

El registro altitudinal de cambio climático en series kársticas pleistocenas de las Béticas occidentales

Evidence of climate change at different altitudes within the karstic regions of the western Betic Range during the Late Pleistocene

J. Rodríguez-Vidal¹, L.M. Cáceres¹, A. Martínez-Aguirre², J.M. Alcaraz³, C. Finlayson⁴,
G. Finlayson⁴ y D. Fa⁴

- 1 Universidad de Huelva, Dep. Geodinámica y Paleontología, Campus del Carmen, 21071 Huelva. jrvidal@uhu.es, mcaceres@uhu.es
- 2 Universidad de Sevilla, Dep. Física Aplicada I, EUITA, ctra. Utrera, km 1, 41013 Sevilla. arancha@us.es
- 3 Universidad de Córdoba, Dep. Física, Facultad de Ciencias, Campus de Rabanales, 14071 Córdoba. fa1alpej@uco.es
- 4 Gibraltar Museum, 18-20 Bomb House Lane, Gibraltar. jcfinlay@gibraltar.gi, gfjmh@gibraltar.gi, darrenfa@gibraltar.gi

Resumen: La comparación temporal de edades de espeleotemas en dos zonas kársticas de la Cordillera Bética, de muy diferente altitud e igual longitud (meridiano), como la Sierra de Grazalema y el Peñón de Gibraltar, ponen en evidencia la correlación de los óptimos climáticos (OIS 3 y 5) con fases de precipitación química. Los estadios fríos (OIS 2 y 4) con espeleotemas están peor representados a elevadas altitudes, al contrario que sucede en la costa, que se configura como refugio climático en estos estadios. La ausencia de espeleotemas costeros sólo se observa en los momentos más secos y fríos del estadio 2, con tres marcados y cortos períodos (30-27,5 ka, 26-24 ka y 20-16,5 ka BP). No disponemos de registro de dataciones de los últimos 10 ka.

Palabras clave: espeleotema, karst, cambio climático, Pleistoceno, Cordillera Bética.

Abstract: *This study compares the dates of speleothems from two karstic sites in the Betic Range, which are very different in altitude but from similar longitudes (Grazalema Mountains and the Rock of Gibraltar), and shows a correlation between the climatic optimals (OIS 3 and 5) in periods of high chemical precipitation. The cold stages (OIS 2 and 4) with speleothems are worst represented at higher altitudes, whilst the contrary is true on the coastal site which comes across as a climatic refugium during this time. Coastal speleothem record are only absent during dryer and colder moments of Stage 2, within three short, marked periods (30-27.5 ky, 26-24 ky and 20-16.5 ky BP). There are no dates recorded for the last 10 ky.*

Key words: *speleothem, karst, climate change, Pleistocene, Betic Range.*

INTRODUCCIÓN

Los registros paleoclimáticos cuaternarios despiertan un marcado interés dentro de las Geociencias, ya que guardan la historia ambiental de los tiempos geológicos recientes, instrumento básico para la comprensión del cambio climático futuro.

El relieve mediterráneo, básicamente de la montaña media calcárea, conserva sus mejores registros en algunas zonas lacustres/palustres controladas por la tectónica (p.e. Padúl, en Granada), en las grandes zonas endorreicas kársticas (p.e. polje de Zafarraya) y en los múltiples depósitos de relleno de cuevas y edificios travertínicos (Durán, 1996); junto con series más discontinuas de medios fluviales y costeros.

De todas formas, el registro temporalmente más preciso, de eventos cuaternarios, procede de los testigos extraídos en fondos marinos próximos, como el Mar de Alborán (Martrat *et al.*, 2004); aunque no deben ser utilizados directamente para ciertas correlaciones regionales (Jiménez-Espejo *et al.*, 2007), sobre todo en lo relativo a las secuencias polínicas.

Los depósitos endokársticos, de naturaleza y génesis variada, suelen almacenar una información de alto valor interpretativo, tanto cronológico (Rodríguez-Vidal *et al.*, 1999), climático-ecológico (Finlayson *et al.*, en prensa), como de poblamiento humano (Finlayson *et al.*, 2006).

Las publicaciones sobre series continuas en espeleotemas no son frecuente en la bibliografía del Mediterráneo, aunque los trabajos hasta ahora realizados (Maire, 1990) ponen en evidencia una concordancia del dominio de fases de precipitación química con los estadios isotópicos impares (cálidos), aunque con ciertos desajustes regionales (Durán, 1996).

El trabajo que aquí presentamos es el resultado sintético, con multitud de datos no publicados e ideas inéditas, de varios años de investigaciones en las zonas kársticas de la Sierra de Grazalema y del Peñón de Gibraltar. Las dataciones y datos principales de la primera zona han sido publicados en su casi totalidad (Rodríguez-Vidal *et al.*, 1999), pero los de Gibraltar, sobre todo la mayor parte de las dataciones, aún permanecen inéditas y son presentados en este trabajo de forma sintética.

MARCO GEOLÓGICO

La zona donde se ha realizado este trabajo se localiza en el extremo más occidental de la Cordillera Bética, en dos afloramientos calcáreos de la Zona Subbética (Fig. 1: Sierra del Endrinal en Grazalema y Peñón de Gibraltar). Los materiales son calizas y dolomías jurásicas en su mayor extensión, con escasa representación del Cretácico. La estructura geológica que presentan es aparentemente sencilla, con pliegues suaves de cobertera, anticlinales y sinclinales, orientados de N-S a NE-SO, vergencia S y recorrido kilométrico. Dichos pliegues quedan fuertemente trastocados e interrumpidos por fracturas tardías que dieron lugar a fallas de desgarre, con funcionamiento posterior en falla normal y reajuste de bloques en la vertical.

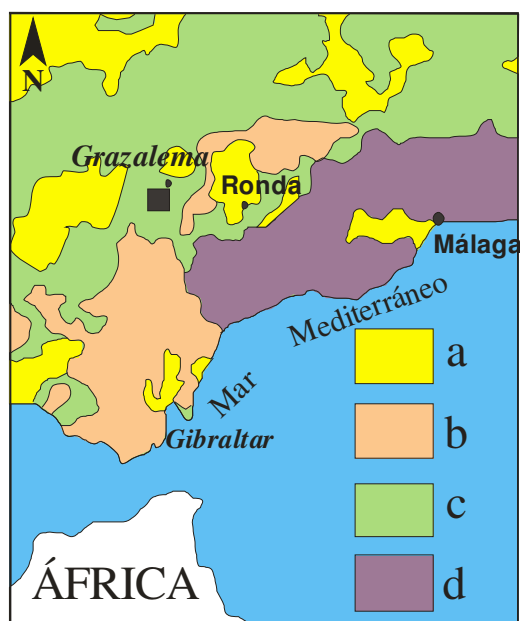


FIGURA 1. Localización geológica de la Sierra del Endrinal (cuadrado negro) en Grazalema y del Peñón de Gibraltar. Leyenda: a. Sedimentos neógenos y cuaternarios. b. Unidad Surco de Flysch. c. Subbético. d. Dominio de Alborán.

REGISTRO SEDIMENTARIO

Los afloramientos kársticos pertenecen a la Sierra del Endrinal, en las inmediaciones de Grazalema, y al Peñón de Gibraltar; ambos localizados casi en la misma longitud ($\sim 5^{\circ} 20' W$) pero a altitudes distintas, entre 1500-1200m y 400-0m respectivamente, y a unos 60 km de distancia entre sí. Las precipitaciones y temperaturas medias anuales fluctúan en la actualidad entre 2200 mm / 16°C en Grazalema y 850 mm / 17°C en Gibraltar.

Sierra del Endrinal

Los espeleotemas fechados proceden de trabajos previos (Rodríguez-Vidal *et al.*, 1999) que se realizaron para evaluar las fases de evolución cuaternaria de este karst de montaña. Son once muestras aisladas (Fig. 2), pero situadas en un contexto geomorfológico evolutivo, y localizadas en las altas plataformas calizas entre 1200 y 1450 m de altitud. La cartografía geomorfológica y las fechas de los espeleotemas han servido para establecer

los episodios principales de precipitación química y de erosión mecánica durante los últimos 250 ka.

Los episodios de formación de espeleotemas, entre 30-50 ka, 90-150 ka y 230-270 ka, se han centrado en estadios isotópicos básicamente cálidos, como son OIS 3, 5 y 7, y tránsito 6/5. Durante los episodios intermedios (OIS 2, 4 y 6) han dominado los procesos de arroyada y gelivación, así como los movimientos de ladera.

En la actualidad, la ablación de las superficies desnudas es muy elevada, con medidas entre 65 y 95 mm/milenio en la Sierra del Endrinal y de 50-60 mm/milenio en el resto de la Sierra de Grazalema (Delannoy y Díaz del Olmo, 1986). Esta corrosión es cinco veces mayor en la estación húmeda que durante el resto del año. El factor "precipitación" es, por tanto, fundamental en la dinámica kárstica actual y pasada de la media-alta montaña mediterránea.

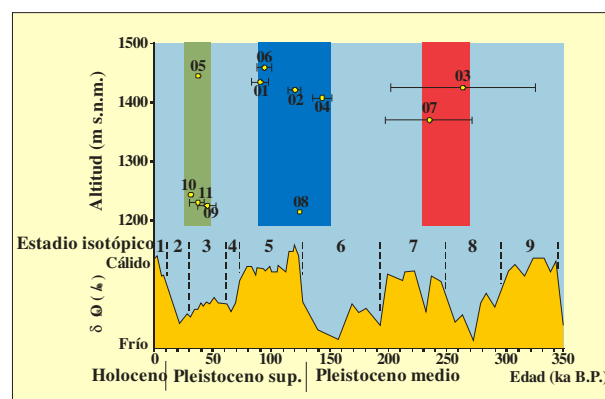


FIGURA 2. Localización altitudinal y temporal de las muestras de espeleotemas (círculos amarillos) datadas por series de Uranio; los segmentos indican el rango de error. Las bandas de colores muestran periodos de ocurrencia de espeleotemas. Estadios y curva isotópica del oxígeno de sondeos oceánicos profundos.

Peñón de Gibraltar

El Peñón de Gibraltar es una pequeña península rocosa de unos 6 km² de superficie, alargada en dirección meridiana unos 5,2 km y de 1,6 km de ancho, con perfil asimétrico, acantilado al este y más tendido al oeste.

El gran número de cuevas y oquedades (hasta 140 catalogadas), de origen kárstico y marino, han servido como almacén de sedimentos detríticos y químicos, representativos de todo el Cuaternario. La elevación tectónica de las unidades morfosedimentarias configura un modelo de "acantilado compuesto", formado por varios escalones morfotectónicos (Rodríguez-Vidal *et al.*, 2004).

El escalón inferior, a menor cota (< 30 m s.n.m.), posee gran cantidad de cuevas marinas rellenas de sedimentos detríticos eólicos, marinos, de ladera y kársticos, con frecuentes intercalaciones de espeleotemas y abundantes evidencias de ocupación humana (Finlayson *et al.*, 2006). La interpretación paleoambiental (Finlayson *et al.*, en prensa) se ha centrado en el registro sedimentario más reciente (OIS 2), resultado de las excavaciones arqueológicas en

Gorham's Cave desde 1991, que tiene un espesor estratigráfico de 18 m y cuya historia sedimentaria se inició a comienzos del estadio isotópico 5 (~125 ka).

La génesis de los espeleotemas datados en Gibraltar tiene un origen muy diverso y se extiende a los últimos 300 ka, aunque las características geomorfológicas y estratigráficas demuestran que existen espeleotemas bastante más antiguos.



FIGURA 3. Sección estratigráfica de coladas estalagmíticas, en la entrada de Martin's Cave, buzando hacia el interior de la cavidad (izquierda) y reposando discordantemente sobre eolianitas. La superficie discordante se marca por la base de apoyo del martillo.

Los diversos estudios que estamos realizando en Gibraltar desde 1995, publicados (Rodríguez-Vidal *et al.*, 2004) y no publicados, aportan un bagaje de 35 dataciones de Th/U (Fig. 4), por espectrometría alfa, que hemos utilizado para este trabajo.

Las series continuas de espeleotemas se localizan en las entradas de las cuevas de St. Michael's Cave y Martin's Cave (Fig. 4), a 300 y 180 m de altitud y en la fachada oeste y este, respectivamente. Las edades de series discontinuas y aisladas responden a dataciones que se hicieron para resolver problemas estratigráficos locales o circunstancias puntuales, la mayor parte de ellas aun sin publicar. Las localizaciones y altitudes de estas últimas muestras se sitúan en Bray's Cave (300 m), Beefsteak Cave (65 m), Forbes' Quarry (9-17 m), Vanguard Cave (0-6 m) y Rosia Bay (0-3 m).

En la entrada de St. Michael's Cave, durante las labores de apertura al público para su visita, se realizó un ensanche que ofrece una sección estratigráfica de espeleotemas variados, cuya secuencia de edades está comprendida entre 151 y 41 ka, con una superficie intermedia de no-depósito, entre 70 y 54 ka (tránsito estadios 4 a 3). Martin's Cave tiene en su entrada una colada de suelo (Fig. 3), con un espesor máximo de 150 cm, que de forma continuada se depositó entre 108 y 42 ka. Ambas secciones estratigráficas de depósitos químicos se solapan temporalmente y parecen ofrecer un período continuado de clima favorable a su génesis entre ~150 y 40 ka (Fig. 4).

El registro de edades más antiguas de 180 ka no se ha incluido en la figura 4, ya que su rango de error es muy elevado.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Los dos afloramientos kársticos estudiados son litológica y estructuralmente semejantes, situados en el mismo meridiano y con secuencias de espeleotemas que han debido reflejar las mismas alternancias climáticas regionales. La distinta altitud, gradiente pluviométrico y efectos climáticos locales, han debido de marcar las pautas diferenciales entre ambos.

Durante el Pleistoceno Superior, las fases de formación de espeleotemas en la Sierra del Endrinal y Gibraltar (Fig. 4) se localizan temporalmente en los estadios isotópicos cálidos (OIS 3 y 5), con desviaciones hacia el final del estadio 6.

Entre 90 y 50 ka (OIS 4 y tránsito al 3 y al 5) los espeleotemas no se depositaron en Grazalema, pero sí en Gibraltar; posiblemente por la aridez fría en altitud, con dominio de la gelivación (Delannoy y Díaz del Olmo, 1986), mientras que en el litoral mediterráneo las temperaturas eran más benignas. Algo semejante debió suceder durante OIS 2, con ausencia de espeleotemas en altitud y abundancia en la costa.

El registro paleoclimático en el estadio 2 es más rico y variado en el Mediterráneo occidental. Los bruscos cambios climáticos acaecidos en latitudes altas, parece que no llegaron a alcanzar estas latitudes medias, que se constituyeron como un refugio bioclimático (Finlayson *et al.*, en prensa). Así parece también quedar reflejado en los espeleotemas de Gibraltar, con eventos alternos de depósito y no-depósito (lapsos A, B y C de la Fig. 4).

Bout-Roumazeille *et al.* (2007), en registros marinos del Mar de Alborán (ODP Site 976), establecen fuertes relaciones entre los eventos fríos del Atlántico Norte y los cambios climáticos del Mediterráneo occidental. En relación con nuestro registro de Gibraltar, de fases de no depósito químico (C, B, y A de la Fig. 4, entre 30-27,5 ka, 26-24 ka y 20-16,5 ka BP, respectivamente), parece que la mayor correlación se establece con los períodos de baja precipitación anual, más que con los máximos de baja temperatura, con descensos de entre 200 y 400 mm/año respecto a la media actual.

Las investigaciones de Finlayson *et al.* (en prensa), basada en la correlación de los bioclimas regionales actuales con los registros en Gorham's Cave, indican que durante el Último Máximo Glacial (LGM) los parámetros climáticos fueron muy parecidos a los actuales, con una tendencia hacia episodios de mayor aridez y de temperaturas invernales más bajas. La temperatura media anual oscilaba entre 13 y 19°C (16-19°C actualmente) y la precipitación anual era de 350 a 1000 mm/año (600-1000 mm/año en la actualidad). Estos datos ofrecen un panorama de Gibraltar, y su entorno, como refugio bioclimático durante los momentos más fríos del OIS 2.

El factor "precipitación" viene a confirmarse así como fundamental en la génesis de la formación de espeleotemas, más que la temperatura; aunque las épocas de temperaturas invernales bajas favorecieron más la gelivación que la alteración química de la roca.

De ahí que los registros de la Sierra del Endrinal sean discontinuos (OIS 4 y 2) y los de Gibraltar casi continuos. La discontinuidad de los registros de Gibraltar, durante el estadio isotópico 2, se debió muy probablemente a su disimetría pluviométrica, provocada por la brusca elevación topográfica junto al mar y los vientos húmedos de Levante. Esta fachada oriental ha

sido siempre más húmeda, por las nubes topográficas, y eso tal vez ha facilitado una perduración temporal más dilatada de la meteorización química en la vertiente este que en la oeste, tal como indica el registro de espeleotemas en sus cuevas y abrigos (Martin's Cave y Forbes' Quarry).

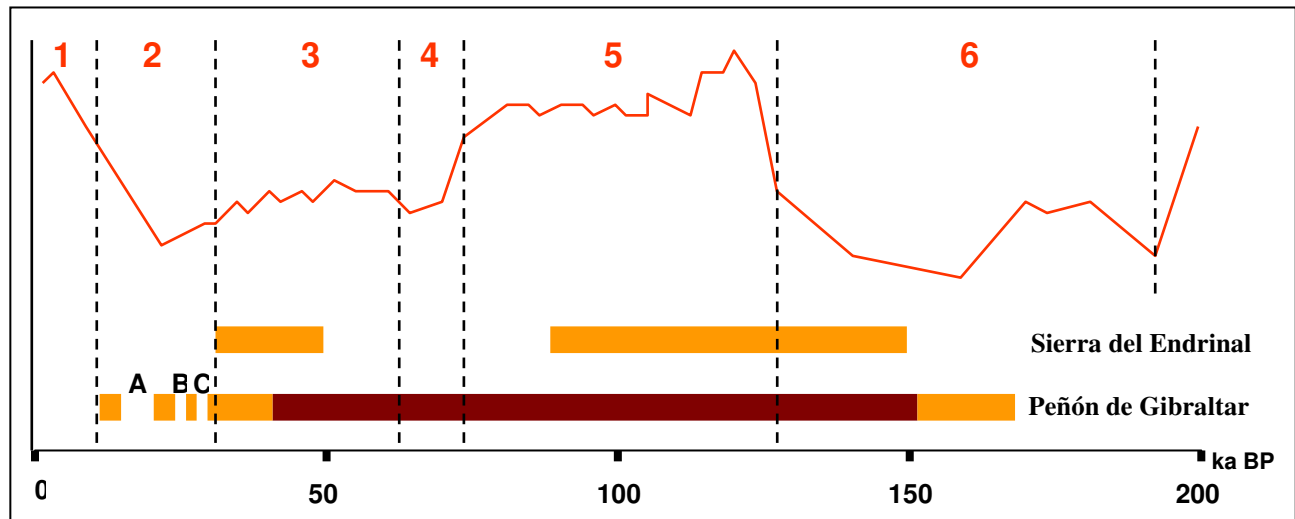


FIGURA 4. Secuencias de edades (series de Uranio) de espeleotemas estudiados en la Sierra del Endrinal (Grazalema) y en el Peñón de Gibraltar. Las barras de color marrón oscuro representan series estratigráficas continuas, las de color marrón claro son múltiples edades aisladas con su límite de error incluído, las letras en negro (A, B, C) son periodos sin registro de espeleotemas en Gibraltar. La curva en rojo es una síntesis de la secuencia de isotopos de oxígeno con los estadios isotópicos de los últimos 200 ka.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la ayuda prestada por todos aquellos compañeros que, durante muchos años, han colaborado en los trabajos de campo y logística. La financiación más reciente corresponde al proyecto europeo PaleoMed (Medoc Interreg IIIB: 2002-02-4.1-U-048) y al proyecto español CGL2006-01412/BTE del Ministerio de Educación y Ciencia.

REFERENCIAS

- Bout-Roumazeille, V., Combourieu Nebout, N., Peyron, O., Cortijo, E., Landai, A., Masson-Delmotte, V. (2007). Connection between South Mediterranean climate and North African atmospheric circulation during the last 50,000 yr BP North Atlantic cold events. *Quaternary Science Reviews*, 26, 3197–3215.
- Delannoy, J.J. y Díaz del Olmo, F. (1986). La Serranía de Grazalema (Málaga-Cádiz). *Karstologia Mémoires*, 1, 54-70.
- Durán, J.J. (1996). *Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga y su evolución: contribución al conocimiento paleoclimático del Cuaternario en el Mediterráneo Occidental*. Tesis Doctoral. Univ. Complutense de Madrid. 409 p.
- Finlayson, C., Giles Pacheco, F., Rodríguez-Vidal, J., et al. (2006). Late survival of Neanderthals at the southernmost extreme of Europe. *Nature*, 443, 850-853.
- Finlayson, G., Finlayson, C., Giles Pacheco, F., Rodríguez-Vidal, J., Carrión, J. S. y Recio Espejo, J. M. (en prensa). Caves as archives of ecological and climatic changes in the Pleistocene – the case of Gorham's Cave, Gibraltar. *Quaternary International* doi:10.1016/j.quaint.2007.01.009
- Jiménez-Espejo, F.J., Martínez-Ruiz, F., Finlayson, C., Paytan, A., Sakamoto, T., Ortega-Huertas, M., Finlayson, G., Iijima, K., Gallego-Torres, D., y Fa, D. (2007). Climate forcing and Neanderthal extinction in Southern Iberia: insights from a multiproxy marine record. *Quaternary Science Reviews*, 26, 836–852.
- Maire, R. (1990). La haute montagne calcaire. *Karstologia Mémoires*, 3, 73 pp.
- Martrat, B., Grimalt, J.O., Lopez-Martinez, C., Cacho, I., Sierro, F.J., Flores, J.A., Zahn, R., Canals, M., Curtis, J.H. y Hodell, D.A. (2004). Abrupt temperature changes in the Western Mediterranean over the past 250,000 years. *Science*, 306, 1762-1765.
- Rodríguez-Vidal, J., Alvarez, G., Cáceres, L.M., Martínez-Aguirre, A. y Alcaraz, J.M. (1999). Morfogénesis y fases de karstificación cuaternarias en la sierra del Endrinal (Grazalema, Cádiz). *Cuaternario y Geomorfología*, 13, 7-17.
- Rodríguez-Vidal, J., Cáceres, L.M., Finlayson, C., Gracia, F.J. y Martínez-Aguirre, A. (2004). Neotectonics and shoreline history of the Rock of Gibraltar, southern Iberia. *Quaternary Science Reviews*, 23, 2017-2029.