estalagmitas de la cueva de Sesó.

Table I. U/Th data of stalagmites from the Sesó Cave.

isotópico o próximo a él. Los valores del coeficiente de determinación r^2 entre $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$ varían entre 0,37 y 0,57.

Interpretación y discusión

La primera fase reconocida (estalagmita Sesó-09-6), a partir del estudio de la etapa más reciente de estalagmitas de la cueva de Sesó (Bartolomé *et al.*, 2011), se correlaciona perfectamente con el Younger Dryas (13-11,5 ka BP) (Fig. 4). La evolución del $\delta^{18}\text{O}$ presenta una alta similitud con el sondeo de hielo GISP2 de Groenlandia (Grootes *et al.*, 1993) (Fig. 4). Esta evolución ha sido observada en otros registros espeleotémicos del YD a escala global (Vacca *et al.*, 2005). El descenso de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ puede asociarse con el predominio de aguas pobres en $\delta^{18}\text{O}$ procedentes de la deglaciación en la superficie oceánica (Broeker *et al.*, 2010) o con un descenso general de las temperaturas atmosféricas (Spötl y Mangini, 2002). Los valores de $\delta^{13}\text{C}$ aparecen controlados por la disponibilidad hídrica (Hendy, 1971), de manera que se observa una deri-

va desde condiciones de mayor a menor aridez. En la Península Ibérica, el Younger Dryas ha sido ampliamente reconocido en registros de diversa naturaleza y presenta una tendencia hacia condiciones frías y relativamente áridas (Cacho *et al.*, 2010).

La siguiente fase de desarrollo estalagmítico (9,1-8,3 ka) (Fig. 4) coincide con el inicio del Óptimo Climático Holoceno de tendencia húmeda a escala regional (Morellón *et al.*, 2009) y queda próxima al evento global 8.2 de tendencia fría y árida.

La parte inferior de la estalagmita Sesó-09-2 corresponde a un corto período de tiempo (6,3-6,2 ka) (Fig. 4) incluido en el Óptimo Climático Holoceno (Morellón *et al.*, 2009). La parte superior termina de crecer hace 0.2 ka, de manera que su desarrollo coincide con la Pequeña Edad del Hielo.

Una nueva fase de desarrollo estalagmítico aparece registrada en la estalagmita Se-09-1 (3,0-2,5 ka) (Fig. 4) que parece coincidir con la Época Fría del Hierro bien documentada a escala regional (Gutiérrez y Peña, 1998).

La estalagmita Se-09-3 se desarrolla entre 1,8 y 1,4 ka (Fig. 4) y coincide parcial-

mente con el Período Húmedo Ibero-Romano (Martín-Puertas *et al.*, 2009), y finaliza con el inicio de la Anomalía Climática Medieval (Morellón *et al.*, 2009).

La última fase de crecimiento estalagmítico (0,6-0,2 ka) (Fig. 4) aparece replicada en las estalagmitas Sesó-09-4 y en la parte superior de la estalagmita Sesó-09-03. También se registra en la estalagmita Sesó-09-2, tal y como se ha indicado previamente. Evidentemente, esta fase coincide con la Pequeña Edad del Hielo. En general, se trata de una etapa con descenso de las temperaturas pero con una mayor disponibilidad hídrica asociada a una menor evaporación (Morellón *et al.*, 2009) o al incremento de lluvias durante el invierno (Cacho *et al.*, 2010).

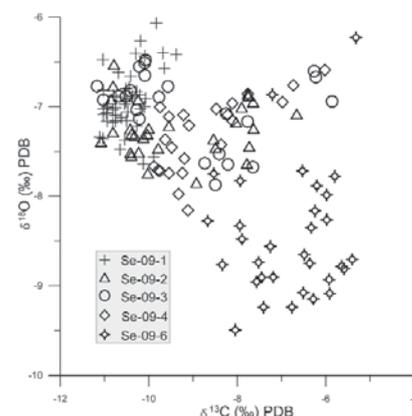


Fig. 3.- Valores isotópicos de las estalagmitas de la cueva de Sesó.

Fig. 3.- Stable-isotope composition of stalagmites from the Sesó Cave.

Conclusiones

El estudio cronológico e isotópico de seis estalagmitas de la Cueva de Sesó ha permitido identificar la variabilidad climática durante el final del Pleistoceno superior-Holoceno en el sector central surpirenaico. Las conclusiones más relevantes son:

Las dataciones mediante series de desintegración de U/Th permiten diferenciar seis fases de crecimientos: 12,9-11,5 ka, 9,1-8,3 ka, 6,3-6,2 ka, 3,0-2,5 ka, 1,8-1,4 ka y 0,6-0,4 ka, respectivamente.

Se trata de fases cortas de desarrollo estalagmítico que coinciden, básicamente, con momentos de tendencia fría y/o húmeda, a escalas global y regional, incluyendo el Younger Dryas, Óptimo Climático Holoceno, Época Fría del Hierro, Período Húmedo Ibero-Romano y Pequeña Edad de Hielo.

Los análisis de isótopos estables de la calca estalagmítica ($\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^{13}\text{C}$) indican que durante el Younger Dryas (12,9-11,5 ka)

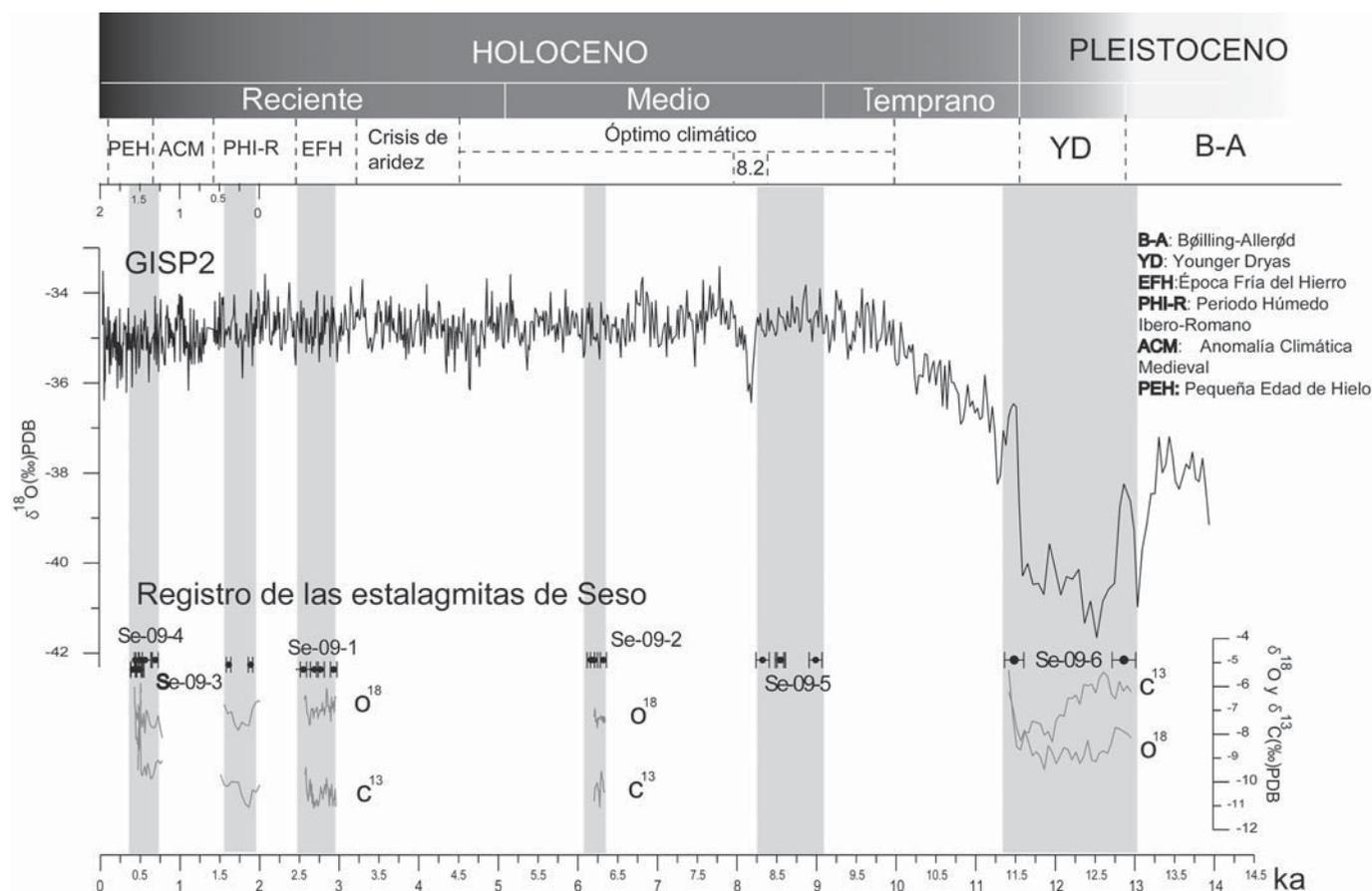


Fig. 4.- Posición cronológica y valores isotópicos de las estalagmitas de la cueva de Sesó en relación con el registro isotópico del sondeo de hielo GISP2 (Grootes *et al.*, 1993).

Fig. 4.- Chronological location and stable-isotope composition of the stalagmites from the Sesó Cave in relation to the GISP2 isotope record (Grootes *et al.*, 1993).

las condiciones paleoambientales eran de menor temperatura y menor disponibilidad hídrica que durante las fases holocenas.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución de los Proyectos GA-LC-021/2008, CGL2009-10455/BTE, CGL2010-16376 (HIDROPAST) y CDS20007-00067 (GRACCIE CONSOLIDER) y de los Grupos de Investigación Geomorfología y Cambio Global y PaleoQ del Gobierno de Aragón. Agradecemos la ayuda económica del Geoparque del Sobrarbe y la colaboración de Beatriz Bueno y Aida Adsuar (IPE-CSIC) en la preparación de muestras y de Joaquín Perona e Isabel Cacho en los análisis isotópicos.

Los autores agradecen los comentarios de los Dres. Jerónimo López-Martínez y David Domínguez-Villar.

Referencias

- Bartolomé, M., Sancho, C., Moreno, A., Belmonte, A., Muñoz, A. y Osácar, M.C. (2011). En: *XIII Reunión Nacional de Cuaternario*, 151-153. Andorra.
- Broecker, W.S., Denton, G.H., Edwards, R.L., Cheng, H., Alley, R.B. y Putnam, A.E. (2010). *Quaternary Science Reviews*, 29, 1078-1081.
- Cacho, I., Valero-Garcés, B. y González-Sampériz, P. (2010). En: *Climate in Spain: Past, present and future* (P.F. Fiz y R. Boscolo, Eds.), 9-24.
- Domínguez-Villar, D., Wang, X.F., Cheng, H., Martín-Chivelet, J. y Edwards, R.L. (2008). *Quaternary International*, 187, 40-51.
- Durán, J.J. (1989). En: *El karst en España*. S.E.G. Monografía, 4, 243-256.
- Edwards, R.L., Chen, J.H. y Wasserburg, G.J. (1986). *Earth and Planetary Science Letters*, 81, 175-192.
- Grootes, P.M., Stuiver, M., White, J.W.C., Johnsen, S. y Jouzel, J. (1993). *Nature*, 366, 552-554.
- Gutiérrez, M. y Peña, J.L. (1998). *Geomorphology*, 23, 205-217.
- Hellstrom, J. (2003). *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, 18, 1346-1351.
- Hendy, C. (1971). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35, 801-824.
- López-Martínez, J. y Freixes, A. (1989). *El karst en España*. S.E.G. Monografía, 4, 131-144.
- Martín-Puertas, C., Valero-Garcés, B. L., Brauer, A., Mata, M. P., Delgado-Huertas, A. y Dulski, P. (2009). *Quaternary Research*, 71, 108-120.
- Mas, J. y Fuertes, X. (2007). *CIJA de Teruel*, 2, 30-32.
- McDermott, F. (2004). *Quaternary Science Reviews*, 23, 901-918.
- Morellón, M., Valero-Garcés, B., Vegas, T., González-Sampériz, P., Delgado-Huertas, A., Mata, P., Moreno, A., Rico, M. y Corella, J.P. (2009). *Quaternary Science Reviews*, 28, 2582-2599.
- Moreno, A., Stoll, H., Jiménez-Sánchez, M., Cacho, I., Valero-Garcés, B., Ito, E. y Edwards, L.R. (2010). *Global and Planetary Change*, 71, 218-231.
- Muñoz, A., Sen, K., Sancho, C. y Genty, D. (2009). *Journal of Cave and Karst Studies*, 71, 63-72.
- Muñoz-García, M.B., Martín-Chivelet, J., Rossi, C., Ford, D.C. y Schwarcz, H.P. (2007). *Journal of Iberian Geology*, 33, 17-30.
- Soto, R. y Casas, A.M. (2001). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 14, 199-211.
- Spötl, C. y Mangini, A. (2002). *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 507-518.
- Vacco, D.A., Clark, P.U., Mix, A.C., Cheng, H. y Edwards, L. (2005). *Quaternary Research*, 64, 249-256.