

Ciclicidad sedimentaria en depósitos lacustres evaporíticos tipo playa-lake del Pleistoceno inferior en la cuenca de Guadix-Baza (Cordillera Bética, España)

J. M. García Aguilar, A. Guerra-Merchán, F. Serrano y P. Palmqvist

Departamento de Ecología y Geología, Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, 29071-Málaga
chemacyanos@msn.com; antguerra@uma.es; FSerrano@uma.es; ppb@uma.es

RESUMEN

La cuenca de Guadix-Baza (Cordillera Bética) expone en su sector oriental una unidad sedimentaria de edad Pleistoceno inferior (Gelasiense y parte más baja del Calabriense), originada en un ambiente lacustre somero. En esta unidad destaca su elevada potencia (hasta 400 m), una tasa de sedimentación máxima de 44.4 cm/ka y un rango temporal cifrado entre 2.5 y 1.6 Ma BP. Resulta común la presencia de numerosos ciclos sedimentarios de diferente escala, marcados por la alternancia de margas-arenas en zonas marginales y margas-yesos en zonas centrales, que estarían originados por fases de inundación permanente y fases de evaporación/re-inundación debido a cambios climáticos globales. Los análisis espectrales realizados mediante la transformada de Fourier han revelado la existencia de frecuencias temporales comprendidas entre 0.2 y 5.2 ka asociadas a estos ciclos sedimentarios, cuyo origen parece estar motivado por oscilaciones en los niveles de radiación solar y la influencia lunar, que habrían inducido cambios climáticos globales capaces de generar variaciones en el nivel de las aguas del lago. Los análisis de autocorrelación, efectuados independientemente sobre los niveles margosos y evaporíticos, confirman esta conclusión, al señalar correlaciones directas significativas en el entorno de cuatro a doce ciclos sedimentarios, lo que conforme a las estimaciones de tasas de sedimentación correspondería a repeticiones de la serie en un rango temporal comprendido entre 1.3 y 4 ka.

Palabras clave: análisis espectral, ciclicidad sedimentaria, cuenca de Guadix-Baza, depósitos lacustres, Pleistoceno inferior

Sedimentary cyclicity in early Pleistocene, evaporitic, playa-lake lacustrine deposits in the Guadix-Baza basin (Betic Cordillera, Spain)

ABSTRACT

The Guadix-Baza basin (Betic Cordillera, southern Spain) contains in its eastern sector an early Pleistocene (Gelasian and lowermost Calabrian) sedimentary unit that was deposited in a shallow lacustrine environment. Given that the chronological limits of this unit lie between 2.5 and 1.6 Ma BP, the thickness of its preserved sediments (400 m) and high sedimentation rate (44.4 cm/ka) are remarkable. Numerous sedimentary cycles marked by an alternation of marls and sands are commonly found in the marginal sectors and marls and gypsum in the central sector, which would owe their origins to permanent flooding and evaporation/re-flooding phases due to global climatic changes. Spectral analyses carried out using Fourier transform have revealed the existence of temporary frequencies associated with sedimentary cycles of between 0.2 and 5.2 ka. The origin of these cycles may be associated with variations in solar radiation and oscillations in the Moon's orbital position, which would induce global climatic changes resulting in the rise and fall of the water table of the lake. Autocorrelation analyses conducted separately on the marly and evaporitic levels support this conclusion, as they indicate the existence of significant direct correlations between about 4 to 12 sedimentary cycles, which would correspond to repetitions of the stratigraphic series over a time span of 1.3 to 4 ka.

Key words: early Pleistocene, Guadix-Baza basin, lake deposits, sedimentary cyclicity, spectral analysis

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and Methods

Most sedimentary cycles preserved in the geological record owe their origin to astronomical events that determine climatic conditions and are ultimately responsible for the production and composition of the sediments. Fisher (1986) and Einsele et al. (1991) proposed several frequency bands associated with periodic sedimentary cycles, including an annual frequency band related to the action of the Moon and the Earth's rotation and translation movements; a solar band with periodicities of between 10 and 100 years, which would result from cyclic phenomena in the Sun itself; and a Milankovitch frequency band, with recurrence cycles of between 10 ka and 500 ka (Milankovitch, 1920, 1941), which are caused by terrestrial orbital factors related to the inclination of the Earth's axis of rotation and the geometry of the Earth's orbit around the Sun.

The continental basin of the Guadix-Baza (Granada) is of great interest for the study of sedimentary cycles in that it preserves the thickest and most continuous record of Plio-Pleistocene alluvial and lacustrine sediments in the Iberian Peninsula, with an exceptional quality of sediment exposure. The infilling of this basin (Figs. 1 and 2) is composed of 600-metre-thick sediments of continental origin and Late Miocene-Pleistocene age (Vera, 1970; Viseras, 1991; Sanz de Galdeano and Vera, 1992; Guerra-Merchán, 1993; Soria, 1993; García Aguilar and Martín, 2000; García Aguilar and Palmqvist, 2011). Since the observations made by Vera (1970), three formations showing lateral changes in their facies have traditionally been distinguished: the alluvial Guadix Fm, which spreads across the whole basin; the carbonate lacustrine Gorafe-Huélogo Fm, which crops out only in the western sector (Guadix subbasin); and the limestone and gypsiferous-marly lacustrine Baza Fm, deposited in the eastern sector (Baza subbasin). In the whole of the Guadix and Baza formations (Fig. 2) five tectono-sedimentary units (TSUs) separated by stratigraphic hiatuses have been identified (García Aguilar, 1997). Of these units, the early Pleistocene UTS-III shows the highest stratigraphic complexity, marked by the development of alluvial systems (IIIa and IIIb in Fig. 2) that evolved into extensive, shallow, evaporitic (IIIc) and carbonate (IIId) endorheic lakes. Lithostratigraphic unit IIIc is characterized by alternations of marls and gypsum, and marls and sands of lacustrine playa-lake origin, which seem to be linked to climatic global cyclicity. At the same time, the considerable thickness of the sediments (up to 400 m at the depocentre) seems to be the result of intense tectonic activity.

Our main aim has been to analyse the above-mentioned sedimentary cyclicity of early Pleistocene age in the Baza depression (unit IIIc in Fig. 2). Our estimates of the frequencies of cycles in these sediments were initially based on the calculation of the sedimentation rates in the basin. Available biostratigraphic and magnetostratigraphic data indicate a range of between 2.5 Ma at the bottom of the sequence and 1.6 Ma at the top (Alberdi and Bonadona, 1989; Garcés, 1993; Anadón et al., 1995, among others). Measured sedimentary thickness fluctuates between 240 m at the central sector of the depression and 60 m in the marginal zones, although it is worth noting that seismic profiles suggest a maximum thickness of nearly 400 m. Consequently, the estimates of sedimentation rates would range between 6.7 cm/ka for the marginal zones and 26.6-44.4 cm/ka for the central zones, depending upon the estimates of maximum thickness used.

Results and Discussion

Two high-resolution stratigraphic sections were developed for detecting sedimentary cycles (Figs 3 and 4):

- i) The Benamaurel section (BN, Figs 1 and 3), shows a thickness of 16.5 m and 153 cycles, marked by alternations of marly levels at the bottom and gypsum beds at the top, the thicknesses of each of which range between 1.3 and 110 cm. According to the sedimentation rates considered for the central sector, this series would represent a period of between 37.2 ka and 62 ka, with each single lithological cycle ranging between 243 and 405 years.
- ii) The South Galera section (GS, Figs 1 and 3) is 702 cm thick and contains 30 sedimentary cycles composed of marls and sandstones, each of which is between 2.5 and 112 cm thick. The estimated sedimentation rate for this northern marginal sector (6.7 cm/ka) would indicate periods of about 3.5 ka to 105 ka and for each single cycle. It is worth noting, however, that the former estimate could correspond to high-scale cycles, there being minor sedimentary cycles within the sandstone levels. Specifically, a number of 4 to 6 minor cycles composed of an alternation of marls and sandstones with thicknesses of 0.8 to 0.9 m have been detected. According to this criterion, such basic cycles would correspond to a period close to 200 years.

Spectral analyses within the two stratigraphic sections (Fig. 5), carried out with Fourier transform, using the CYSTRATI program developed by Pardo-Igúzquiza et al. (1994), showed the presence of sedimentary cycles of several orders of magnitude, which are superimposed according to a hierarchical pattern. The time frequencies associated with these cycles range between 5.2 and 0.75 ka. Among these, the frequencies that show the highest spectral power are those at 5.2 ka, 3.0 ka, 2.0-1.7 ka and 0.75 ka, which correspond to values of a mean sedimentary thickness of 147, 84, 48 and 19 cm respectively. Other peaks showing lower spectral power cor-

respond to frequencies of 1.3 ka, 1.1-0.9 ka, 0.7-0.5 ka and 0.4-0.3 ka and are 35, 27, 15 and 10 cm thick respectively. Sedimentary cycles less than 10 cm thick are considered to be elementary to defining the alternation of lithologies described in the stratigraphic unit.

From these data, it seems reasonable to believe that the thinner lithological cycles (between 1 and 10 cm thick) were deposited during intervals of between 200 and 500 years, whilst the thicker cycles (between 15 and 147 cm thick), each composed of several lower range cycles, would correspond to periods ranging between 500 and 5200 years.

Autocorrelation analyses (Fig. 6) undertaken with the PAST program (Hammer *et al.*, 2011) and performed separately on the marly and evaporitic levels of the Benamaurel section support this conclusion. Specifically, our results indicate the existence of significant direct correlations between the thickness of the marly levels and lags of 4, 7, 11, 12 and 34 sedimentary cycles. According to the mean sedimentation rate of 324 years estimated for the series, this would correspond to periods of 1300, 2250, 3600, 3900 and 11000 years. These values correspond roughly to the range of spectral frequencies detected, with exception of the 11 ka cycle, which approximates the lower precession frequency. As far as the evaporitic levels are concerned, there are direct and significant correlations between the thickness of gypsum and lags of 5 to 9 cycles, which correspond to periodicities ranging between approximately 1600 and 2900 years. There is also, however, an unexpected result that indicates inverse correlation for a lag of 31 cycles, which would suggest that the conditions that led to the precipitation of evaporites reversed after periods of 10 ka. In any case, it is worth noting that this negative correlation lies immediately below the lower 95% confidence limit for detecting significant autocorrelations (Fig. 6).

Patterson *et al.* (2004) described sedimentary cycles calibrated between tens and hundreds of years, which they tentatively associated with climatic changes. These changes would be astronomically induced by oscillations in the intensity of solar radiation, which would cause global alternations of wet and dry periods. Similarly, a number of studies (*cf.* Haigh, 1994; Mann *et al.*, 1995; Soon *et al.*, 1996; Svensmark, 1998; Bond *et al.*, 2001) have demonstrated that these astronomical factors are responsible for generating variations in the Earth's climate over time scales of between one and 1500 years, which would cluster into two chronological periods: centennial-scale cycles (200-500 years) and millennial-scale cycles (1000-1500 years), the latter known as "Bond frequency cycles" (Bond *et al.*, 2001). Other frequencies of high spectral power identified in our analyses (5.2 ka and 2.0-1.7 ka) have been associated with astronomical factors related to the interphase Earth-Moon (Einsele *et al.*, 1991; Keeling and Whorf, 2000). We therefore suggest an explanation for the millennial-scale cycles based on quasi-periodic variations in the range and strength of global oceanic tides caused by resonances in the periodic movements of the Earth and the Moon.

For these reasons, the early Pleistocene sedimentary cycles in the inner sector of the Baza depression can be associated to cyclic periods of aridity. During the less arid periods, marly sedimentation would predominate in a shallow, albeit permanently flooded, lacustrine environment. In contrast, the arid periods would result in repetitive phases of partial or total desiccation and re-flooding of the lacustrine system, which would allow the accumulation of evaporites. These periods of greater or lesser aridity would be caused by global oscillations in solar radiation, with a frequency of between 200 and 500 years. In addition, there are combined sedimentary cycles of greater thickness and duration (from 1000 to 5000 years), which would result from changes in the relative positions of the Earth and the Moon.

Introducción

La mayor parte de los ciclos sedimentarios observados en el registro geológico tienen su origen en fenómenos astronómicos que determinan el escenario climático general, como factor determinante en la composición de los sedimentos. Estos ciclos sedimentarios se pueden jerarquizar en distintos órdenes de magnitud temporal (Vail *et al.*, 1991; Einsele, 1992, entre otros), que pueden oscilar entre un día, para los niveles de llanuras de mareas, hasta millones de años, para secuencias deposicionales a la escala de una cuenca sedimentaria. Normalmente, la señal climática inducida por los diversos factores orbitales terrestres y la influencia del Sol, la Luna y otros planetas de nuestro sistema solar suele aparecer combinada en el registro sedimentario, de modo que se hace necesario contar para su definición con herramientas

matemáticas adecuadas, entre las que destacan el análisis espectral y el de autocorrelación.

Fisher (1986) y Einsele *et al.* (1991) plantearon distintas bandas de frecuencias temporales asociadas a ciclos sedimentarios periódicos. Por un lado, la banda de frecuencia anual, responsable de laminaciones tipo varvas que aparecen en algunas secuencias sedimentarias, las cuales se relacionan con la traslación terrestre en combinación con la posición del eje de rotación y con la acción de la Luna. Por otro lado, la banda solar, que abarca valores temporales entre 10 y 100 años, la cual deriva de fenómenos cíclicos en el Sol producidos por manchas, oscilaciones magnéticas y emisiones electromagnéticas. Por último, una tercera banda de magnitud, comprendida entre 10000 y 500000 años de recurrencia, generada por factores orbitales terrestres relacionados con la posición del eje de rotación y la órbita terrestre alrededor del Sol.

Esta última banda de frecuencias se suele denominar como "banda de frecuencias de Milankovitch"; por ser este investigador el primero en definir tales ciclos (Milankovitch, 1920, 1941). Dicha banda de frecuencias ha sido ampliamente documentada en series sedimentarias de diferentes zonas y periodos de tiempo (Covey, 1984; Einsele *et al.*, 1991; De Boer y Smith, 1994, entre otros). De acuerdo con lo anterior, son menos comunes las referencias a secuencias que muestren ciclos sedimentarios correspondientes a la banda temporal intermedia, entre 100 y 10000 años.

En relación a esta ciclicidad, la cuenca de Guadix-Baza (Granada) muestra gran interés, pues en ella se encuentra el registro de sedimentos continentales plio-pleistocenos más potente y continuo de la Península

Ibérica, con una excepcional calidad de afloramiento. Tal registro es el resultado de una elevada tasa de sedimentación, en respuesta a una actividad tectónica continuada durante este periodo de tiempo. En esta cuenca, el desarrollo de ciclos sedimentarios se observa tanto en depósitos fluviales (Pla-Pueyo *et al.*, 2008, 2011), como en depósitos lacustres, mayoritarios en el sector oriental (García Aguilar, 1997; García Aguilar y Palmqvist, 2011).

En este trabajo se ha considerado como objetivo fundamental el análisis de los ciclos sedimentarios ligados a secuencias margoso-evaporíticas y margoso-arenosas de origen lacustre (tipo *playa-lake*) depositados durante el Pleistoceno inferior en la depresión de Baza. Para ello, se han estudiado detalladamente dos secciones estratigráficas (Fig. 1): sección de Benamau-

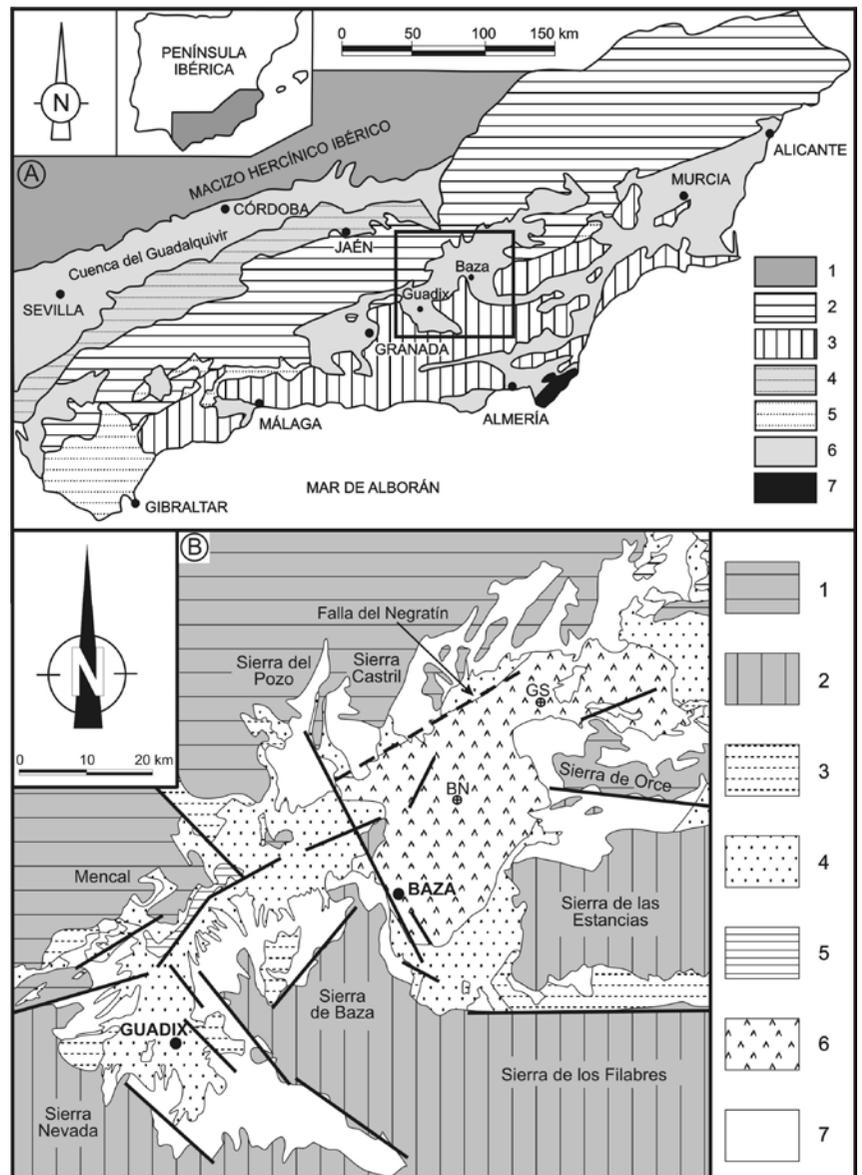


Figura 1. La cuenca de Guadix-Baza en el contexto de la Cordillera Bética y mapa geológico de las principales unidades que constituyen su relleno sedimentario. A: 1.- Macizo Hercínico Ibérico; 2.- Zona Externa; 3.- Zona Interna; 4.- Unidades olistostromáticas del Guadalquivir; 5.- Unidades *flyschs* del Campo de Gibraltar; 6.- Cuenclas sedimentarias neógenas; 7.- Vulcanismo neógeno de Sierra de Gata (Almería). B: 1.- Zonas Externas; 2.- Zonas Internas; 3.- Unidades sedimentarias marinas de edad Tortoniense; 4.- Formación Guadix; 5.- Formación Gorafe-Huélago; 6.- Formación Baza, 7.- Glacis superior. BN y GS.- Localización de las secciones de Benamaurel y Galera Sur, respectivamente.

Figure 1. The Guadix-Baza basin within the context of the Betic Cordillera and a geological map of the main units composing its sedimentary infilling. A: 1.- Iberian Plateau; 2.- External Zone; 3.- Internal Zone; 4.- Guadalquivir olistostrome units; 5.- Campo de Gibraltar *flysch* units; 6.- Neogene sedimentary basins, 7.- Neogene vulcanism at the Sierra de Gata (Almería). B: 1.- External Zone; 2.- Internal Zone; 3.- Tortonian marine sediments; 4.- Guadix Formation; 5.- Gorafe-Huélago Formation; 6.- Baza Formation; 7.- Upper glacis. BN and GS.- Location of the Benamaurel and South Galera sections respectively.

rel (BN) y sección de Galera Sur (GS). A partir de los datos de espesores obtenidos en estas secciones, se han realizado análisis espectrales mediante la transformada de Fourier y, en uno de ellos (BN), también se ha llevado a cabo análisis de autocorrelaciones. Igualmente, se aborda la interpretación genética de los distintos tipos de secuencias cíclicas observadas.

Metodología

Existen diversas metodologías que permiten analizar si una serie temporal muestra periodicidades, como se presume en los ciclos sedimentarios objeto de estudio en este trabajo. Entre ellas destacan el análisis de potencia espectral mediante transformada de Fourier y los métodos de autocorrelación (Davis, 1986). El análisis de potencia espectral (o función de densidad espectral), realizado mediante el programa CYSTRATI (Pardo-Igúzquiza *et al.*, 1994), consiste en ajustar una transformada de Fourier (aproximación de Blackman-Tukey) a las variables estratigráficas que configuran la serie temporal (en nuestro caso, litología y potencia de materiales por ciclo sedimentario, cuya distribución temporal a lo largo de la columna estratigráfica viene definida por los valores de tasa de sedimentación según dos marcas de máximo y mínimo posibles para este factor). Las variables estratigráficas se asimilan a una función aleatoria que toma los valores $Z(t)$ para los "t" puntos que configuran la sucesión temporal, asumiendo condiciones de ergodicidad y estacionaridad de segundo orden [esto es, el valor medio de las variables (m) se tiende a mantener constante a lo largo de la serie]. De esta forma, la covarianza del proceso se calcula mediante la siguiente ecuación, a partir del conjunto de datos (N) que integran la serie temporal $[z(i), i = 1, \dots, N]$:

$$C(k) = 1/N \sum_{i=1}^{N-k} [z(i)-m] [z(i+k)-m]$$

Lo que permite calcular entonces la potencia espectral según:

$$S(j) = 1/\pi [C(0) + \sum_{i=1}^{N-k} C(k) \cos(jk)],$$

donde $S(j)$ es la potencia espectral, que permite detectar la existencia de variaciones armónicas, de carácter periódico, a lo largo de la serie temporal analizada (para detalles adicionales, véase Pardo-Igúzquiza *et al.*, 1994).

El análisis de autocorrelación, por su parte, permite evaluar directamente la correlación que muestra la serie temporal consigo misma según desfases progresivos (*lags*) tomados desde su comienzo y final,

respectivamente. A estos efectos, se calcula el valor del coeficiente de correlación de Pearson para los valores de la serie entre los puntos "1" y "n-1" frente a los correspondientes al intervalo comprendido entre "2" y "n" (desfase o *lag* de un ciclo sedimentario), luego para los puntos de la serie situados entre "1" y "n-2" frente a los que conforman el intervalo entre "3" y "n", y así sucesivamente. Para llevar a cabo los análisis de autocorrelación se ha utilizado el programa PAST (Hammer *et al.*, 2011).

Contexto geológico

La cuenca de Guadix-Baza constituye una depresión intramontañosa neógena de unos 110 km de longitud, orientada en dirección NE-SO y situada en el interior de la Cordillera Bética (Fig. 1A), que se dispone cubriendo el contacto entre la Zona Interna y la Zona Externa. En esta cuenca se pueden distinguir dos sectores con sus respectivos depocentros y diferente evolución, los cuales caracterizan dos subcuencas (depresión de Guadix y depresión de Baza, Fig. 1B).

Desde el punto de vista del registro estratigráfico, esta cuenca destaca por la excelente calidad de exposición de los afloramientos, por la continuidad lateral y vertical de los mismos, y por la presencia de un gran número de yacimientos paleontológicos (Cuevas *et al.*, 1984; Ruiz Bustos *et al.*, 1984; Sesé, 1994; Martín Suárez, 1988; Alberdi y Bonadonna, 1989; Toro *et al.*, 2010, entre otros). Además, se dispone de numerosos estudios en los que se abordan aspectos sobre la estratigrafía, sedimentología, paleontología, tectónica y paleomagnetismo de la cuenca (Vera, 1970; Sebastián Pardo, 1979; Peña, 1985; Anadón *et al.*, 1986; Viseras, 1991; Sanz de Galdeano y Vera, 1992; Garcés, 1993; Guerra-Merchán, 1993; Soria, 1993; Anadón *et al.*, 1995; Oms *et al.*, 1996, 2000; García Aguilar, 1997, entre otros). Los importantes yacimientos paleontológicos pleistocenos han permitido establecer las condiciones paleoecológicas ligadas a los primeros asentamientos humanos de Europa occidental (Jiménez-Arenas *et al.*, 2011; Palmqvist y Arribas, 2001; Palmqvist *et al.*, 1996, 2005, 2011, entre otros).

En el relleno sedimentario post-orogénico de la cuenca se han diferenciado dos grandes conjuntos litológicos, separados por una discordancia angular reconocida en toda la cuenca (Vera, 1970; Rodríguez-Fernández, 1982; Viseras, 1991; Sanz de Galdeano y Vera, 1992; Guerra-Merchán, 1993; Soria, 1993; García Aguilar y Martín, 2000, entre otros). El más antiguo, de edad Tortoniense, muestra un espesor cercano a 1000 m y aflora de modo preferente en los bordes de la cuenca (Fig. 1B). Este conjunto está constituido prin-

principalmente por conglomerados, calcarenitas y margas, que representan el depósito de abanicos deltaicos y plataformas bioclásticas marinas. El conjunto más moderno está constituido por depósitos exclusivamente continentales, de edad Turolense superior-Pleistoceno superior, y presenta un espesor próximo a 600 m. Sus afloramientos ocupan la mayor parte de la cuenca y muestran desde el punto de vista litológico materiales correspondientes a tres formaciones tradicionalmente definidas, que cambian lateralmente de facies entre ellas (Fig. 1B): Formación Guadix (Von Drasche, 1879), de carácter aluvial-fluvial, concentrada en el sector occidental de la cuenca; Formación Gorafe-Huélago (Vera, 1970), de afinidad lacustre carbonatada; y Formación Baza (Vera, 1970), de carácter lacustre calizo y margoso-evaporítico, localizada en el sector oriental.

La aplicación de la metodología del análisis tectosedimentario (Megías, 1982) ha permitido diferenciar cinco unidades tectosedimentarias (UTS, Fig. 2) en el conjunto de las formaciones de Guadix y Baza, dentro de la depresión de Baza (García Aguilar, 1997; García Aguilar y Martín, 2000). De todas ellas, la UTS-III de edad Pleistoceno inferior, es la más compleja desde el punto de vista de su evolución lateral y vertical de facies. Durante esta etapa, el borde erosivo y tectónicamente activo corresponde al margen Sur (Sierra Nevada y Sierra de Baza), donde se situaron los abanicos aluviales (IIIa) que evolucionaron hacia sistemas fluviales (IIIb) y, finalmente, hacia lagos endorreicos someros de carácter evaporítico (IIIc) y carbonatado (IIId) que llegaron a ocupar la mayor parte de la depresión de Baza (~ 300 km²).

De todos los sistemas deposicionales de la UTS-III, el compuesto por margas, evaporitas y arenas de la parte baja del Pleistoceno inferior (unidad IIIc, Figs. 2 y 3) muestra unas excelentes condiciones de observación y unos rasgos sedimentológicos muy adecuados para el estudio de ciclos sedimentarios. Entre estos rasgos destacan unos límites temporales relativamente precisos, estimados entre 2.5 y 1.6 Ma AP según los datos paleomagnéticos y bioestratigráficos disponibles (Alberdi y Bonadona, 1989; Garcés, 1993; Anadón *et al.*, 1995; García Aguilar, 1997). En cuanto a su espesor, se observa una notable variación desde los bordes (60 m en los sectores de Galera y Baza) hacia el centro de la depresión, con espesores visibles de 240 m en el sector de Benamaurel. No obstante, los perfiles sísmicos de la zona permiten estimar un espesor cercano a 400 m. La elevada sedimentación registrada durante esta etapa se relaciona con una continua actividad tectónica extensiva de la cuenca, puesta en juego a través de fracturas N50-70°E y N150-170°E, entre las que destaca la falla del Negratín (Fig. 1), un importante accidente tectónico regional que forma parte del gran sistema de desgarre dextroso que atraviesa la Cordillera Bética en

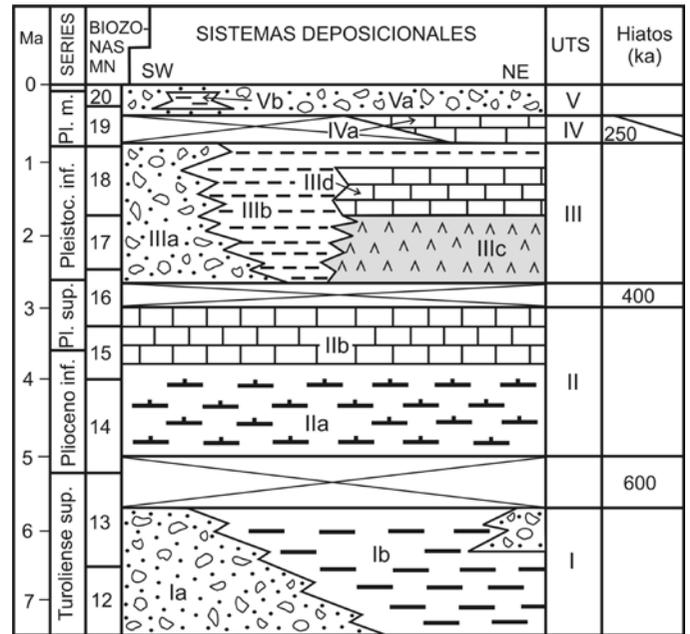


Figura 2. Esquema estratigráfico del relleno sedimentario continental de la cuenca de Guadix-Baza, basado en la delimitación de unidades tectosedimentarias (I, II, III, IV y V) y unidades de rango menor (sistemas deposicionales): Ia.- Sistema aluvial del Turolense superior; Ib.- Sistema lacustre del Turolense superior; IIa.- Sistema lacustre margoso del Plioceno inferior; IIb.- Sistema lacustre carbonatado del Plioceno inferior y base del Plioceno superior; IIIa.- Sistema aluvial del Pleistoceno inferior; IIIb.- Sistema fluvio-lacustre del Pleistoceno inferior; IIIc.- Sistema lacustre margoso-evaporítico del Pleistoceno inferior (parte baja); IIId.- Sistema lacustre carbonatado del Pleistoceno inferior (parte alta); IVa.- Sistema lacustre carbonatado del Pleistoceno medio; Va.- Sistema aluvial del Pleistoceno medio-superior; Vb.- Sistema fluvio-lacustre del Pleistoceno superior.

Figure 2. Stratigraphic scheme of the continental sedimentary infilling of the Guadix-Baza basin, based on the delimitation of tectono-sedimentary units (I, II, III, IV and V) and units of lower rank (depositional systems): Ia.- Late Turolian alluvial system; Ib.- Late Turolian lacustrine system; IIa.- Early Pliocene marly lacustrine system; IIb.- Early Pliocene-earliest Late Pliocene carbonate lacustrine system; IIIa.- Early Pleistocene alluvial system; IIIb.- Early Pleistocene fluvio-lacustrine system; IIIc.- lowermost Early Pleistocene marly-evaporitic lacustrine system; IIId.- uppermost Early Pleistocene carbonate lacustrine system; IVa.- Middle Pleistocene carbonate lacustrine system; Va.- Early-Middle Pleistocene alluvial system; Vb.- Late Pleistocene fluvio-lacustrine system.

dirección NE-SO. Otros rasgos presentes en la unidad, como la existencia de niveles de sismitas y *slumps*, son también resultado de esta actividad tectónica (García Aguilar, 1997; Alfaro *et al.*, 2000).

Resultados

Las secuencias estratigráficas

La unidad IIIc muestra una composición dominada por tres tipos de facies: i) margas claras, algo areno-

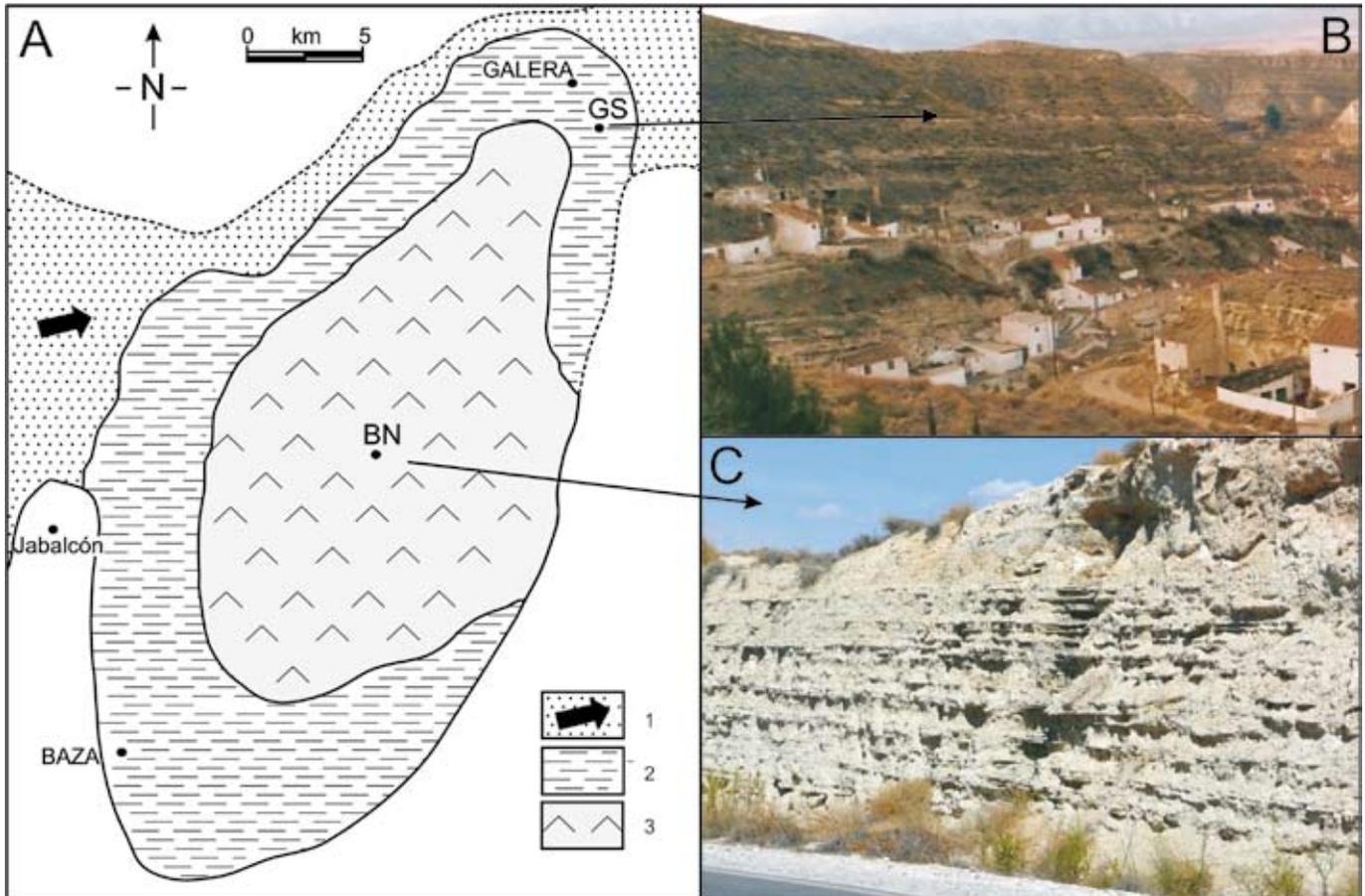


Figura 3. A. Esquema paleogeográfico de los depósitos lacustres del Pleistoceno inferior en la depresión de Baza. 1.- Sector de entrada en el sistema lacustre de flujos aluviales procedentes del Oeste; 2.- Secuencias cíclicas compuestas esencialmente por la alternancia de arenas y margas; 3.- Secuencias cíclicas compuestas esencialmente por la alternancia de margas y yeso. B. Depósitos lacustres en el sector marginal, compuestos por alternancias de arenas y margas (alrededores de Galera). C. Depósitos lacustres en el sector central, compuestos por alternancias de margas y yesos.

Figure 3. A. Palaeogeographic scheme of the early Pleistocene lacustrine deposits in the Baza basin. 1.- Input sector of alluvial fluxes from the west in the lacustrine system; 2.- Cyclic sequences composed mainly of alternations of marls and sands; 3.- Cyclic sequences composed mainly of alternations of marls and gypsum. B. Lacustrine deposits in the marginal sector, made up of alternations of sands and marls. C. Lacustrine deposits in the central sector, made up of alternations of marls and gypsum.

sas, con ostrácodos y cristales de yeso diseminados de pequeño tamaño; **ii**) arenas cuarzosas con apreciable contenido en micas oscuras de tamaño muy fino a medio con un alto grado de granoselección y abundantes estructuras internas de laminaciones cruzadas y *ripples*; y **iii**) niveles evaporíticos, compuestos por yeso bajo diversas variedades cristalinas, de tonos acaramelados, grises y blanquecinos.

Las asociaciones y evolución lateral de estas facies permiten diferenciar dos sectores en la depresión de Baza (Fig. 3A):

- Sector marginal. Caracterizado por el desarrollo de secuencias decimétricas, constituidas por la alternancia de margas de tonos claros y arenas amarillentas (Fig. 3B). La relación de espesores entre ambos estados es muy variable, situándose en valores entre 1:1 y 5:1 a favor de las margas.

- Sector central. Caracterizado por la alternancia de margas claras y yeso cristalino (Fig. 3C). De modo ocasional, se intercalan niveles de dolomías y lutitas oscuras. Los niveles de margas, con espesores hasta 25 cm, muestran cristales dispersos de yeso lenticular o en roseta y un contenido variable en arenas y ostrácodos. Los niveles suelen mostrar una densa laminación horizontal, del orden de 17 a 20 láminas por cm de espesor, aunque en algunos se aprecia bioturbación difusa y/o nódulos micríticos. Entre los niveles margosos se intercalan niveles de yeso cristalino transparente o con tonos acaramelados, con gran continuidad lateral y un espesor comprendido normalmente entre 1 y 6 cm. La relación de potencias entre capas sucesivas de estas dos litologías resulta muy variable, entre 1:1 y más de 20:1 a favor de las margas.

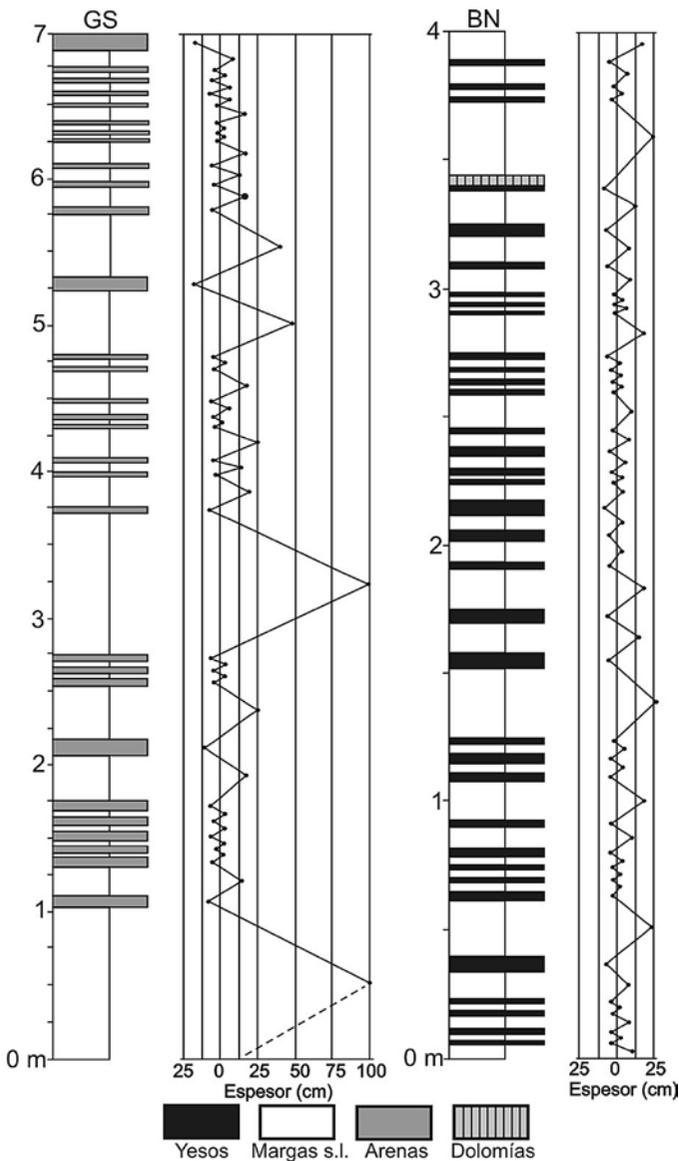


Figura 4. Secciones estratigráficas en las que se han realizado los análisis de ciclicidad. A la derecha de cada serie se ha representado la curva de evolución facies/potencia (en cm). La localización de las secciones aparece indicada en Figs 1 y 3.

Figure 4. Stratigraphic sections in which cyclicity analyses have been undertaken. The curves for the evolution of facies/thickness (in cm) appear on the right. The location of these sections is marked in Figs 1 and 3.

Análisis de la ciclicidad

Para la determinación de órdenes temporales de ciclicidad sedimentaria mediante análisis de Fourier se ha tenido en cuenta las tasas de sedimentación calculadas en esta unidad. Los datos bioestratigráficos y magnetoestratigráficos disponibles marcan unos límites temporales en la misma de 2.5 Ma para su base y 1.6 Ma para su techo. Asimismo, las potencias observadas oscilan entre 240 m en el sector central

de la depresión y 60 m en el sector marginal. Por otra parte, los perfiles sísmicos disponibles indican que el espesor máximo de la unidad en la zona de depocentro puede superar los 400 m. De este modo, las tasas de sedimentación asociadas a estos espesores oscilarían entre 6.7 cm/ka para las zonas marginales, 44.4 cm/ka para las zonas centrales según los espesores máximos posibles y 26.6 cm/ka para las zonas centrales si solo se tiene en cuenta los espesores máximos visibles.

Teniendo en cuenta los datos anteriores, se han analizado con alta resolución dos secciones representativas, una por cada uno de los dos sectores diferenciados en la unidad IIIc:

- i) Para el sector marginal se ha seleccionado la sección GS, situada al Sur de la localidad de Galera (Figs. 1 y 3). Esta sección presenta un espesor total de 702 cm de potencia (Fig. 4) a lo largo de los cuales aparecen 30 ciclos de potencia comprendida entre 2.5 y 112 cm. La tasa de sedimentación considerada para este sector marginal de la unidad (6.7 cm/ka) indicaría que la serie representa un periodo temporal cercano a 105 ka, correspondiendo a cada ciclo unitario unos 3.5 ka de duración. No obstante, dentro de algunos niveles arenosos se observan finas intercalaciones de margas, que podrían reflejar ciclos menores. De este modo, se han medido de 4 a 6 ciclos compuestos de la alternancia arena-marga con espesores de 0.8 a 0.9 mm que pudieran corresponder a ciclos centenarios.
- ii) La sección BN, representativa del sector central, se localiza en las proximidades de Benamaurel (Figs 1 y 3). La sección muestra un espesor de 16.5 m distribuidos en 153 ciclos de margas y yesos (en Fig. 4 solo se ha incluido una sección de 4 m, representativa del conjunto). Estos ciclos muestran espesores entre 1.3 y 110 cm, con una media de 10.8 cm. De acuerdo con las tasas de sedimentación consideradas para el sector central de la cuenca, esta serie representaría un periodo de tiempo total comprendido entre 37.2 y 62 ka, y cada ciclo litológico unitario entre 243 y 405 años.

Los resultados de los análisis espectrales mediante la transformada de Fourier ponen de relieve la recurrencia en la unidad de ciclos sedimentarios con distintos órdenes de magnitud, superpuestos según un patrón jerárquico, tal y como reflejan a su vez los perfiles estratigráficos (Fig. 5). Las frecuencias temporales asociadas a estos ciclos combinados se hallan entre 5.2 y 0.75 ka, destacando con una mayor potencia espectral las frecuencias de 5.2 ka, 3 ka, 2.0-1.7 ka y 0.75 ka, correspondientes respectivamente a

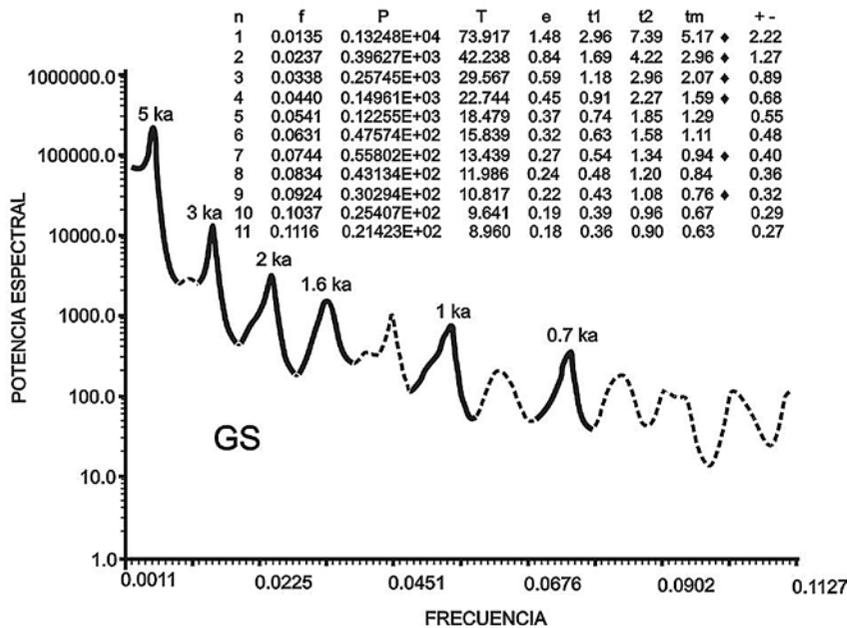
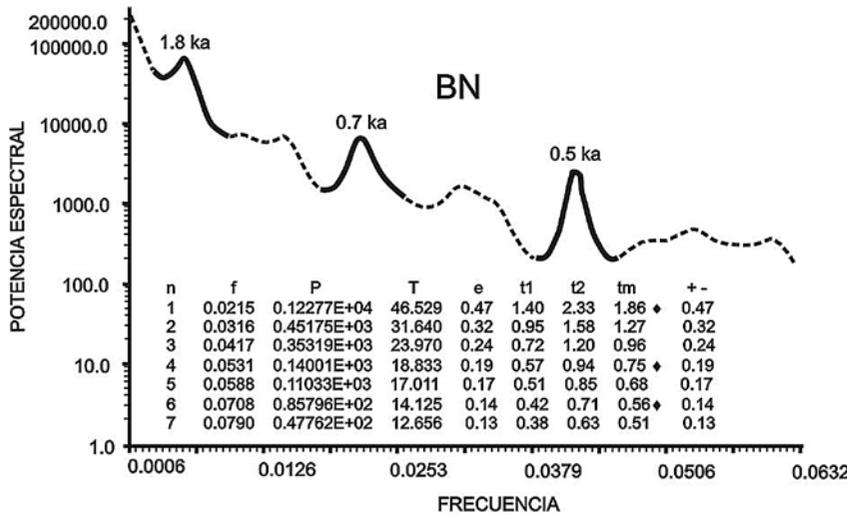


Figura 5. Resultados del análisis de la potencia espectral de las series de Benamaurel (BN) y Galera Sur (GS). El eje Y representa la potencia espectral relativa, mientras que el eje X representa las frecuencias de oscilación. Los picos señalados en negro corresponden a aquellos de mayor potencia espectral. La tabla de datos adjunta expone las siguientes constantes: n-número de orden; f-frecuencia; P-potencia espectral; T-periodo; e-espesor equivalente de los ciclos sedimentarios en metros; t1- primera estimación temporal en kiloaños (ka); t2- segunda estimación temporal en ka; tm-estimación temporal media en ka; + -, variación temporal en ka. Los picos marcados en la gráfica aparecen señalados en la tabla con un rombo.

Figure 5. Results of spectral power analysis for the Benamaurel (BN) and Galera Sur (GS) series. The Y-axis shows the relative spectral power and the X-axis the measurements of frequencies. The peaks marked in black are those with higher spectral power. The data-table shows the following constants: n-order number; f-frequency; P-spectral power; T-period; e-equivalent thickness in metres for the sedimentary cycles; t1-first temporal estimate, in ka; t2- second temporal estimate, in ka; tm- mean temporal estimate, in ka; + -, temporal estimate, in ka. The peaks marked in the graph are indicated in the table with a rhombus.

espesores sedimentarios promedio en los ciclos de 147, 84, 48 y 19 cm. Además de estos picos, aparecen otros con menor potencia espectral, equivalentes a frecuencias temporales de 1.3 ka, 1.1-0.9 ka, 0.7-0.5 ka y 0.4-0.3 ka, y espesores sedimentarios medios en los ciclos de 35, 27, 15 y 10 cm, respectivamente. Los ciclos sedimentarios menores de 10 cm de espesor se consideran los elementales, a la escala de afloramiento, de cara a definir las alternancias litológicas descritas en la unidad.

Los resultados de los autocorrelogramas obtenidos (Fig. 6) muestran la existencia de correlaciones estadísticamente significativas para la potencia de los niveles margosos con desfases en la columna estratigráfica de 4, 7, 11, 12 y 34 ciclos, lo que conforme a la tasa media

de sedimentación estimada para esta serie, correspondería a periodicidades en el depósito de estas litologías cada 1300, 2250, 3600, 3900 y 11000 años, aproximadamente. Tales valores son similares a los detectados mediante análisis espectral de la transformada de Fourier, con excepción del desfase ligeramente significativo a 11 ka, no registrado con esta metodología, el cual podría indicar una débil señal del ciclo menor de frecuencias de precesión orbital. En el caso de la potencia de los niveles yesíferos (Fig. 6), se aprecian autocorrelaciones directas y significativas con desfases comprendidos entre 5 y 9 ciclos sedimentarios, lo que equivale a repeticiones en su espesor que oscilan entre 1600 y 2900 años, aproximadamente. Además, se detecta un valor de autocorrelación negativa, muy

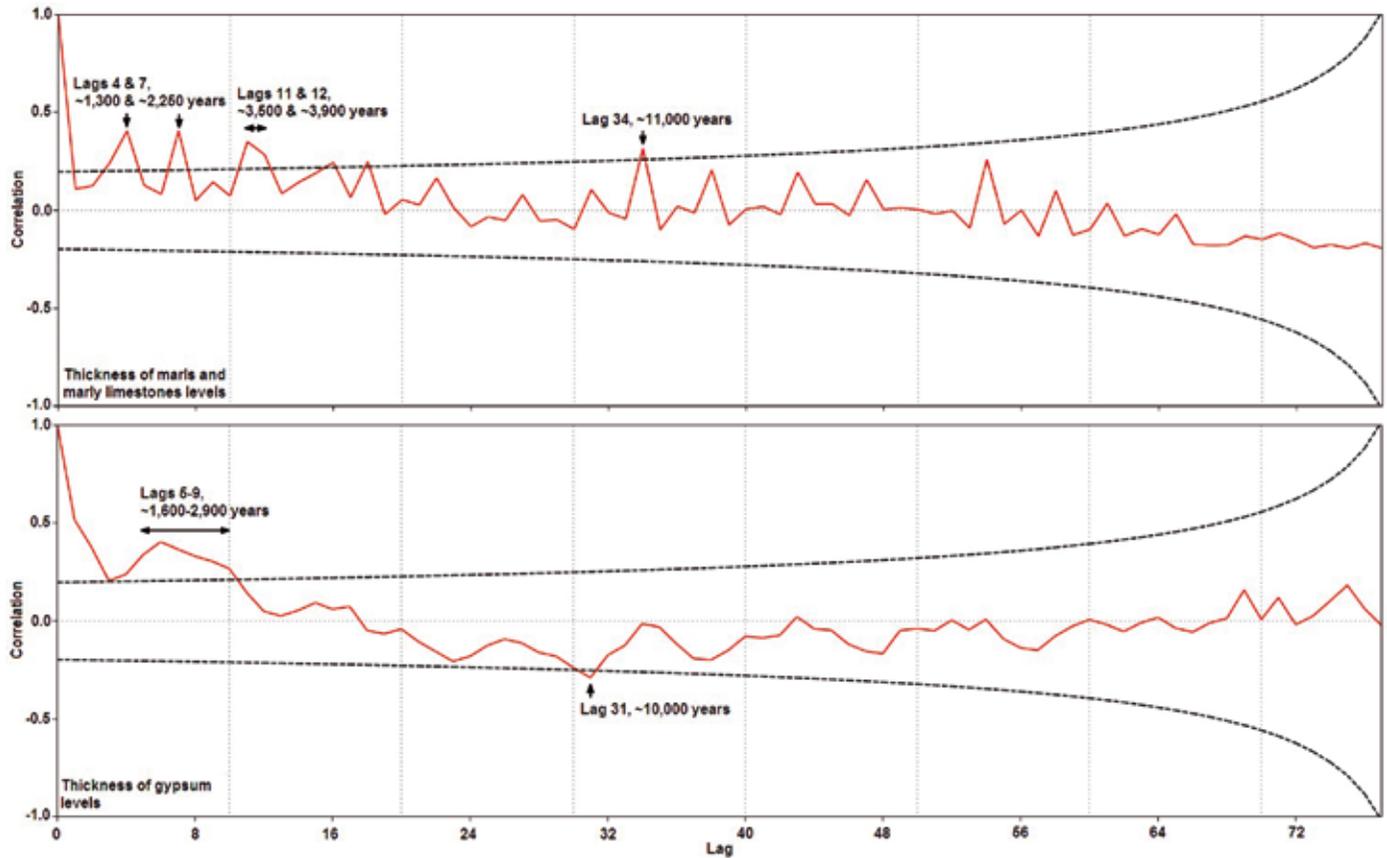


Figura 6. Resultados de los análisis de autocorrelación efectuados por separado sobre el espesor de los niveles margosos y evaporíticos alternantes en la sección de Benamaurel (BN). Las líneas discontinuas superior e inferior muestran los niveles de significación ($p < 0.05$) para los valores de correlación asociados a cada desfase o lag (línea continua). Se indican las correlaciones estadísticamente significativas y los años correspondientes a tales desfases.

Figure 6. Results of the autocorrelation analyses conducted separately on the thickness of the marly and evaporitic levels that alternate in the Benamaurel (BN) section. The dashed lines indicate confidence levels ($p < 0.05$) above and below the correlation value obtained for a given lag (solid line). Lags in years for those correlations that are statistically significant are marked.

débil y escasamente significativo, para un desfase de 31 ciclos, lo que correspondería a un ciclo en torno a 10 ka, tras el cual se revertirían las condiciones responsables del depósito de evaporitas.

Discusión

Pese a los márgenes de variación considerados en el cálculo de los valores temporales de ciclicidad, debido sobre todo, a los espesores totales considerados, parece probable que los ciclos litológicos de menor escala (entre 1 y 10 cm de espesor) se produjeron en intervalos de tiempo comprendidos entre 200 y 500 años, mientras que los ciclos de mayor escala (entre 15 y 147 cm de espesor) corresponderían a periodos de tiempo entre 500 y 5 170 años.

Ciclos del orden de centenares de años fueron descritos por Patterson *et al.* (2004) en sedimentos marinos, cuya génesis asociaron a ciclicidad climática de origen

astronómico. Estos ciclos estarían originados por oscilaciones en las tasas de radiación solar y cósmica que ocasionarían alternancias de periodos húmedos y secos con una periodicidad comprendida entre 400 y 600 años. Estos mismos autores invocaron una ciclicidad casi-periódica comprendida entre 190 y 500 años en la tasa de producción de ^{14}C , sugiriendo que las variaciones solares son un factor de control principal en los cambios climáticos. Einsele *et al.* (1991) también citaron ciclos climáticos de frecuencias comprendidas entre 105 y 420 años para este mismo factor.

Otros estudios (Haigh, 1994; Mann *et al.*, 1995; Soon *et al.*, 1996; Svensmark, 1998; Bond *et al.*, 2001) han mostrado que estos factores astronómicos pueden causar variaciones climáticas terrestres con periodicidades agrupadas en dos tramos: ciclos de escala centenaria (200–500 años) y ciclos de escala milenaria (1000–1500 años), esta última denominada como “frecuencia de ciclos de Bond” (Bond *et al.*, 2001). Estas dos bandas de periodicidades pueden ser co-

rrelacionadas con las deducidas para la sedimentación lacustre del Pleistoceno inferior en la cuenca de Baza.

Otras frecuencias de alta potencia espectral encontradas en los análisis de esta unidad están comprendidas entre 5.2 y 2.0-1.7 ka. Frecuencias equivalentes se han asociado a factores astronómicos relacionados con la interfase Tierra-Luna y la aparición de mareas (Einsele *et al.*, 1991; Keeling y Whorf, 2000). En este sentido, se propone una explicación para los ciclos climáticos de escala milenaria, basada en variaciones casi-periódicas en el rango y la fuerza de mareas globales oceánicas causadas por resonancias en los movimientos periódicos de la Tierra y la Luna. El ciclo mareal de 1800 años se asocia a un desplazamiento gradual de la declinación lunar, mientras que la modulación de la amplitud de este ciclo, con un periodo cercano a 5000 años, se asocia a desplazamientos graduales en los intervalos entre el perihelio y el afelio lunar (Einsele *et al.*, 1991). De este modo, las fuerzas de marea causarían el enfriamiento en la superficie oceánica por incrementos en la mezcla vertical de aguas, con consecuencias climáticas globales. Una alternativa genética a los ciclos climáticos de frecuencia cercana a 1500 años se ha asociado a cambios en los parámetros oceánicos globales a partir de fenómenos similares a "El Niño", manifestados en la aparición de periodos secos con esta frecuencia (Turney *et al.*, 2004).

Por consiguiente, se puede asociar la existencia de ciclos sedimentarios elementales margas- evaporitas o arenas-margas de edad Pleistoceno inferior, presentes en la depresión de Baza, a periodos cíclicos de distinta aridez. Estos periodos de mayor aridez habrían estado gobernados por oscilaciones casi-periódicas globales en los niveles de radiación solar, con una frecuencia temporal comprendida entre 200 y 500 años. Se pone de relieve, además, la presencia de ciclos sedimentarios combinados de mayor espesor y duración (de 1000 a 5000 años) marcados a su vez por episodios de desecación en cuyo origen habrían intervenido cambios en las posiciones relativas de la Tierra y la Luna, cuya influencia habría desencadenado nuevas modificaciones climáticas a escala global, a los que podrían sumarse los efectos débiles de una ciclicidad de mayor escala, entre 10 y 11 ka, lo que denotaría una leve influencia en estos depósitos del factor astronómico de precesión.

Conclusiones

La cuenca neógena de Guadix-Baza presenta en su sector oriental una unidad sedimentaria de edad

Pleistoceno inferior, originada en un escenario sedimentario de tipo lacustre evaporítico (*playa-lake*). Esta unidad se caracteriza por presentar una elevada tasa de sedimentación, con espesores visibles de 240 metros y un espesor total de 400 m puesto de relieve mediante perfiles sísmicos. En combinación con lo anterior, la presencia de numerosos ciclos sedimentarios de diferente espesor y complejidad, marcados por la superposición de dos tipos de facies (margas y yeso o margas y arenas) le confiere a la unidad un especial interés de cara al estudio de la ciclicidad climática. Tales facies serían indicativas, respectivamente, de dos escenarios de sedimentación diferentes en un lago salino somero: episodios de inundación permanente del medio que alternarían con episodios en los que serían frecuentes los procesos de desecación parcial o total y reinundación subsiguiente.

Los cálculos numéricos efectuados en base al análisis de series estratigráficas de alta resolución, los valores de tasa de sedimentación deducidos mediante los valores de espesor de la unidad y sus límites geocronológicos, así como los resultados derivados de la realización de análisis espectrales mediante la transformada de Fourier y autocorrelogramas, revelan la existencia de ciclos sedimentarios de diversa escala temporal. Los ciclos de menor escala (entre 1 y 10 cm de espesor) y carácter elemental, presentan un periodo de recurrencia entre 200 y 500 años, mientras que los de mayor escala (entre 15 y 147 cm de espesor), compuestos por la suma de ciclos elementales, presentan frecuencias temporales entre 500 y 5170 años. De acuerdo con las propuestas disponibles sobre ciclicidad climática, parece probable que: I) los ciclos de escala centenaria (entre 190 y 500 años) estén gobernados por oscilaciones en los niveles de radiación solar que propiciarían periodos de mayor aridez; y II) los ciclos de escala milenaria (entre 1000 y 5000 años) podrían estar gobernados por cambios orbitales en el sistema Tierra-Luna, que inducirían cambios globales oceánicos y, como resultado de los cuales, se habrían generado episodios de mayor aridez en el clima general de la Tierra.

Agradecimientos

Trabajo realizado en el marco del proyecto de investigación CGL2008-04896 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, y del Grupo de Investigación RNM-146 de la Junta de Andalucía. Queremos mostrar nuestro agradecimiento a los revisores, cuyas aportaciones y sugerencias han significado una notable mejora del manuscrito.

Referencias

- Alberdi, M.T. and Bonadonna, F.P. (eds.). 1989. *Geología y Paleontología de la cuenca de Guadix-Baza*. Museo Nacional de Ciencias Naturales. CSIC, Madrid. *Trabajos sobre el Neógeno Cuaternario*, 11, 355 pp.
- Alfaro, P., Estévez, A., Moretti, M. and Soria, J.M. 2000. Estructuras sedimentarias de deformación en el Mioceno superior-Cuaternario de la Cordillera Bética. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (1), 79-89.
- Anadón, P., De Deckker, P. and Juliá, R. 1986. The Pleistocene lake deposits of the NE of Baza basin (Spain): salinity variation and ostracod succession. *Hydrobiologia*, 143, 199-208.
- Anadón, P., Utrilla, R. and Juliá, R. 1995. Palaeoenvironmental reconstruction of a pleistocene lacustrine sequence from faunal assemblages and ostracode shell geochemistry. Baza basin, SE Spain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 111, 191-205.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I. and Bonani, G. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science*, 294, 2130-2136.
- Covey, C. 1984. Órbita terrestre y periodos glaciares. *Investigación y Ciencia*, 91, 30-39.
- Cuevas, F., Martín-Penela, A., Rodríguez-Fernández, J., Sanz de Galdeano, C. and Vera, J.A. 1984. Premierè datation du Tolutien à la base de la formation de Guadix (Secteur D'Abla, Almería. Espagne). *Geobios*, 17 (3), 355-361.
- Davis, J. 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, New York, 656 pp.
- De Boer, P.L. and Smith, D.G. (eds.). 1994. *Orbital forcing and cyclic sequences*. Blackwell Science. International Association of Sedimentologists, Special Publication, 19, 287 pp.
- Einsele, G. 1992. *Sedimentary basins. Evolution, facies and sediment budget*. Springer-Verlag, Berlin, 628 pp.
- Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A. (eds.). 1991. *Cycles and events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 955 pp.
- Fischer, A.G. 1986. Climatic rhythms recorder in strata. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 14, 351-376.
- Garcés, M. 1993. *Magnetoestratigrafía de los sedimentos lacustres pliocenos de la sección de Galera (Cuenca de Guadix-Baza, Cordilleras Béticas)*. Tesis de Licenciatura, Universidad de Barcelona (inédita), 131 pp.
- García Aguilar, J.M. 1997. *La cuenca de Guadix-Baza (Granada): evolución geodinámica y sedimentaria de los depósitos lacustres entre el turolense superior y el pleistoceno*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada (inédita), 532 pp.
- García-Aguilar, J.M. and Martín, J.M. 2000. Late neogene to recent continental history and evolution of the Guadix-Baza basin (SE Spain). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 13 (1), 65-77.
- García-Aguilar, J.M. & Palmqvist, P. 2011. A model of lacustrine sedimentation for the Lower Pleistocene deposits of Guadix-Baza basin (southeast Spain). *Quaternary International*, 243, 3-15.
- Guerra-Merchán, A. 1993. *La cuenca neógena del corredor del Almanzora*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Ediciones Edinford S.A., Málaga, 237 pp.
- Haigh, J.D. 1994. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. *Nature*, 370, 544-546.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T. and Ryan, P.D. 2011. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4, 9 pp.
- Jiménez-Arenas, J.M., Santonja, M., Botella, M. and Palmqvist, P. 2011. The oldest handaxes in Europe: fact or artefact? *Journal of Archaeological Science*, 38, 3340-3349.
- Keeling, C.D. and Whorf, T.P. 2000. The 1800-year oceanic tidal cycle: A possible cause of rapid climate change. *Proceedings of The National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*, 97 (8), 3814-3819.
- Mann, M.E., Park, J. and Bradley, R.S. 1995. Global interdecadal and century-scale climate oscillations during the past five centuries. *Nature*, 378, 266-270.
- Martín Suárez, E. 1988. *Sucesiones de micromamíferos en la depresión de Guadix-Baza (Granada, España)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada (inédita), 251 pp.
- Megías, A.G. 1982. Introducción al análisis tectosedimentario: aplicación al estudio dinámico de cuencas. *Actas V Congreso Latinoamericano de Geología*, Buenos Aires, 1, 385-402.
- Mein, R. 1975. Biozonation du Néogene Méditerranéen a partir des Mammifères. *IUGS. RCMNS. Report on Activity of the RCMNS working groups*, Bratislava, 78-81.
- Milankovitch, M. 1920. *Theorie Mathématique des Phénomènes Thermiques produits par la Radiation Solaire*. Gauthier-Villars, Paris, 340 pp.
- Milankovitch, M. 1941. Kanon der Erbdestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeit-problem. *Royal Serbian Academy Special Publications*, 133, 1-633.
- Oms, O., Dinarés Turell, J. and Parés, J.M. 1996. Resultados paleomagnéticos iniciales de la sección Plio-pleistocena de Fuente Nueva (Cuenca de Guadix-Baza, Cordilleras Béticas). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 9 (1-2), 89-95.
- Oms, O., Parés, J.M., Martínez-Navarro, B., Agustí, J., Toro, I., Martínez-Fernández, G. and Turq, A. 2000. Early human occupation of Western Europe: paleomagnetic dates for two paleolithic sites in Spain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 97, 10666-10670.
- Palmqvist, P. and Arribas, A. 2001. Taphonomic decoding of the paleobiological information locked in a lower Pleistocene assemblage of large mammals. *Paleobiology*, 27, 512-530.
- Palmqvist, P., Martínez-Navarro, B. and Arribas, A. 1996. Prey selection by terrestrial carnivores in a lower Pleistocene paleocommunity. *Paleobiology*, 22, 514-534.
- Palmqvist, P., Martínez-Navarro, B., Toro, I., Espigares, M.P., Ros-Montoya, S., Torregrosa, V. and Pérez-Claros, J.A. 2005. A re-evaluation of the evidence of human presence during Early Pleistocene times in southeastern Spain. *L'Anthropologie*, 109, 411-450.
- Palmqvist, P., Martínez-Navarro, B., Pérez-Claros, J.A., Torregrosa, V., Figueirido, B., Jiménez-Arenas, J.M., Patrocínio-Espigares, M., Ros-Montoya, S. and De Renzi, M. 2011. The giant hyena *Pachycrocuta brevirostris*: modelling the bone-cracking behavior of an extinct carnivore. *Quaternary International*, 243, 61-79.

- Pardo-Igúzquiza, E., Chica Olmo, M. and Rodríguez Tovar, J. 1994. CYSTRATI: a computer program for spectral analysis of stratigraphic successions. *Computer & Geosciences*, 20 (4), 511-584.
- Patterson, T.R., Prokoph, A. and Chang, A. 2004. Late Holocene sedimentary response to solar and cosmic ray activity influenced climate variability in the NE Pacific. *Sedimentary Geology*, 172, 67-84.
- Peña, J.A. 1985. La depresión de Guadix-Baza. *Estudios Geológicos*, 41, 33-46.
- Pla-Pueyo, S., Viseras, C., Soria, J.M., Garcés, M. and Arribas, A. 2008. Análisis preliminar de la ciclicidad en la sección continental FP-1 (Plioceno-Pleistoceno, Cuenca de Guadix, Cordillera Bética). *Geogaceta*, 44, 215-218.
- Pla-Pueyo, S., Viseras, C., Tent Manclús, J.E., Soria, J.M. and Arribas, A. 2011. A stratigraphic framework for the Pliocene Pleistocene continental sediments of the Guadix Basin (Betic Cordillera, S. Spain). *Quaternary International*, 243, 16-32.
- Rodríguez-Fernández, J. 1982. *El Mioceno del sector central de las Cordilleras Béticas*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 224 pp.
- Ruiz Bustos, A., Sesé, C., Dabrio, C., Peña, J.A. and Padiál, J. 1984. Geología y fauna de micromamíferos del nuevo yacimiento del Plioceno inferior de Gorafe-A (Depresión de Guadix-Baza, Granada). *Estudios Geológicos*, 40, 231-241.
- Sanz de Galdeano, C. and Vera, J.A. 1992. Stratigraphic record and palaeogeographical context of the Neogene basins in the Betic Cordillera, Spain. *Basin Research*, 4, 21-36.
- Sebastián Pardo, E. 1979. *Mineralogía de los materiales plio-pleistocenos de la depresión de Guadix-Baza*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 311 pp.
- Sesé, C. 1994. Palaeoclimatical interpretation of the Quaternary small mammals of Spain. *Geobios*, 27 (6), 753-767.
- Soon, W.H., Posamentier, E.S. and Baliunas, S.L. 1996. Inference of solar irradiance variability from terrestrial temperature changes, 1880–1993: an astrophysical application of the Sun–climate connection. *Astrophysic Journal*, 472, 891-902.
- Soria, J.M. 1993. *La sedimentación neógena entre Sierra Arana y el río Guadiana menor. Evolución desde un margen continental hasta una cuenca intramontañosa*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 291 pp.
- Svensmark, H. 1998. Influence of cosmic rays on Earth's climate. *Physical Review Letters*, 81, 5027-5030.
- Toro, I., Martínez-Navarro, B. and Agusti, J. (eds). 2010. *Ocupaciones humanas en el Pleistoceno inferior y medio de la cuenca de Guadix-Baza*. Arqueología monografías. Consejería de Cultura, Junta de Andalucía, Sevilla, 582 pp.
- Turney, C.S.M., Kershaw, A.P., Clemens, S.C., Branch, N., Moss, P.T. and Fifield, L.K. 2004. Millennial and orbital variations of El Niño/Southern Oscillation and high-latitude climate in the last glacial period. *Nature*, 428, 306-309.
- Vail, P.R., Audemard, F., Bowman, S. A., Eisner, P.N. and Pérez-Cruz, G. 1991. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentation. In: Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A. (eds.), *Cycles and Events in Stratigraphy*. Springer-Verlag, Berlin, 617-659.
- Vera, J.A. 1970. Estudio estratigráfico de la depresión de Guadix-Baza. *Boletín del Instituto Geológico y Minero de España*, 81, 429-462.
- Viseras, C. 1991. *Estratigrafía y sedimentología del relleno aluvial de la cuenca de Guadix (Cordilleras Béticas)*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada, 327 pp.
- Von Drasche, R. 1879. Bosquejo geológico de la zona superior de Sierra Nevada. *Boletín de la Comisión del Mapa Geológico de España*, 6, 353-388.

Recibido: octubre 2012

Revisado: enero 2013

Aceptado: febrero 2013

Publicado: abril 2013

