

# Ciclicidad en espeleotemas: ¿qué señales climáticas registran?

J. J. Durán<sup>(1)</sup>, E. Pardo-Igúzquiza<sup>(1)</sup>, P. A. Robledo<sup>(2)</sup> y J. López-Martínez<sup>(3)</sup>

(1) Instituto Geológico y Minero de España (IGME). Ríos Rosas 23, 28003 Madrid, España  
jj.duran@igme.es; e.pardo@igme.es

(2) Unidad del IGME en Palma de Mallorca, Ciudad de Querétaro, s/n, 07007 Palma de Mallorca, España  
pa.robledo@igme.es

(3) Departamento de Geología y Geoquímica, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, 28049 Madrid, España  
jeronimo.lopez@uam.es

## RESUMEN

El interés por los espeleotemas como archivos de información paleoclimática continental ha crecido significativamente en las últimas décadas. Gracias a los avances en las técnicas de datación absoluta se han generado valiosas series temporales de *proxies* climáticos con un amplio rango de resolución temporal. Una de las características más importantes de la variabilidad natural del clima es su carácter cíclico, cuya impronta ha quedado reflejada en las series temporales obtenidas a partir de muestras tomadas sistemáticamente en espeleotemas. Sin embargo, dichas señales cíclicas de origen climático están mezcladas y difuminadas por la presencia de "ruido", que condiciona la génesis de los espeleotemas. Con el objetivo de detectar estas señales climáticas de fondo, en este trabajo se ha aplicado el análisis espectral a los datos procedentes de diversos estudios previos llevados a cabo por diferentes autores en 22 espeleotemas obtenidos en cuevas repartidas por todo el planeta. Dado que los datos suelen tener un interespaciado no constante, se ha utilizado el periodograma de Lomb-Scargle para la estimación de la potencia espectral y se ha aplicado el test de permutación para obtener la significación estadística de los ciclos observados en el espectro de potencia. Se ha puesto de manifiesto que los espeleotemas han registrado los mismos tipos de ciclos que se obtienen con el análisis de otros *proxies* paleoclimáticos. Esta característica, junto con su amplia distribución geográfica, los convierten en excelentes registros para estudios ambientales del pasado geológico reciente en ámbitos continentales.

Palabras clave: análisis espectral, isótopos estables, karst, paleoclima

## ***Cyclicity in speleothems: what climatic signals do they reveal?***

### ABSTRACT

*Interest in studying speleothems as archives of palaeoclimatic information has grown considerably during recent years. Thanks to modern absolute-dating techniques, valuable time series of climate proxies have been generated. One of the most important characteristics of the natural variability of the climate is its cyclic character, the fingerprint of which is to be found in the sequences obtained from the systematic sampling of certain types of speleothem. Nevertheless, the climatic cyclic signals tend to be embedded in the "noise" intrinsically involved in the genesis of the speleothems. To detect these background cyclic climatic signals we have applied spectral analyses to the data compiled by various different authors concerning 22 proxies from speleothems found in caves in 18 countries in five continents. Due to the fact that the the sampling intervals of the sequences measured in the speleothems are uneven we used the Lomb-Scargle periodogram to estimate the different power spectra and the permutation test to estimate the confidence level of the spectral peaks found in the spectra. We conclude that the speleothems record the same kind of cycles that have been obtained from other types of continental and marine deposits. This fact, together with their world-wide distribution, makes the speleothems excellent registers for environmental studies of the geological past in continental settings. It is hoped that the integration of speleothems into palaeoclimatic studies will help to further our understanding of the future evolution of our climate.*

*Key words: karst, paleoclimate, spectral analysis, stable isotopes*

## ABRIDGED ENGLISH VERSION

**Introduction**

Speleothems are precipitated chemical deposits that develop inside karstic cavities. They provide invaluable sources of information about past environmental and climatic conditions at the sites where the caves are located and are very important because the sequences of past conditions they contain are continuous in a similar way to those found in ice cores or cores from deep-sea drilling ventures. Furthermore, they inform of continental palaeoclimatic conditions, records of which are scarce compared to marine records. The most widely used type of speleothem for these kinds of study are stalagmites because of the simplicity of their structure, which renders them very suitable for sampling across their mid axis, where their banded structure can be seen very clearly. A proxy variable can then be measured and by applying an absolute-dating technique a typical time series generated. The most frequently used proxies are stable isotopes of oxygen and carbon, the thickness of the carbonate bands, colour (gray scale), optical luminescence density and abundance of trace elements (Sr, Ba, P etc.). Thanks to absolute-dating techniques it has been possible to obtain sequences with different kinds of sampling resolutions and for different time spans. Because of the wide range of time scales that can be represented in a speleothem, the fundamental question that emerges is: what kind of climatic signals do they register? To answer this question we have taken a given number of speleothems from all around the world and conducted a spectral analysis in order to reveal climatic cycles that are usually embedded in noise, because every cave is a complex environment with many factors influencing the growth of the speleothems.

**Method**

We chose 22 speleothems from 22 caves located in 18 different countries in the five inhabited continents (Table 1 and Figure 1). In all cases but one the speleothems are stalagmites that grew within the vadose zone. The one exception is a flowstone generated in phreatic conditions. The shortest record represents five years (1,000-995 BP) in Cold Water cave (Iowa, USA); it is, however, the time series providing most data ( $n = 3,525$ ) and with the shortest sampling interval:  $\Delta x = 0.0014$  years, i.e. around 12 hours. Furthermore, it is the only speleothem the measured proxy of which is the optical density of luminescence. The longest time interval represented, on the other hand, is one of 564,000 years, in Devil's Hole cave (from 568,000 to 4,500 years BP), although it only contains 444 data, so with a sampling interval of 1,271 years. The next longest record is the speleothem in Kesang cave in China, with 500,000 years, 4,491 data and a sampling interval of around 300 years. Between the shortest and the longest records there is a wide range of possibilities (Table 1).

As far as the type of proxies is concerned, 17 are stable oxygen isotopes, one is the stable carbon isotope, three are the thickness of carbonate bands and one is the optical density of luminescence (for typical sequences see Figure 2). We analysed the sequences to discover whether there are cyclic components which are typical of known external climate forcing. Due to the fact that the sampling interval of the sequences measured in the speleothems are uneven, we used the Lomb-Scargle periodogram to estimate the different power spectra. The reasons for the unevenness of the samplings are varied: missing or unanalysed data, hiatuses, non-linear speleothem growth and so on. The Lomb-Scargle periodogram avoids interpolation and works directly with the uneven sequence (Pardo-Igúzquiza and Rodríguez-Tovar, 2012). The permutation test (Pardo-Igúzquiza and Rodríguez-Tovar, 2010) was used to assess the statistical significance of the peaks in the power spectra.

**Results**

The sequence with the highest time resolution is the optical density of luminescence series from a stalagmite in Cold Water cave (Stoykova et al., 2008) in Iowa (USA). The power spectrum may be seen in Figure 3A, where the cycles of 1 lunar day, 2 days, 4 days, 2 weeks and 27 days (one lunar month) as well as the lunar year have been identified as significant cycles. These cycles seem to be related to the terrestrial tides, which influence the infiltration speed and thus the drip rate of water inside the cave. At the other extreme is the longest record in Devil's Hole (Arizona, USA), which gives a sequence of  $\delta^{18}\text{O}$  variability for the last 580,000 years (see Figure 3B for the estimated power spectrum). Significant cycles with periodicities of 100 ky, 40 ky, 23 ky, 17 ky and 2.4 ky have been found. The correspondence with Milankovitch's orbital climatic cycles is obvious for eccentricity (100 ky), obliquity (41 ky) and precession (23 ky). 17.3 ky has been reported as a combination tone of obliquity and precession (Rodríguez-Tovar and Pardo-Igúzquiza, 2003) and 2.5 ky has also been reported by Berger et al. (1991) as a different obliquity and precession combination tone. The power spectra for the  $\delta^{18}\text{O}$  sequences of Fort Stanton (New Mexico, USA) and Bells cave (Arizona, USA) are set out in Figure 4 (A and B). Both caves register almost the same time interval: from 55,000 to 11,000 years B.P. It can be seen how both spectra share

*the Milankovitch periodicities of obliquity (41 ky) and precession (23 ky and 19 ky in each cave respectively). Both caves also share sub-Milankovitch periodicities of the order of 9.7 ky, 4.6 ky, 3.3 ky, 2.1 ky and around 1.4 ky. All these cycles are the spectral signature of the Dansgaard-Oeschger and Heinrich events and are also found in some of the other speleothems analysed. Other peaks can be explained as harmonics and combination tones of Milankovitch cycles. The previous periodicities show a remarkable coincidence with the periods reported by Rial (2004). The last speleothem in North America is one in Carlsbag cave (New Mexico, USA), in which an annual banding for almost two thousand years can be discerned. The power spectrum is shown in Figure 5, where it can be seen that apart from the 11-year sunspot cycle and the 22-year magnetic cycle, there are 26.6- and 83-year cycles that also relate to solar activity (cf. Pardo-Igúzquiza, 1994).*

*Other registers (Figures 6 and 7) show some of the previous periodicities plus periodicities such as the 18.6-year sun-moon cycle (Currie et al., 1993) and others related to the ENSO (el niño-southern oscillation) and the quasi-biannual oscillation (Balwin, 2001). Table 2 shows the periodicities found for the 22 speleothems that have been analysed. To interpret the results of all the periodicities, a running mean has been applied to a sequence, with the peaks shortened in increasing order as a way of highlighting the most significant peaks (Fig. 8). The cycles seen are the Milankovitch cycles of eccentricity (100 ky), obliquity (41 ky) and precession (23 ky and 19 ky). The next three cycles of 9.6 ky, 4.6 ky and 2.6 ky correspond to the combination tones of obliquity and precession with periodicities of 10.3 ky, 4.7 ky and 2.5 ky, reported by Berger et al. (1991). The cycle of 1.3 ky falls inside the range of  $1470 \pm 500$  years reported by Bond et al. (1997). The following range of 505 y, 222 y, 66 y, 27 y, 22 y, 18.6 y and 11 y are related to solar activity (Vasiliev and Dergachev, 2002). The rest of the cycles, from 4 years to 1 lunar day, have been discussed above.*

### **Conclusions**

*It has been shown how speleothems are continental deposits that register signals corresponding to different climatic cycles. These cycles are similar to the ones found in dendrochronology, varves, lake deposits, ice cores, deep-sea cores and so on. The world-wide distribution of caves from whence the speleothems and their proxies derive makes these kinds of record an excellent complement to other continental and marine records.*

### **Introducción**

Los espeleotemas son depósitos de precipitación química que se originan y desarrollan en el interior de las cavidades kársticas. Constituyen una valiosa fuente de información sobre las condiciones paleoambientales en general y paleoclimáticas en particular de los entornos donde se localizan las cuevas. Su importancia estriba en que, al igual que los testigos de los sondeos realizados en los hielos del Ártico y de la Antártida y en los fondos marinos profundos, proporcionan registros muy continuos y de gran calidad para su estudio. La información en el ámbito terrestre emergido ha estado tradicionalmente restringida a los depósitos lacustres, por lo que los espeleotemas han venido a completar el vacío existente respecto a la información paleoclimática en el ámbito continental. En la actualidad, los estudios paleoclimáticos a partir de espeleotemas han alcanzado un notable estado de desarrollo, como lo corroboran los diferentes trabajos de revisión que se han publicado en los últimos años (McDermont, 2004; Fairchild *et al.*, 2006; Lachniet, 2009), así como la aparición de algunas monografías específicas sobre el tema (Fairchild and Baker, 2012).

Los espeleotemas más ampliamente utilizados para obtener registros paleoclimáticos han sido los formados por carbonato cálcico, originados en cuevas

abiertas en calizas, dolomías y mármoles. Entre los diferentes tipos de espeleotemas, los más empleados para análisis paleoambientales, aunque no los únicos, han sido los depósitos estalagmíticos, caracterizadas por su crecimiento a favor de un eje vertical, desde el suelo de la cueva hacia arriba. Las estalactitas (que crecen desde el techo de la cueva hacia abajo) se han utilizado con menor frecuencia, debido a su estructura interior más compleja, con la presencia de un canal interno que facilita los fenómenos de disolución y reprecipitación. Las estalagmitas utilizadas para estudios paleoambientales suelen tener un tamaño muy variable, comprendido entre algunos centímetros y varios metros. Presentan una estructura interna bandeada, con numerosas y en general bien marcadas capas de precipitado carbonático de diferente intensidad cromática, espesor y textura cristalina. Estas bandas pueden tener un carácter estacional, anual o plurianual, pudiendo representar cada una de ellas un número de años variable. En general, las capas más claras indican una precipitación más rápida, mientras que las más oscuras indican un desarrollo mucho más lento, que en algunos casos puede llegar hasta la ausencia de precipitación, generándose interrupciones sedimentarias o hiatos en el registro secuencial de la estalagmita, que pueden dificultar notablemente su interpretación (Fairchild and Baker, 2012). Las bandas

de la estalagmita suelen ser de espesor uniforme en la parte central, cercana al eje de crecimiento, acunándose hacia los bordes o llegando a desaparecer; por esta razón, lo más adecuado es efectuar el muestreo a lo largo del eje longitudinal de crecimiento en dicha parte central. El muestreo sistemático genera una secuencia de datos (diferentes en función del tipo de análisis que se efectúe y los objetivos del estudio) con coordenadas espaciales de posición en la estalagmita. Posteriormente, utilizando alguna técnica de datación absoluta, las coordenadas espaciales pueden pasarse a edades, generándose una serie temporal típica, como cualquier otra tratada en cicloestratigrafía. Los *proxies* que se suelen medir son los isótopos estables del oxígeno y del carbono ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ), los espesores de las láminas, el color, la densidad óptica de luminiscencia y la abundancia de ciertos elementos traza (como Sr, Ba, P u otros).

Un aspecto fundamental para la utilidad de los espeleotemas como archivos de las condiciones ambientales pasadas, es su facilidad para aplicar sobre ellos algunas técnicas contrastadas de datación absoluta. Uno de los más empleados es el de la serie del Uranio (U-Th), pero no el único; dependiendo del rango temporal a estudiar y las características de la muestra se utiliza el  $^{14}\text{C}$ , el U-Pb, la termoluminiscencia, el *Electron Spin Resonance* u otros. Estas dataciones, realizadas en número conveniente a lo largo del eje axial de la estalagmita, posibilitan controlar con precisión los crecimientos no lineales de la estalagmita, esto es, las velocidades variables de precipitación con el tiempo. Con estas amplias posibilidades de datación absoluta (y otras, como la datación directa en precipitados actuales en sitios experimen-

tales) se ha llegado a confeccionar desde series de alta resolución para unos pocos años, con datos que presentan un espaciado de unas doce horas para una secuencia temporal de cinco años, hasta secuencias muy largas, de hasta 500.000 años, con un espaciado medio entre datos consecutivos de alrededor de mil años. Este último caso viene a cubrir los últimos cuatro grandes ciclos glaciales, aunque se está en condiciones, si se encuentran las estalagmitas adecuadas, de llegar hasta registros que pudieran abarcar los últimos dos millones de años de la historia del planeta.

Puesto que, como se ha dicho anteriormente, el rango temporal, tanto del conjunto representado por una estalagmita completa, como del intervalo entre muestras tomadas en una misma estalagmita, puede ser muy variable, surgen las preguntas: dado que muchos de los procesos que rigen el crecimiento de los espeleotemas están fuertemente influenciados por el clima, ¿reflejan estos algún tipo de ciclicidad como ocurre con algunos parámetros que controlan el clima a escala global? Dicho de otra manera: ¿qué clase de señales climáticas registran los espeleotemas? y, en particular, ¿qué señales climáticas cíclicas representan? Para responder adecuadamente a estas preguntas, en este trabajo se ha utilizado el análisis espectral aplicado a un conjunto muy amplio de espeleotemas procedentes de cavidades situadas en todos los continentes (Fig. 1), publicados en la base de datos de la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Con el análisis espectral es posible descubrir los ciclos que han quedado registrados en los espeleotemas y compararlos con los ciclos climáticos previamente descritos. Estas señales climáticas



**Figura 1.** Distribución de las cuevas de donde proceden los espeleotemas considerados en este trabajo.

**Figure 1.** World-wide distribution of the caves containing the speleothems considered in this work.

están normalmente inmersas en el “ruido” ambiental de fondo, lo que dificulta la interpretación directa de las series temporales. La coincidencia de las ciclicidades de precipitación detectables en los espeleotemas con otros procesos igualmente cíclicos de tipo geofísico (mareas, actividad solar, ciclos meteorológicos y climáticos, ciclos del sistema atmósfera-hidrosfera-criosfera, ciclos orbitales de Milankovitch, entre otros), junto a la significación estadística de los ciclos encontrados en el análisis estadístico, nos permitirá proponer una conexión causa-efecto.

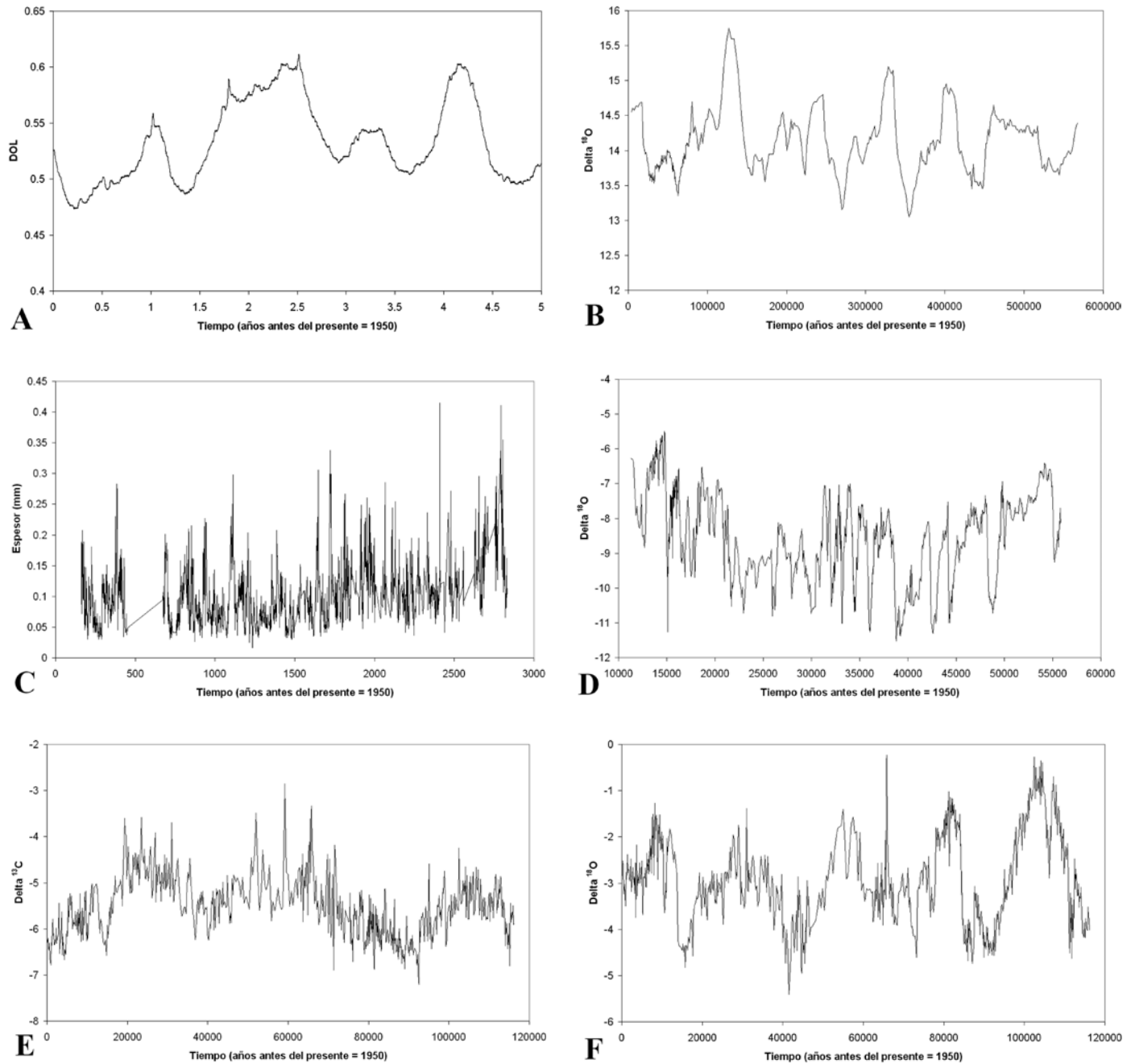
## Metodología

Se han seleccionado los registros de espeleotemas de 22 cuevas situadas en 18 países de cinco continentes (Tabla 1 y Fig. 1). De estas 22 cavidades, una está en Sudáfrica, tres en Asia, tres en Oriente Próximo, tres en Australia-Oceanía, cinco en Europa, cinco en América del Norte y dos en América del Sur. En todos los casos menos en uno, los espeleotemas analizados han sido estalagmitas que crecieron en la zona vadosa. La excepción es una colada calcítica (*flowstone*) desarrollada en condiciones subacuáticas (zona freática) en la cueva Devils Hole en Nevada (EE.UU.). El registro temporal más corto representado son cinco años (1000-995 BP) en la Cold Water Cave en Iowa (EE. UU.). No obstante, este registro tiene la particularidad de ser el que más datos tiene ( $n = 3525$ ), con un intervalo medio de muestreo muy pequeño ( $\bar{\Delta} = 0.0014$  años, esto es, unas 12 horas). Además, el indicador paleoclimático de este espeleotema es el único ejemplo, de entre los seleccionados, de densidad óptica de luminiscencia. El registro más largo representado es el de Devils Hole con 563500 años (de 568000 a 4500 años BP) aunque, por otra parte, solo tiene 444 datos, lo que ofrece un intervalo medio de muestro de 1269 años. El siguiente registro más largo es el del espeleotema procedente de la cueva Kesang, en China, con 500000 años, pero con 1491 datos, rebajando el intervalo medio de muestreo a 300 años. Entre estos extremos se da una variada casuística. Así, el número de datos y el intervalo de muestreo pueden ser muy diferentes, como se puede ver en la Tabla 1. En cuanto a los tipos de *proxies*, 17 registros corresponden al isótopo estable del oxígeno,  $\delta^{18}\text{O}$ , uno al isótopo estable del carbono,  $\delta^{13}\text{C}$ , tres son espesores de las bandas de crecimiento del espeleotema y uno es de la densidad óptica de luminiscencia. En el análisis espectral de las series temporales de *proxies* de estalagmitas, los resultados esperados están condicionados por la longitud temporal del registro y por el intervalo de muestreo.

Puesto que las secuencias temporales de *proxies* en espeleotemas se generan para estudiar cambios ambientales (básicamente climáticos) en el pasado, podemos analizarlos estadísticamente desde dos puntos de vista. Por una parte, podríamos comparar y correlacionar las series temporales de espeleotemas con otras series temporales de registros climáticos, como por ejemplo los *proxies* de testigos de hielo en Groenlandia y la Antártida o los *proxies* de secuencias sedimentarias obtenidas de testigos de sondeos realizados en los fondos marinos. Por otro lado, como muchos de los fenómenos climáticos son cíclicos o pseudocíclicos (en este caso con una firma espectral característica), se podría analizar qué ciclos están representados en las series temporales de *proxies* de espeleotemas, lo que implicaría una demostración de la señal climática global. Este segundo aspecto es el que se analiza en este trabajo. Para conseguir dicho objetivo (es decir, responder a la pregunta ¿qué señales climáticas registran los espeleotemas?), el análisis espectral es una técnica estadística óptima para la detección de ciclos inmersos en “ruido”, a partir de series temporales como las obtenidas en los *proxies* de espeleotemas. Existen muchos métodos de análisis espectral, pero un aspecto importante de las secuencias de *proxies* en espeleotemas, a considerar a la hora de elegir el método de análisis espectral más apropiado, es que el intervalo de muestreo no es constante (Fig. 2). Los motivos de un muestreo irregular son diversos:

- datos perdidos
- datos no analizados
- interrupciones o hiatos en el crecimiento del espeleotema
- crecimiento no lineal del espeleotema, lo que significa que, aunque el espeleotema se muestree con una longitud constante, al pasar de coordenadas espaciales a valores temporales, las muestras no estén equiespaciadas.

Es bien conocido que la interpolación modifica el contenido espectral (Schulz and Statterger, 1997) del espeleotema, por lo que es mejor utilizar un método de análisis espectral que trabaje directamente sobre la serie original, con muestras irregularmente distribuidas a lo largo de la escala temporal. En este sentido, el periodograma de Lomb-Scargle (Lomb, 1976; Scargle, 1982) es una de las alternativas más utilizadas (Pardo-Igúzquiza and Rodríguez-Tovar, 2012). Por otra parte, en el espectro estimado, es necesario discernir picos estadísticamente significativos que evidencien los ciclos reales de los ciclos espurios que son producto del “ruido” y de la fluctuación estadística de una muestra de tamaño finito. Para esta finalidad, el test de permutación (Pardo-Igúzquiza and Rodríguez-Tovar, 2000) es también una alternativa eficiente.



**Figura 2.** Series temporales típicas de *proxies* medidos en espeleotemas. A: Densidad óptica de luminiscencia (DOL) en una estalagmita de la cueva Cold Water (Iowa, EE.UU.) con una resolución de muestreo de unas 12 horas. B: Valor de  $\delta^{18}\text{O}$  medido en una colada calcítica de la cueva Devils Hole (Arizona, EE.UU.), donde se muestra la variabilidad del clima para los últimos 580 000 años. C: Espesor de bandeoado anual en una estalagmita de la cueva Carlsbad (Nuevo México, EE.UU.) para los últimos 3000 años antes del presente. Nótese los hiatos existentes, especialmente el situado en torno a unos 600 años antes del presente. D: valor de  $\delta^{18}\text{O}$  medido en una estalagmita de la cueva Fort Stanton (Nuevo México, EE.UU.) para el periodo temporal comprendido entre los 55 000 y 12 000 años antes del presente. E y F: valores de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  medidos para las mismas posiciones de la misma estalagmita de la cueva Botuverá (Brasil) para los últimos 116 000 años. El resto de las series temporales considerados es parecido a alguno de estos tipos aunque posiblemente con diferente *ratio* de muestreo, duración temporal, hiatos, tendencia temporal, etc.

**Figure 2.** Typical time series of *proxies* measured in speleothems: A: Luminiscence optical density (DOL) in a stalagmite in Cold Water cave (Iowa, USA) with a sampling resolution of around 12 hours; B:  $\delta^{18}\text{O}$  sequence measured in a flowstone in Devil's Hole cave (Arizona, USA) showing climate variations over the last 580 000 years; C: Thickness of annual bands in a stalagmite at Carlsberg cave (New Mexico, USA) for the last 3000 years (note the hiatus located around 600 years ago); D:  $\delta^{18}\text{O}$  sequence measured in a stalagmite in Fort Stanton cave (New Mexico, USA) for the time interval between 55 000 and 12 000 years B.P.; E and F: sequences of  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  respectively, measured at the same locations in the same stalagmite in Botuverá cave (Brazil) for the last 116 000 years. The rest of the time series considered are similar to some of the previous sequences although with different sampling ratio, time duration, hiatuses, etc.

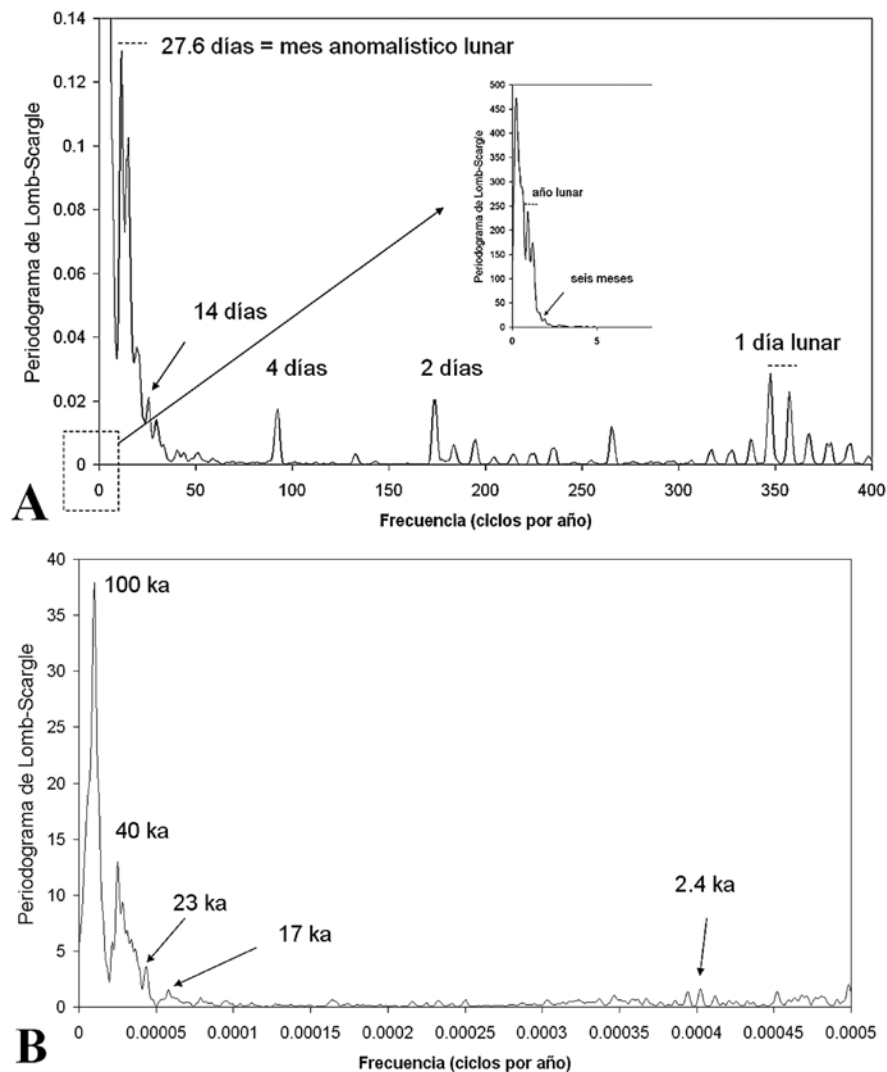
**Resultados**

El registro de mayor resolución temporal es el de densidad óptima de luminiscencia medido en una estalagmita de Cold Water cave (Stoykova *et al.*, 2008) en Iowa (EE.UU.). El espectro de potencia estimada se puede ver en la Figura 3A. Se han identificado como significativos los ciclos de 1 día, 2 días, 4 días, 2 semanas y 27 días (mes anomalístico lunar; Lozano, (1972) así como el año lunar. Aparte del año lunar que refleja el ciclo hidrológico anual, los períodos lunares de 1 día, 2 días, 14 días y 27 días parecen estar relacionados con las mareas terrestres que influirían en la velocidad de infiltración y, por consiguiente, en la velocidad de goteo en la estalagmita. Una interpretación alternativa se puede encontrar en Shopov *et al.* (1994).

En el otro extremo está el registro más largo de los analizados: un espeleotema de la cueva Devils Hole (Arizona, EE.UU.) que proporciona variaciones en  $\delta^{18}O$

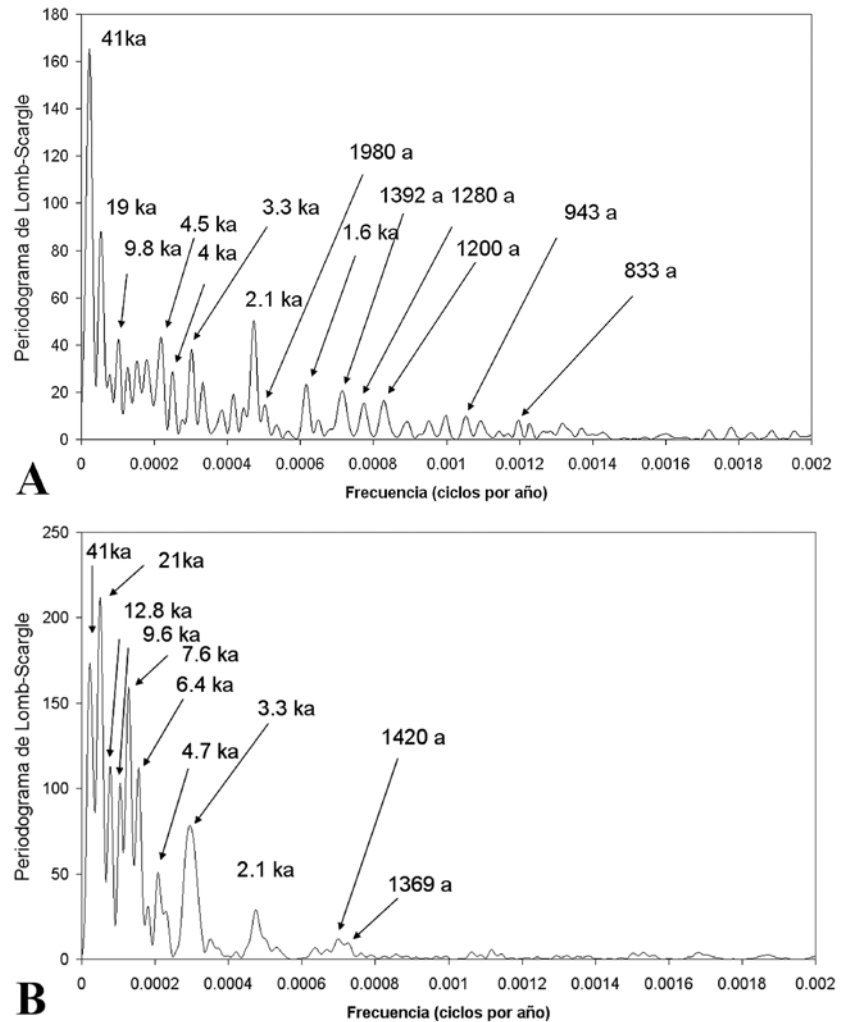
para los últimos 580 000 años. El espectro de potencia estimado se muestra en el la Figura 3. Se han encontrado como significativos, de acuerdo al test de permutación, ciclos con periodicidades de 100 ka (1ka = 1000 años), 40 ka, 23 ka, 17 ka y 2.4 ka. La correspondencia con los ciclos orbitales de Milankovitch de 100 ka (ciclo de excentricidad corto), 40 ka (oblicuidad) y 23 y 19 ka (precesión), es evidente. El ciclo de 2.4 ka se ha registrado en ciclos de insolación en otros registros independientes de los espeleotemas. Berger *et al.* (1991) informa de un ciclo de 2.5 ka como tono de combinación de los ciclos de oblicuidad y precesión. Un ciclo 17.3 ka también se muestra en Rodríguez-Tovar and Pardo-Igúzquiza (2003), como tono de combinación de los ciclos de oblicuidad y precesión para los espesores de estratos calizos del Kimmeridgiense.

Las Figs. 4A y 4B proporcionan los espectros de potencia estimados para los registros de  $\delta^{18}O$  para las cuevas de Fort Stanton (Nuevo México, EE.UU.) y Bells



**Figura 3.** A: Espectro de potencia de la serie de datos de densidad óptica de luminiscencia en la cueva Cold Water (Iowa, EE.UU.) donde se aprecia, entre otros, el ciclo diario lunar, que es el ciclo de más alta frecuencia detectado en este estudio. B: Espectro de potencia de la serie de datos de  $\delta^{18}O$  en la cueva Devils Hole (Arizona, EEUU) donde se aprecia, entre otros, el ciclo de excentricidad corto de Milankovitch con una duración de 100000 años, que es el ciclo de más baja frecuencia detectado en este estudio. 1 ka = 1 kilo-año = 1000 años

**Figure 3.** A: Power spectrum of the sequence of luminescence optical density data in Cold Water cave (Iowa, USA), where the daily lunar cycle (the highest frequency cycle found in this study) can be seen, among others; B: power spectrum of the sequence of  $\delta^{18}O$  data in Devil's Hole cave (Arizona, USA), where the Milankovitch short cycle of eccentricity, with a duration of 100000 years (the cycle with the lowest frequency found in this study) can be seen, among others.



**Figura 4.** Espectros de potencia de dos series de  $\delta^{18}O$  de aproximadamente el mismo rango temporal (de 55000 a 11000 años antes del presente) en dos cuevas diferentes. A: La cueva de Fort Stanton en Nuevo México (EE.UU.) y B: La cueva Bells en Arizona (EE. UU.). Los ciclos de Milankovitch de oblicuidad (41 ka) y precesión (21 ka y 19 ka) aparecen en ambos registros. Además, aparecen otros ciclos de sub-Milankovitch, algunos de los cuales son coincidentes en ambas cuevas.

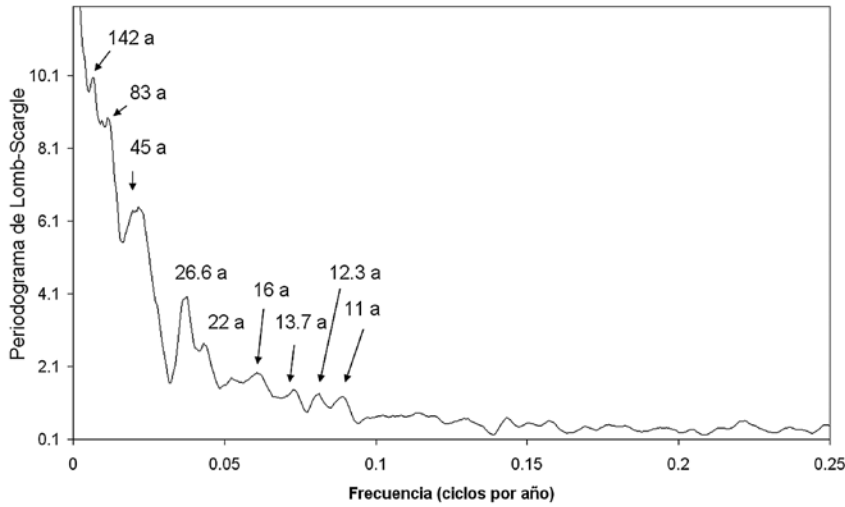
**Figure 4.** Power spectra of two  $\delta^{18}O$  series of approximately the same time interval (from 55000 to 11000 years B.P.) in two different caves: A: Fort Stanton cave in New Mexico (USA) and B: Bells cave in Arizona (USA). The Milankovitch cycles of obliquity (41 ky) and precession (21 ky and 19 ky) appear in both time series. There are also sub-Milankovitch cycles, some of which coincide in both caves.

(Arizona, EE.UU.). Ambas cuevas registran aproximadamente el mismo período temporal, desde hace 55000 años hasta hace 11000 años. Puede verse como ambos registros comparten las periodicidades de Milankovitch de oblicuidad (41 ka) y precesión (19 ka y 21 ka en cada cueva, respectivamente). También ambas cuevas comparten periodicidades en la banda de sub-Milankovitch del orden de 9.6 a 9.8 ka, 4.5 a 4.7 ka, 3.3 ka, 2.1 ka, y en torno a 1392 años. Todos estos ciclos se han encontrado en otros registros y se relacionan con la firma espectral de los eventos de Dansgaard-Oeschger y los eventos Heinrich. Otros de los picos que aparecen se pueden explicar como armónicos y tonos de combinación de los ciclos de Milankovitch. Resulta remarcable la coincidencia de los anteriores períodos con los que encuentra Rial (2004) de 10.3 ka, 4.3 ka, 2.75 ka, 2.0 ka, 1.58 ka, 1.3 ka y 1.1 ka para el intervalo 29 ka a 45 ka antes del presente y lo explica como una señal periódica de 7.5 ka modulando una portadora de 2.75 ka con una separación constante entre los picos igual a  $1/7.5 \text{ ka}^{-1}$ . Berger *et al.* (1991) informa de tonos

de combinación de 10.3 ka, 4.7 ka y 2.5 ka a partir de los ciclos de oblicuidad y precesión.

Finalmente, el último espeleotema procedente de una cueva analizada de Norteamérica es el correspondiente a la cueva Carlsbad (Nuevo México, EE.UU.) donde se dispone de un registro bandeado anual en una estalagmita para un período de cerca de dos mil años. El espectro de potencia se muestra en la Figura 5, donde además de los ciclos de las manchas solares de 11 años y el ciclo magnético de 22 años, hay otros ciclos como los de 26.6 y 83 años, muy próximo a 26.9 y 78.7, encontrados por Pardo-Igúzquiza *et al.* (1994) en varvas lacustres del Eoceno y relacionados con ciclos climáticos como resultado de la actividad solar. También los ciclos de 142 y 83 años están próximos a los ciclos de 145 y 90 años e interpretados como ciclos de las manchas solares (Williams, 1981) o ciclos mareales (Williams and Gerard, 1990) para depósitos laminados del Precámbricas de Australia. Asimismo, los picos de 26.6 y 12.3 años están muy próximos a los ciclos de 26.8 y 12.2 años encontrados por Currie

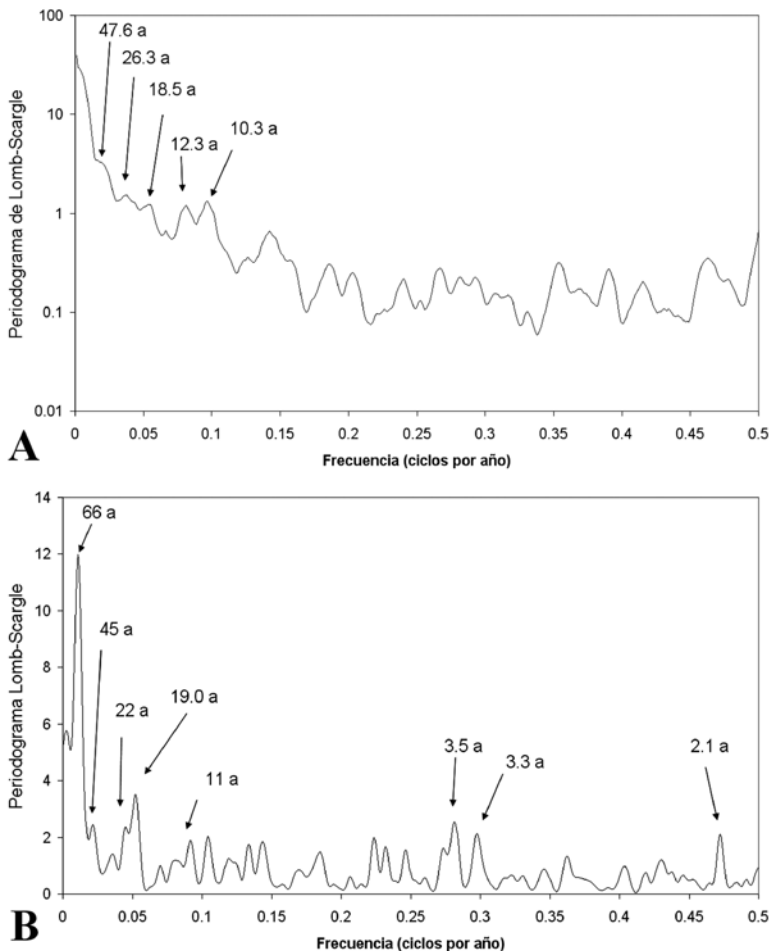




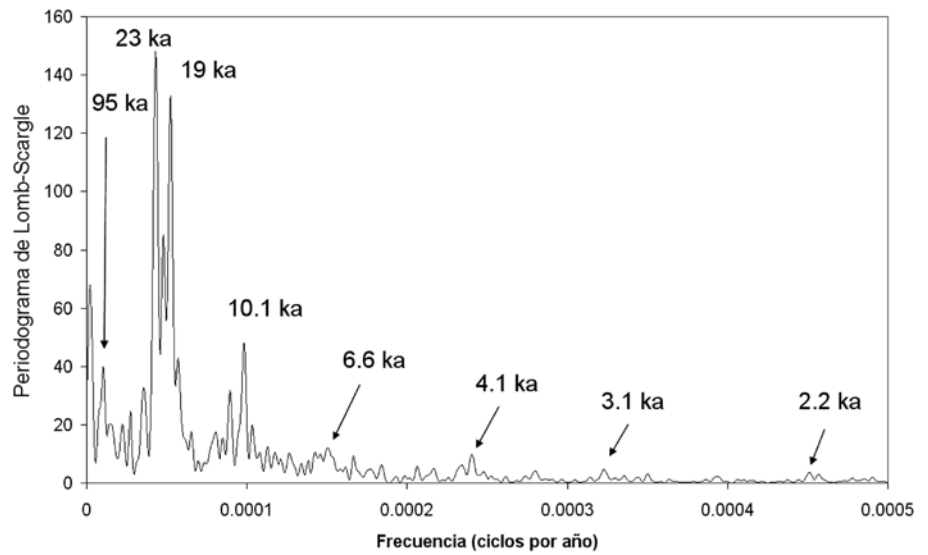
**Figura 5.** Espectro de potencia de una serie temporal elaborada a partir del espesor del bandeo anual de una estalagmita en Calsbard Cavern en Nuevo México (EE.UU.)  
**Figure 5.** Power spectrum of the thickness of annual laminae in a stalagmite in Calsbard cave in New Mexico (USA).

*et al.* (1993) para *proxies* climáticos en Europa. Adicionalmente, todas las ciclicidades encontradas en este registro de la cueva Carlsbad también se han encontrado en espeleotemas de otros lugares del mundo, como por ejemplo en las cuevas de Ortigosa (La Rioja) en el Norte de España (Muñoz *et al.*, 2009).

Otros dos registros sobre el bandeo anual se obtienen en la Grotta di Ernesto (Italia) y en la Avaiki Cave, Niue Island, Pacífico Sur. Los dos espectros de potencia estimados se muestran en la Figura 6. En el caso de la estalagmita italiana, se observan periodicidades de 47.6, 26.3, 18.5, 12.3 y 10.3 años. Todos los ciclos apa-



**Figura 6.** Espectros de potencia de una serie temporal elaborada a partir del espesor del bandeo anual de una estalagmita en A: Grotta di Ernesto (Italia) y B: Avaiki Cave, Niue Island, Pacífico Sur.  
**Figure 6.** Power spectra of the thickness of annual layers in a stalagmite in A: Grotta di Ernesto (Italy) and B: Avaiki cave, Niue Island, Southern Pacific.



**Figura 7.** Espectro de potencia de una serie temporal elaborada a partir de la variabilidad en  $\delta^{18}\text{O}$  en la cueva Kesang (China), la segunda de las estalagmitas analizadas con un registro más largo (500 ka).

**Figure 7.** Power spectrum of the  $\delta^{18}\text{O}$  variability in Kesang cave (China), the second longest record (500 ky) of the stalagmites analysed.

recen en la estalagmita de Carlsbad, comentados con anterioridad en relación con actividad solar y manchas solares y, además, el ciclo luni-solar de 18.6 años (Currie *et al.*, 1993). En la estalagmita de Avaiki Cave, en el Pacífico Sur, aparecen ciclos parecidos, junto con otros de 3.3 a 3.5 años relacionados con el fenómeno ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*) que afecta a las lluvias monzónicas (Rasbury y Aharon, 2006), así como el ciclo de 2.1 años relacionado con el fenómeno de las oscilación cuasi-bianual (Baldwin, 2001).

La segunda estalagmita con un registro más largo es de la cueva Kesang (China). Se han registrado

los últimos 500 000 años de variación del contenido en  $\delta^{18}\text{O}$  y su espectro de potencia se muestra en la Figura 7. Se observa el ciclo de excentricidad corto de 95 ka, los ciclos de precesión de 23 y 19 ka, así como ciclos de 10.1, 6.6, 4.1, 3.1 y 2.2 ka que son típicos de la firma espectral de los procesos a escala de milenios (eventos de Dansgaard-Oschager y Heinrich; Dansgaard *et al.*, 1993) previamente comentados.

Del mismo modo se ha efectuado el análisis espectral del resto de los espeleotemas y los resultados se han representado en la Tabla 1. Para poder

Nombre de la cueva y país	Proxie	Número de datos e intervalo medio de muestreo	Tiempo representado (años)	Referencia principal	Periodicidades de ciclos estadísticamente significativos
Cold Air Cave (Sudáfrica) 24°1' S, 29° 11' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 1230$ $\bar{\Delta} = 19.8$ años	De 25000 BP hasta hoy	Holmgren <i>et al.</i> , 2003	14 ka, 5.2 ka, 3.6 ka, 2.5 ka
Dandak Cave (India) 19°N, 82°E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 1874$ $\bar{\Delta} = 0.5$ años	624 – 1562 AD	Berkelhammer <i>et al.</i> , 2010	24 a, 14.9 a, 4.1 a, 1.07 a
Kesang Cave (China) 42°52' N, 81°45' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 1491$ $\bar{\Delta} = 300$ años	500000 BP hasta hoy	Cheng <i>et al.</i> , 2012	95 ka, 23 ka, 19 ka, 10.1 ka, 6.6 ka, 4.1 ka, 3.1 ka, 2.2 ka

**Tabla 1.** Nombre y localización de las 22 cuevas (1ª columna) incluidas en el estudio, (país donde se localiza la cueva (1ª columna), proxy analizado (2ª columna), número de datos de la serie temporal e intervalo de muestreo (3ª columna), periodo temporal que cubre la secuencia (4ª columna), referencia bibliográfica principal sobre cada espeleotema (5ª columna) y periodicidades de los ciclos estimados como estadísticamente significativos en el espectro de potencia (6ª columna)

**Table 1.** Column 1: names and locations of the 22 caves of the speleothems included in this work; column 1: country where the cave is located; column 2: proxy analysed; column 3: number of data in the sequence and sampling interval; column 4: temporal length of the sequence; column 5: main reference where the study of the speleothem was published; column 6: periodicities of the cycles that were found as statistically significant in the spectral analysis of the sequences

Nombre de la cueva y país	Proxie	Número de datos e intervalo medio de muestreo	Tiempo representado (años)	Referencia principal	Periodicidades de ciclos estadísticamente significativos
Liang Luar Cave (Indonesia) 8°32' S, 120°26' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 1238$ $\bar{\Delta} = 10.2$ años	12700 BP hasta hoy	Griffiths <i>et al.</i> , 2009	1000 a, 384 a, 142 a, 22 a
Qunf Cave (Omán) 17°10' N, 54°18' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 1412$ $\bar{\Delta} = 7.2$ años	10500 BP hasta hoy	Fleitmann <i>et al.</i> , 2007	800 a, 322 a, 224 a, 101 a, 64 a, 43 a
Sofular Cave (Turquía) 41°25' N, 31°56' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 3976$ $\bar{\Delta} = 12.7$ años	50000 BP hasta hoy	Fleitmann <i>et al.</i> , 2007	7.1 ka, 3.1 ka, 1.6 ka, 1.1 ka, 990 a, 757 a, 537 a
Avaiki Cave (Isla Niue, Pacífico Sur) 19° 0' S, 169° 50' W	Espesor bandas estalagmita	$n = 173$ $\bar{\Delta} = 1$ año	2001 a 1829 AD	Rasbury and Aharon, 2006	66 a, 45 a, 22 a, 19 a, 11 a, 3.5 a, 3.3 a, 2.1 a
Hollywood Cave (Nueva Zelanda) 41°57' S, 171°28' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 720$ $\bar{\Delta} = 86$ años	73000 – 11000 BP	Whittaker <i>et al.</i> , 2011	8.3 ka, 5.7 ka, 3.7 ka, 2.9 ka, 2.1 ka, 271 a, 206 a
Moondyne Cave (Australia) 34°16' S, 115°05' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 44$ $\bar{\Delta} = 1.8$ años	1911-1992 AD	Treble <i>et al.</i> , 2005	50 a, 21 a, 9.1 a, 2.2 a
Cueva del Cobre (España) 42°59' N, 4°22' W	$\delta^{13}\text{C}$ estalagmita	$n = 833$ $\bar{\Delta} = 4.7$ años	4000 BP hasta hoy	Martín-Chivelet <i>et al.</i> , 2011	333 a, 227 a, 113 a, 58 a, 17 a, 11 a, 10 a, 7.2 a
Grotta di Ernesto (Italia) 45° 58' N, 11° 39' E	Espesor bandas estalagmita	$n = 522$ $\bar{\Delta} = 1$ año	1387 a 2000 AD	Frisia <i>et al.</i> , 2006	47.6 a, 26.3 a, 18.5 a, 12.3 a, 10.3 a
Villars Cave (Francia) 45° 20' N, 0° 30' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 296$ $\bar{\Delta} = 174$ años	31800 a 83100 BP	Genty <i>et al.</i> , 2003	7.3 ka, 4.4 ka, 1.9 ka, 909 a, 387 a
Korallgrottan Cave (Suecia) 64°53' N, 14°09' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 413$ $\bar{\Delta} = 9.3$ años	4000 BP hasta hoy	Sundqvist <i>et al.</i> , 2010	2 ka, 520 a, 222 a, 166 a, 149 a, 94 a, 22 a
Katerloch Cave (Austria) 47°5' N, 15°33' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 1323$ $\bar{\Delta} = 1.7$ años	10500 a 7000 BP	Boch <i>et al.</i> , 2009	190 a, 55 a, 39 a, 24 a, 18.6 a, 4 a
Peqiin Cave (Israel) 32° 35' N, 35° 11' E	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 565$ $\bar{\Delta} = 415$ años	248000 BP hasta hoy	Bar-Matthews <i>et al.</i> , 2003	153 ka, 71 ka, 35 ka, 27 ka, 21 ka, 18 ka, 15 ka, 10.3 ka, 6.1 ka, 4.9 ka

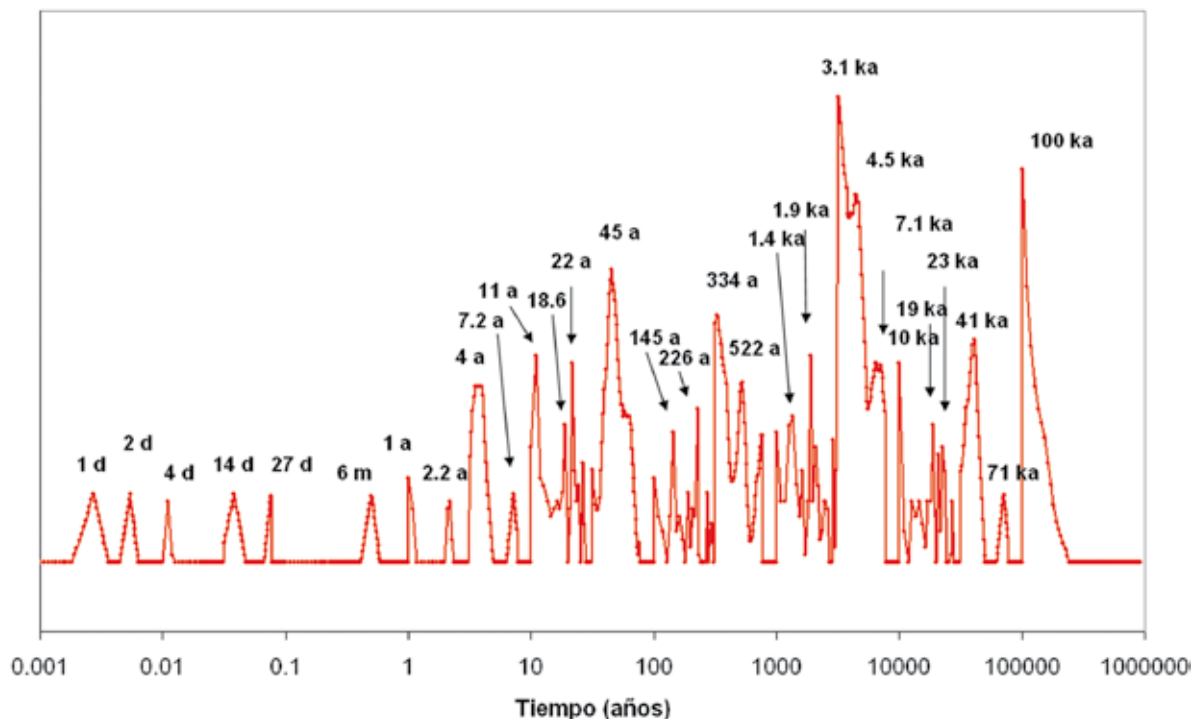
Tabla 1. Continuación.

Nombre de la cueva y país	Proxie	Número de datos e intervalo medio de muestreo	Tiempo representado (años)	Referencia principal	Periodicidades de ciclos estadísticamente significativos
Cave of the Bells (Arizona, EE.UU.) 31°45' N, 110°45' W	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 1207$ $\bar{\Delta} = 35$ años	53000 a 11000 BP	Wagner <i>et al.</i> , 2010	41 ka, 19 ka, 9.8 ka, 4.5 ka, 4 ka, 3.3 ka, 1.9 ka, 1.6 ka, 1393 a, 1280 a, 1200 a
Cold Water Cave (Iowa, EE.UU.) 43°10' N, 91°51' W	Densidad óptica de lu- miniscencia (DOL) estalagmita	$n = 3525$ $\bar{\Delta} = 0.0014$ años (0.5 días)	1000 - 995 BP	Stoykova <i>et al.</i> , 2008	1 año lunar, 6 meses, 27.6 d, 14 d, 4 d, 2 d, 1 día lunar
Devils Hole Cave (Nevada, EE.UU.) 36°25' N, 116°17' W	$\delta^{18}\text{O}$ depósito subacuático	$n = 444$ $\bar{\Delta} = 1271$ años	568000 a 4500 BP	Landwehr <i>et al.</i> , 2011; Winograd <i>et al.</i> , 1992	100 ka, 40 ka, 23 ka, 17 ka, 2.4 ka
Fort Stanton Cave (Nuevo México, EE.UU.) 33°20' N, 105°20' W	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 1209$ $\bar{\Delta} = 37$ años	55000 a 11000 BP	Asmerom <i>et al.</i> , 2010	41 ka, 21 ka, 12.8 ka, 9.6 ka, 7.6 ka, 6.4 ka, 4.7 ka, 3.3 ka, 2.1 ka, 1420 a, 1369 a
Carlsbad Cavern (Nuevo México, EE.UU.) 32° 10' N 104° 26' W	Espesor bandas (mm) estalagmita	$n = 1896$ $\bar{\Delta} = 1.4$ años	2800 BP hasta hoy	Polyak and Asmerom, 2001	142a, 83 a, 45a, 26.6a, 22a, 16a, 13.7a, 12.3a, 11a
Botuverá Cave (Brasil) 27° 13' S, 49° 09' W	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 690$ $\bar{\Delta} = 169$ años	116000 BP hasta hoy	Cruz <i>et al.</i> , 2005	23 ka, 4.7 ka, 2.9 ka, 1.8 ka
Cueva del Tigre Perdido (Perú) 5°56' S, 77°18' W	$\delta^{18}\text{O}$ estalagmita	$n = 519$ $\bar{\Delta} = 26$ años	13000 BP hasta hoy	van Breukelen <i>et al.</i> , 2008	2.6 ka, 1.9 ka, 1282 a, 840 a, 689 a, 505 a, 294 a

**Tabla 1.** Continuación.

interpretar los resultados conjuntos, todos los ciclos que aparecen en la Tabla 1 se han representado en la Fig. 8. Puede observarse como se obtienen todos los ciclos que se pueden reconocer en otros registros paleoclimáticos como los anillos de los árboles, las varvas lacustres, los testigos de sondeos en el hielo glaciar, o en los sedimentos del fondo marino. Los ciclos de Milankovitch de excentricidad (100 ka), oblicuidad (41 ka) y precesión (23 ka y 19 ka) aparecen claramente en los registros de los espeleotemas. Los tres ciclos siguientes de 10 ka, 4.4 ka y el intervalo (3.1-1.9 ka) se corresponden con

los ciclos de 10.3, 4.7 y 2.5 ka que aparecen como tonos de combinación de los ciclos de oblicuidad y precesión de acuerdo a Berger *et al.* (1991). El ciclo de 3.1 ka es uno de los ciclos que aparecen en el análisis del registro Vostok (Vegas *et al.*, este mismo volumen) El ciclo de 1.4 ka está en el rango del ciclo de  $1470 \pm 500$  años de Bond *et al.* (1997). El siguiente rango de ciclos 522 a, 226 a, 45 a, 22 a, 18.6 a y 11 a están relacionados con ciclos de actividad solar (Vasiliev y Dergachev, 2002). El resto de ciclos de los 4 años a 1 día lunar se han comentado con anterioridad.



**Figura 8.** Representación, en el mismo diagrama, de todos los ciclos detectados en los espeleotemas analizados. Se ha utilizado una media móvil ponderada con un kernel triangular con el fin de detectar los ciclos que más se repiten, considerando todos los de la Tabla 1 conjuntamente y ordenados en una secuencia.

**Figure 8.** Diagram containing all the cycles found in the speleothems analysed and calculated using a running mean with a triangular kernel applied to a sequence of all the cycles set out in Table 1 in order to highlight the most significant.

## Conclusiones

Se ha mostrado como los espeleotemas son depósitos continentales terrestres capaces de registrar las señales correspondientes a diferentes ciclos climáticos. Estos ciclos son similares a los que se pueden obtener a partir de otro tipo de datos como los procedentes de los anillos de crecimiento de los árboles, los depósitos de varvas, los sondeos en lagos, los sondeos en el hielo o los sondeos en el fondo marino. La ubicuidad geográfica de las cavidades kársticas y, en consecuencia, de los espeleotemas, los hacen especialmente interesantes para completar la información paleoclimática procedente de otros registros (fundamentalmente depósitos lacustres) en el ámbito continental para los últimos 500 000 años. Los espeleotemas tienen un amplio rango dinámico para el registro de ciclos, desde los diarios de las mareas terrestres hasta los 100 000 años del ciclo corto de excentricidad de Milankovitch. El análisis espectral se ha mostrado como una técnica estadística eficiente para la detección de los ciclos paleoclimáticos encriptados en las secuencias temporales obtenidas a partir de los espeleotemas. En último término, los estudios de cada espeleotema con los condicionantes locales propios de cada cueva, podría llevar a una mejor inter-

pretación de los resultados y una mejor comprensión de sus implicaciones paleoclimáticas.

## Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación KARSTINV CGL2010-15498 del Ministerio de Economía y Competitividad. Quisiéramos agradecer a los revisores (Arsenio Muñoz y Luis Pomar) por sus sugerencias y comentarios que han contribuido a mejorar la versión final de este trabajo.

## Referencias

- Asmerom, Y., Polyak, V.J. and Burns S.J. 2010. Variable winter moisture in the southwestern United States linked to rapid glacial climate shifts. *Nature Geoscience*, 3, 114-117.
- Baldwin, M.P., Gray, L.J., Dunkerton, T.J., Hamilton, K., Haynes, P.H., Randel, W.J., Holton, J.R., Alexander, M.J., Hirota, I., Horinouchi, T., Jones, D.B.A., Kinnersley, J.S., Marquardt, C. Sato, K. and Takahashi M. 2001. The Quasi-Biennial Oscillation. *Review of Geophysics*, 39, 179-229.

- Berger, A., Melice, J.L. and Hinnov, L.A. 1991. A strategy for frequency spectra of Quaternary climate records. *Climate Dynamics*, 5, 227-240.
- Berkelhammer, M., Sinha, A., Stott, L., Cheng, H., Pausata, F. and Yoshimura, K. 2012. An Abrupt shift in the Indian Monsoon 4,000 years ago. In: Giosan L. *et al.* (eds) *Climates, Landscapes, and Civilizations*, Geophysics Monograph Series volume 198, AGU, Washington D. C., 75–87.
- Boch, R., Spötl, C., and Kramers J. 2009. High-resolution isotope records of early Holocene rapid climate change from two coeval stalagmites of Katerloch Cave, Austria. *Quaternary Science Reviews*, 28, 2527-2538.
- Bond, G., Showers, W., Cheseb, M., Lotti, R., Almasi, P., deMenocal, P., Priore, P., Cullen, H., Hajdas, I. and Bonani, G. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278, 1257-1266.
- Cheng, H., Zhang, P.Z. Spötl, C., Edwards, R.L., Cai, Y.J., Zhang, D.Z., Sang, W.C., Tan, M. and An, Z.S. 2012. The climatic cyclicity in semiarid-arid central Asia over the past 500,000 years. *Geophysical Research Letters*, 39, L01705.
- Cruz, F.W., Burns, Jr., S.J. Karmann, I. Sharp, W.D. Vuille, M. Cardoso, A.O. Ferrari, J.A Silva Dias, P.L. and Viana Jr. O. 2005. Insolation-driven changes in atmospheric circulation over the past 116,000 years in subtropical Brazil. *Nature*, 434, 63-66.
- Currie, R.G., Wyatt T. and O'Brien, D.P. 1993. Deterministic signals in European fish catches, wine harvests and sea-level, and further experiments. *International Journal of Climatology*, 13, 665-687.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdottir, A.E., Jouzel, J. and Bond, G. 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364, 218 – 220.
- Fairchild, I.J. and Baker, A. 2012. *Speleothem Science: From Processes to Past Environments*. Wiley-Blackwell, Hoboken, NJ, 450 p.
- Fairchild, I.J., Smith, C.L., Baker, A., Fuller, L., Spötl, C., Mathey, D. and McDermott, F. 2006. Modification and preservation of environmental signals in speleothems, *Earth-Science Reviews*, 75, 105-153.
- Fleitmann, D., Burns, S.J. Mangini, A. Mudelsee, M. Kramers, J. Villa, I., Neff, U., Al-Subary, A.A. Buettner, A. Hippler, D. and Matter, A. 2007. Holocene ITCZ and Indian monsoon dynamics recorded in stalagmites from Oman and Yemen (Socotra). *Quaternary Science Reviews*, 26, 170–188.
- Frisia, S., Borsato, A., Preto, N. and McDermott, F. 2003. Late Holocene annual growth in three Alpine stalagmites records the influence of solar activity and the North Atlantic Oscillation on winter climate. *Earth and Planetary Science Letters*, 216 (3), 231-439.
- Genty, D., Blamart, D., Ouahdi, R., Gilmour, M., Baker, A., Jouzel J. and Van-Exter, S. 2003. Precise dating of Dansgaard-Oeschger climate oscillations in western Europe from stalagmite data. *Nature*, 421, 833 – 837.
- Griffiths, M.L., Drysdale, R.N., Gagan, M.K., Zhao, J.-x., Ayliffe, L.K., Hellstrom, J.C., Hantoro, W.S., Frisia, S., Feng, Y.-x., Cartwright, I., St. Pierre, E., Fischer, M.J. and Suwargadi, B.W. 2009. Increasing Australian-Indonesian monsoon rainfall linked to early Holocene sea-level rise. *Nature GeoScience*, 2 (9), 597-664.
- Holmgren, K., Lee-Thorp, J.A., Cooper, G.R.J., Lundblad, K., Partridge, T.C., Scott, L., Sitaldeen, R., Siep Talmaf A., and Tyson P.D. 2003. Persistent millennial-scale climatic variability over the past 25,000 years in Southern Africa. *Quaternary Science Reviews*, 22 (21-22), 2311-2326
- Holmgren, K., Karlén, W., Lauritzen, S.E., Lee-Thorp, J.A., Partridge T. C., Piketh, S. Repinski, P., Stevenson, C., Svannered, O. and Tyson, P.D. 1999. A 3000-year High-Resolution Record of Palaeoclimate for North-Eastern South Africa. *The Holocene*, 9 (3), 295-309.
- Lachniet, M.S. 2009. Climatic and environmental controls on speleothem oxygen-isotope values. *Quaternary Science Reviews*, 28, 412-432.
- Landwehr, J.M., Sharp, W.D., Coplen, T.B., Ludwig, K.R. and Winograd I.J. 2011. The chronology for the d18O record from Devils Hole, Nevada, extended into the mid-Holocene. U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1082, 5 p. <http://pubs.usgs.gov/of/2011/1082/>
- Lomb, N.R. 1976. Least squares frequency analysis of unequally spaced data. *Astrophysics Space Science*, 39, 447-462.
- Martín-Chivelet, J., Muñoz-García, M.B., Edwards, R.L., Turrero, M.J. and Ortega, A.I. 2011. Land surface temperature changes in Northern Iberia since 4000 yr BP, based on d13C of speleothems. *Global and Planetary Change*, 77 (1-2), 1-12.
- McDermott, F. 2004. Paleo-climate reconstruction from stable isotope variations in speleothems: a review. *Quaternary Science Review*, 23, 901-918.
- Muñoz, A., Sen, A.K., Sancho C. and Genty D. 2009. Wavelet analysis of Late Holocene stalagmite records from Ortigosa Caves in Northern Spain. *Journal of Cave and Karst Studies*, 71 (1), 63–72.
- Pardo-Igúzquiza, E., Chica-Olmo, M. and Rodríguez-Tovar, F.J. 1994. CYSTRATI: a computer program for spectral analysis of stratigraphic successions. *Computers & Geosciences*, 20 (4), 511-584.
- Pardo-Igúzquiza, E. and Rodríguez-Tovar, F.J. 2000. The permutation test: testing the significance of the power spectra in cyclostratigraphy. *Earth Planetary and Sciences Letters*, 181, p. 175-189.
- Pardo-Igúzquiza, E. and Rodríguez-Tovar, F.J. 2012. Spectral and cross-spectral analysis of uneven time series with the smoothed Lomb-Scargle periodogram and Monte Carlo evaluation of statistical significance. *Computers & Geosciences*, 49, 207–216.
- Polyak, V.J. and Asmerom, Y. 2001. Late Holocene Climate and Cultural Changes in the Southwestern United States. *Science*, 294, 148-151.
- Rasbury, M. and Aharon, P. 2006. ENSO-controlled rainfall variability records archived in tropical stalagmites from the mid-ocean island of Niue, South Pacific. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7, Q07010.
- Rial, J.A. 2004. Abrupt climate change: chaos and order at orbital and millennial scales. *Global and Planetary Change*, 41, 95-109.
- Rodríguez-Tovar, F.J. and Pardo-Igúzquiza, E. 2003. Strong evidence of high frequency (sub-Milankovitch) orbital

- forcing by amplitude modulation of Milankovitch signals. *Earth Planetary and Science Letters*, 210, 179-189.
- Scargle, J.D. 1982. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data. *Astrophysical Journal*, 263, 835-853.
- Shopov, Y.Y., Ford, D.C. and Schwarcz, H.P. 1994. Luminiscent microbanding in speleothems: High resolution chronology and paleoclimate. *Geology*, 22, 407-410.
- Schulz, M. and Statterger, K. 1997. SPECTRUM: spectral analysis of unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computer & Geosciences*, 28 (3), 421-426.
- Stoykova, D.A., Shopov, Y.Y., Garbeva, D., Tsankov, L.T. and Yonge, C.J. 2008. Origin of the climatic cycles from orbital to sub-annual scales. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 70, 293-302.
- Sundqvist, H.S., Holmgren, K., Moberg, A., Spötl, C. and Mangini, A. 2010. Stable isotopes in a stalagmite from NW Sweden document environmental changes over the past 4000 years. *Boreas*, 39, 77-86
- Treble, P., Chappell, J., Gagan, M., Harrison, T. and McKee-gan, K. 2005. In situ measurement of seasonal  $\delta^{18}O$  variations and analysis of isotopic trends in a modern speleothem from southwest Australia. *Earth and Planetary Science Letters*, 233, 17-32.
- van Breukelen, M.R., Vonhof, H.B., Hellstrom, J.C., Wester, W.C.G. and Kroon, D. 2008. Fossil drip water in stalagmites reveals Holocene temperature and rainfall variation in Amazonia. *Earth and Planetary Science Letters*, 275 (1-2), 54-60.
- Vasiliev, S.S. and Dergachev, V.A. 2002. The 2400-year cycle in atmospheric radiocarbon concentration: bispectrum of  $^{14}C$  data over the last 8000 years. *Annales Geophysicae*, 20, 115-120.
- Vegas, J., Pardo-Igúzquiza, Galán, L. and García-Cortés. 2013. Ciclicidad en el registro sedimentario de la laguna del maar de Fuentillejo: historia climática de los últimos 47000 años cal BP. *Boletín Geológico y Minero*, 124 (2), 217-234.
- Wagner, J.D.M., Cole, J.E., Beck, J.W., Patchett, P.J., Henderson, G.M. and Barnett, H.R. 2010. Moisture variability in the southwestern United States linked to abrupt glacial climate change. *Nature Geoscience*, 3, 110-113.
- Whittaker, T.E., Hendy, C.H. and Hellstrom, J.C. 2011. Abrupt millennial-scale changes in intensity of Southern Hemisphere westerly winds during marine isotope stages 2-4. *Geology*, 39 (5), 455-458.
- Williams, G.E. 1981. Sunspot periods in the late Precambrian glacial climate and solar-planetary relations. *Nature*, 291, 624-628.
- Williams, G.E. and Gerard, J.-C. 1990. Precambrian Cyclic Rhythmites: Solar-Climatic or Tidal Signatures? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 330, 445-458.
- Winograd, I.J., Coplen, T.B., Landwehr, J.M., Riggs, A.C., Ludwig, K.R., Szabo, B.J., Kolesar, P.T. and Revesz, K.M. 1992. Continuous 500,000-year climate record from vein calcite in Devils Hole, Nevada. *Science*, 258, 255-260

Recibido: noviembre 2012

Revisado: diciembre 2012

Aceptado: enero 2013

Publicado: abril 2013

