

Análisis de la periodicidad climática de baja frecuencia registrada en los sedimentos lacustres del Grupo Enciso (Cretácico Inferior de la cuenca de Cameros, La Rioja): Aplicaciones a la correlación y datación de la serie

A. Angulo y A. Muñoz

Dpto. Ciencias de la Tierra. Universidad de Zaragoza. c/ Pedro Cerbuna, 12. 50009 Zaragoza, Spain
anaangulo@outlook.com; armunoz@unizar.es

RESUMEN

En los depósitos sinrift del Cretácico Inferior de la cuenca de Cameros (Grupo Enciso) se han caracterizado 7 facies ligadas a tres subambientes sedimentarios: fluvial, lago siliciclástico y lago carbonatado, a partir de un perfil de 996 m integrado por 74 ciclos. Las facies se han analizado mediante la metodología de las cadenas de Markov lo que ha permitido identificar tres secuencias tipo ligadas a los subambientes sedimentarios reconocidos. Tomando como referencia las relaciones entre facies se ha elaborado un modelo sedimentológico con la posición relativa de cada facies respecto a la línea de costa lacustre, a partir del cual se ha construido una serie de tiempo semicuantitativa basada en rangos de profundidad, que ha sido analizada con los programas REDFIT y Wavelet. Los resultados del análisis espectral de esta serie de tiempo muestran la presencia de ciclos sedimentarios periódicos atribuibles a las frecuencias de Milankovitch. Los máximos del espectro, con valores que superan la banda de confianza del 99%, tienen periodos de 90.56 m, 16.66 m, 7.14 m, 5.37 m y 3.93 m. El ciclo sedimentario de 16.66 m se ha correlacionado con el de excentricidad corta y es el que con mayor facilidad se identifica sobre el terreno, por lo que constituye la base del análisis secuencial. La tasa de sedimentación calculada para el Grupo Enciso es de 175 m/Ma y su sedimentación abarca un intervalo temporal de aproximadamente 6 Ma, extendiéndose desde el techo del Hauteriviense hasta la parte central del Aptiense.

Palabras clave: análisis espectral, ciclo sedimentario, cretácico inferior, cuenca de Cameros, paleoclima

Analysis of low-frequency climate periodicity in lacustrine sediments from the Enciso Group (Lower Cretaceous, Cameros basin, La Rioja, Spain) and its application to the correlation and dating of the series

ABSTRACT

We have characterized seven facies linked to three sedimentary environments: distal riverine, siliciclastic lacustrine and carbonate lacustrine, in the Lower Cretaceous syn-rift deposits in the Cameros basin (Enciso Group). The analysis was conducted on a 996-metre-thick series consisting of 74 sedimentary cycles. The facies were analysed using the Markov chains method. We identified three type-sequences linked to the recognised sedimentary environments. By studying the relationships between the facies we were able to develop a sedimentological model, with the relative position of each facies related to the lake shoreline. From this model we could construct a time series based on semi-quantitative depth (depth rank) and analyse it with the Wavelet and REDFIT programs. Spectral analysis identified periodic sedimentary cycles comparable to Milankovitch frequencies. The results show power-spectrum maxima (confidence level >99%) at 90.56 m, 16.66 m, 7.14 m, 5.37 m and 3.93 m. The sedimentary cycle interpreted as short eccentricity (16.66 m) is the most easily identifiable in the outcrop and constitutes the basis of our sequential analysis. The accumulation rate calculated for the Enciso Group is 175 m/Ma. Sedimentation of the Enciso Group at the Munilla section covers a time span of about 6 Ma, from the Upper Hauterivian to the the Middle Aptian.

Key words: Cameros basin, lower cretaceous, palaeoclimatology, sedimentary cycle, spectral analysis.

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and methods

Lacustrine systems are excellent indicators of environmental conditions and the influence of tectonic factors. The Enciso Group (Lower Cretaceous, Cameros Basin, Spain, see Fig. 1) is built up of metric and decametric cycles which have been related by different authors to orbital climate forcing.

The main goal of this work has been to distinguish climate signals in the sedimentation of a tectonically active extensional basin. The method used was spectral analysis of a time series based on the depth rank assigned to different facies. This allowed us to estimate the time span and average accumulation rate of a continental series containing biostratigraphic and magnetostratigraphic data of very low resolution. The work also pursues the development of a palaeoenvironmental and palaeoclimatic model for the Enciso Group.

Our work focuses upon a section of the Enciso Group in Munilla (Fig. 2). It is 996 m thick and composed of 74 cycles, which have provided the basis for the identification of facies and sequences, the construction of a time series and a sedimentological and palaeoclimatic interpretation.

Results and discussion

In the Munilla section we have distinguished seven facies (a to g), the lithological and textural descriptions of which, together with their interpretation, are summarized in Table 1. From a facies analysis following the Markov chain method (Table 2) we were able to characterize three type-sequences (Fig. 3) and from the interpretation of these type-sequences we have generated an integrated model for distal fluvial sub-environments associated with siliciclastic lakes (Fig. 4a) or with carbonate lakes (Fig. 4b). The model shows the position of the facies related to the lake shoreline, which has been used to construct the time series for the spectral analysis.

On the basis of the identified cycles we calculated a weighted depth index as a function of facies thickness and the depth rank assigned to each (from 0 = fluvial facies to 9 = deep lacustrine facies, see Fig. 4). The variation in the depth index versus time (Fig. 5) shows that the sedimentary environment gets deeper from the base of the series to a relative maximum in cycle 35. After a brief period of marked shallowness a gradual deepening appears until cycle 50, in which the highest value occurs. Finally, the curve shows rapid shallowing, a process that continues to the top of the section, at which point fluvial facies are more frequent.

Fig. 6 shows the differences in thickness of each cycle compared to the average thickness calculated for the whole section. There are two intervals during which accommodation space in the basin grows quickly (cycles 13 to 16 and 32 to 37, with a new reactivation at the top of the section). These intervals during which maximum accommodation space is created are separated by long intervals where it decreases gradually. The lack of periodicity in the repetition of these sudden increases in accommodation space may be related to abnormally high subsidence stages.

From the depth rank established for each facies (see model in Fig. 4) after removing the covered intervals we have constructed a time series of 967 data (Fig. 7). Spectral analysis of the time series was conducted using the spectral-analysis programs REDFIT and Wavelet, included within the PAST software. We also applied a Bonferroni-type test to ensure that our analysis was protected from false positives (Fig. 8). A REDFIT spectral analysis was conducted on a time series split into 3 segments overlapping by 50% and a rectangular window. The time series was fitted to an AR(1) red noise model. This analysis revealed five maxima for regular sedimentary cycles: at 90.56 m, 16.66 m, 7.14 m, 5.37 m and 3.93 m, four of which exceed the 99% confidence level (Fig. 9a). To check the reliability of these periodic cycles we undertook a parallel analysis of the time series using a Monte Carlo simulation to calculate the confidence bands. The result is shown in Figure 9b, where all the cycles exceed the 99% confidence level. The time series was also analysed using a continuous wavelet transform (Fig. 10).

Table 3a shows the relationship between the maximum periods found in the spectral analysis of the time series, and Table 3b the maxima and their relationship with Milankovitch (1941) periods calculated from the eccentricity, obliquity and precession curves (Laskar et al., 2004) for the time interval -118 to -110 Ma. Comparative analysis of the values was fundamental to identifying and correlating the cycles found in our analysis with Milankovitch frequencies and, consequently, for the timing of the series.

According to our interpretation, the basic cycle of 16.66 m corresponds to the short eccentricity cycle (94.8 ka) and the 90.56 m cycle represents the long eccentricity one (405 ka), whilst 7.14 m would represent the obliquity effect (37.1 ka). Finally, 5.37 m and 3.93 m cycles correspond to the two main modes of the precession cycle. Thus, on the basis of our interpretation, all the periodic cycles identified in the Enciso Group correspond to frequencies described by Milankovitch. The calculated sedimentation rates (16.66 meters at 94.8 ka) provide values of 175 m/Ma. From this average accumulation rate, and taking into account the thickness of the section (996 m), the estimated time span for the sedimentation of the Enciso Group in Munilla is about 5.7 Ma.

One of the objectives of our work was to further our understanding of the dating of this unit. The depth index curve established for the Enciso Group (Fig. 5) and the eustatic variation curve drawn by Haq et al. (1988) (Fig. 11) correlate closely and this would appear to confirm the existence of eustatic control on the lake base level during the sedimentation of this unit. According to the correlation established, the sedimentation of the Enciso Group began during the Upper Hauterivian and ended around the Middle Aptian. This correlation provides a time span of 5.9 Ma for the Enciso Group in the Munilla section, which is very similar to that obtained by spectral analysis (5.7 Ma). We did not, however, find any unequivocal agreement between Haq's eustatic variations curve (Haq et al., 1988) and the depth index curve (Fig. 5) and so a more precise control of the timeline of the series is required.

Introducción

Los medios lacustres son excelentes indicadores de las condiciones medioambientales y de su evolución temporal, ya que los sedimentos generados responden a los cambios en los factores climáticos. Estos cambios quedan archivados a diferentes escalas de tiempo a través de variaciones en el aporte sedimentario y la producción primaria de materia orgánica y carbonato biogénico, que se manifiestan por modificaciones en diferentes parámetros (*proxies*) tales como litología, textura, y color. Mediante el estudio de estos sedimentos se pueden reconocer, además, la influencia de los factores tectónicos existentes en la región, cuyos efectos interfieren y pueden incluso enmascarar la influencia del clima.

El Grupo Enciso (Cretácico Inferior de la cuenca de Cameros) presenta ciclos de escala métrica y decamétrica. Este tipo de ciclicidad ha sido relacionada por diferentes autores con forzamiento climático de origen orbital (Olsen, 1986; Glenn and Kelts, 1991; Olsen and Kent, 1996; Van Vugt *et al.*, 1998; Abdul-Aziz *et al.*, 2000; Hofmann *et al.*, 2000; Steenbrink *et al.*, 2000; Soria *et al.*, 2012), aunque también existen trabajos donde se asocia con actividad tectónica (Anadón *et al.*, 1991; Martel and Gibling, 1991; Paz and Rossetti, 2005). En trabajos previos sobre sistemas lacustres someros del Grupo Oncala (cuenca de Cameros) Gómez-Fernández and Meléndez (1994) relacionan este tipo de ciclos con expansiones y retracciones de la superficie lacustre debidas a cambios climáticos.

En este sentido, y debido a sus características específicas, el sistema lacustre que se desarrolló durante el Cretácico Inferior en la cuenca de Cameros, plantea una serie de posibilidades extraordinarias en relación con la reconstrucción paleoambiental durante este periodo. Resulta evidente que los resultados del estudio que se propone en este trabajo, aunque tengan carácter local, constituyen una pieza importante en la reconstrucción paleoambiental del NE peninsular durante el Hauteriviense-Aptiense.

El objetivo principal es discriminar las señales climáticas en la sedimentación de una cuenca extensional tectónicamente activa sobre la base de un análisis

espectral basado en el rango de profundidad asignado a diferentes facies. Esto permite estimar el intervalo de tiempo y la velocidad de sedimentación promedio de una serie continental con muy baja resolución de datos bioestratigráficos y escasa o nula calibración magnetoestratigráfica.

También se persigue la elaboración de un modelo de evolución paleoambiental y paleoclimática durante el Cretácico Inferior, concretamente entre el Hauteriviense superior y el Aptiense, en el área del Camero Viejo a partir del estudio de los depósitos lacustres del sector de Munilla (La Rioja). El modelo propuesto incluirá datos paleoambientales referidos a: (i) identificación de secuencias paleoclimáticas cíclicas de alta frecuencia y su interpretación sedimentológica, (ii) caracterización de secuencias paleoclimáticas cíclicas de baja frecuencia y (iii) sintonización (*tuning*) de los ciclos de baja frecuencia con la curva eustática de Haq *et al.*, (1988) lo que permitirá avanzar en los procesos de correlación y datación de la serie y en el cálculo de las tasas de sedimentación.

Metodología

Los materiales lacustres son adecuados para este tipo de estudios ya que se desarrollan (aunque no son inmunes a sus efectos) en los momentos de mínima actividad tectónica y, por tanto, la señal climática no está enmascarada por la componente tectónica que, generalmente, tiene una mayor influencia sobre la sedimentación.

El trabajo está basado en un perfil levantado en el Grupo Enciso, en los alrededores de la localidad de Munilla. Para tener una buena resolución en cuanto a tipos de facies y espesor de las mismas, el perfil se ha levantado de forma detallada (a escala 1:200). Posteriormente se han caracterizado las facies y se han establecido las secuencias tipo, a partir de las cuales se ha elaborado una serie de tiempo semicuantitativa (rango de profundidad) que se ha procesado con los programas de análisis espectral REDFIT (Schulz and Mudelsee, 2002) y Wavelet (Torrence and Compo, 1998) integrados en el software PAST (PAleontologi-

cal STatistics V. 2.15; Hammer *et al.*, 2001). A partir de las relaciones entre las periodicidades obtenidas se ha realizado la asignación a las diferentes frecuencias de Milankovitch (1941). Por último, se ha procedido a la sintonización con la curva eustática de Haq *et al.*, (1988) lo que ha permitido progresar en los objetivos de datar la serie y calcular las tasas de sedimentación.

Marco geológico

La cuenca de Cameros fue, durante el Cretácico Inferior, una cuenca sin-rift rellena de sedimentos continentales con incursiones marinas y forma parte de las cuencas constituidas en la segunda etapa de rifting ibérico, desde el Jurásico Superior al Cretácico Infe-

rior (Mas *et al.*, 1993; Guimerà *et al.*, 1995; Salas *et al.*, 2001). La característica diferenciadora respecto a las demás cuencas es la potencia de sedimentos acumulados durante este periodo, que se sitúa en torno a los 8000 m. Actualmente constituye un relieve positivo debido a su inversión tectónica producida durante el Terciario (Fig. 1).

En la cuenca de Cameros se han establecido 3 modelos de formación: (i) En el trabajo de Guiraud and Seguret (1985) se considera la cuenca como un gran sinforme sinsedimentario cuya génesis estaría relacionada con la tectónica extensional. (ii) En los trabajos de Casas-Sainz (1992, 1993), Casas-Sainz and Simón Gómez (1992), Casas-Sainz *et al.*, (1995), Casas-Sainz and Gil-Imaz (1998) y Mata *et al.*, (2001) se considera la existencia de una falla lítrica con buzamiento sur generada a favor de las facies Keuper. Dicha falla se

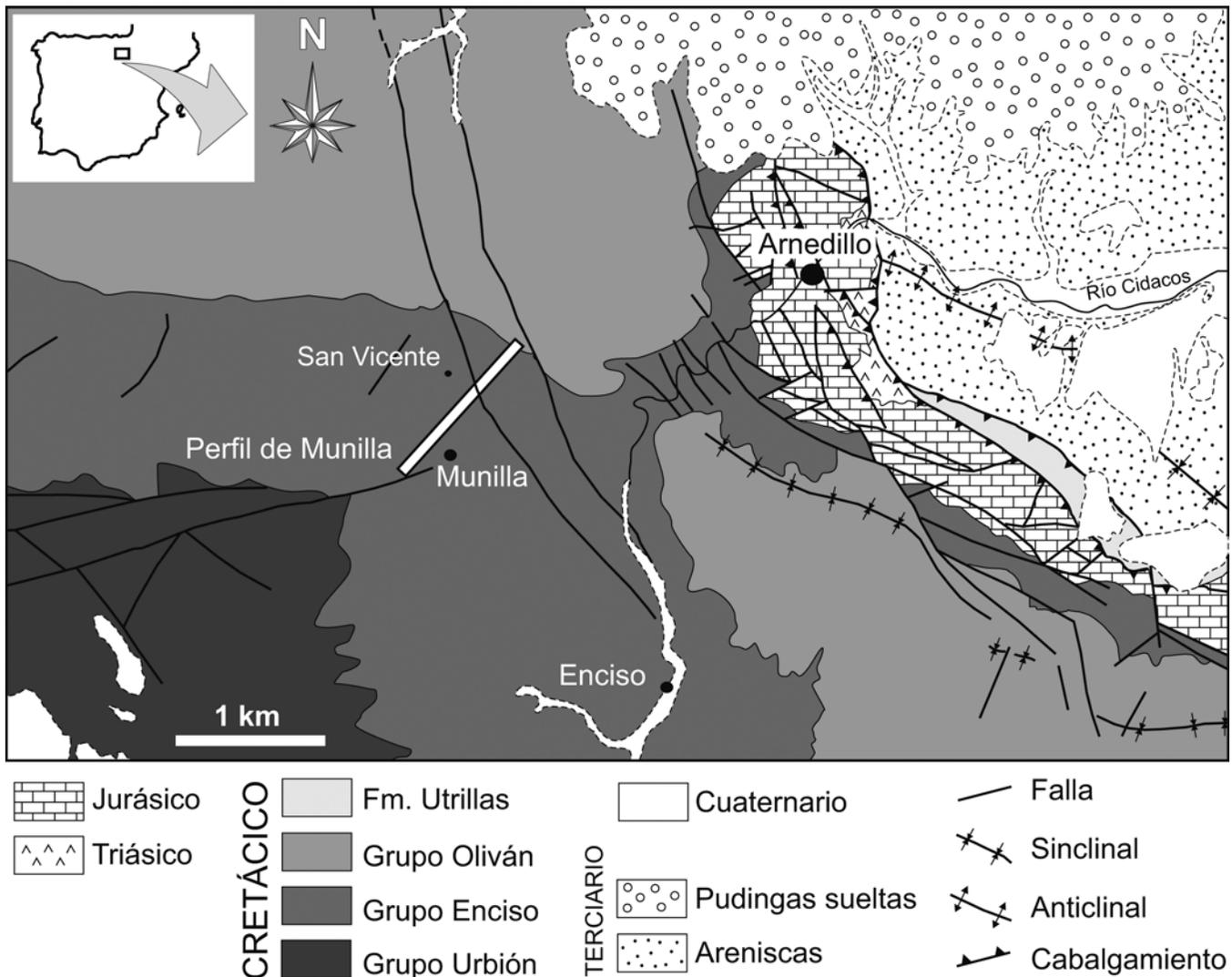


Figura 1. Mapa geológico del sector nororiental de la cuenca de Cameros y ubicación del perfil de Munilla.
Figure 1. Location of the Munilla section in the Lower Cretaceous Cameros basin, northern Spain.

invertiría durante la compresión alpina, con un desplazamiento máximo horizontal hacia la depresión del Ebro de 29 km y un desplazamiento vertical máximo en torno a los 5 km (Muñoz-Jiménez and Casas-Sainz, 1997). (iii) Mas *et al.*, (1993, 1997, 2002, 2003) y Guimerà *et al.*, (1995) proponen que se trate de una cuenca sinforme formada sobre una rampa con buzamiento sur que conecta dos rellanos de una falla extensiva (*extensional ramp basin*) que se encuentra en el basamento.

La sedimentación continental de esta cuenca se divide clásicamente en cinco grupos litoestratigráficos (Tischer, 1966): Tera, Oncala, Urbión, Enciso y Oliván sobre los que aparecen materiales en facies Urgon y las Fms Escucha/Utrillas (Muñoz *et al.*, 1997); y en dos sectores con características sedimentarias y tectónicas diferentes: el occidental, donde las series sedimentarias sin-rift son menos potentes, no existe metamorfismo de bajo grado y además aparecen numerosos pliegues y cabalgamientos, en general con vergencia sur (Guimerà *et al.*, 1995); y el oriental, donde el espesor de la serie sedimentaria sin-rift mesozoica cuadruplica la del sector oriental, existen pocas estructuras tectónicas y los cabalgamientos presentan vergencia norte (Casas-Sainz, 1993). Mas *et al.*, (1993 y 2002) dividen el relleno sedimentario en unidades genéticas (secuencias de depósito) limitadas por discontinuidades que se suelen manifestar como discordancias.

El Grupo Enciso, definido por Tischer (1966) y datado por Mas *et al.*, (1993) como Barremiense superior-Aptiense inferior, y como Hauteriviense superior-Barremiense por Clemente (2010) se reconoce en el sector oriental de la cuenca de Cameros. Se trata de un grupo que representa ambientes lacustres y palustres de carácter mixto carbonatado-siliciclástico (Doublet *et al.*, 2003) que conectaban con los sistemas fluviales distales de la parte superior del Grupo Urbión. Esta unidad alcanza entre 1 100 y 1 450 m de espesor máximo (Guiraud and Seguret, 1985) e incluye algas Dasicladáceas y foraminíferos bentónicos relacionados con incursiones marinas (Guiraud and Seguret, 1985; Mas *et al.*, 1993; Alonso and Mas, 1993 y Suárez-González *et al.*, 2010).

Los trabajos sobre paleoclimatología en sistemas lacustres someros de la Cordillera Ibérica son muy escasos, destacando los centrados en materiales terciarios (Abdul Aziz, 2001; Abdul Aziz *et al.*, 2000 y 2003; Abels *et al.*, 2009a y b). Considerando los que se realizan sobre los depósitos formados durante la etapa de rifting del Cretácico Inferior hay que destacar los trabajos de Soria (1997), Liesa *et al.*, (2006), Meléndez *et al.*, (2009), Gil *et al.*, (2009) y Soria *et al.*, (2012) donde se caracterizan ciclos sedimentarios periódicos con las frecuencias de Milankovitch. Sin embargo, en

la cuenca de Cameros estos trabajos son muy escasos, teniendo en cuenta el abundante registro existente. A este respecto, Gómez-Fernández and Meléndez (1994), establecen ciclos a diferentes escalas para el Grupo Oncala (Aloformación Huérteles) en relación con cambios humedad/aridez. En el trabajo de Doublet *et al.*, (2003) se estudian sedimentológicamente los materiales del Grupo Enciso y se señala que la alternancia de los dos sistemas lacustres descritos en el trabajo están controlados por factores climáticos.

Análisis sedimentológico y modelo sedimentario

El estudio paleoclimático del Grupo Enciso se basa en el análisis estratigráfico y sedimentológico de los materiales que lo integran, depositados a una paleolatitud estimada de 20-30°N (Ziegler, 1988; Stampfli and Borel, 2002). Para alcanzar este objetivo, se ha levantado un perfil estratigráfico detallado a escala 1:200, representado aquí a menor escala para favorecer su visualización, (Fig. 2) que ha sido la base para identificar las facies, establecer las secuencias, elaborar las series de tiempo y realizar la interpretación sedimentológica y paleoclimática.

La base del perfil se sitúa a unos 500 m al oeste de Munilla (X: 557 311.86 Y: 4 670 796.45) y el techo 1.7 km al NNE de esta localidad (X: 558 828.11 Y: 4 672 561.84). La potencia total del perfil es de 996 m (Fig. 2). En la columna se han diferenciado 7 facies con entidad suficiente como para que sus características litológicas, geométricas y estructurales puedan ser la respuesta a una parte o incluso al conjunto de procesos de un medio sedimentario (Tabla 1).

A partir del análisis de las facies mediante la metodología de las cadenas de Markov (1971) (Tabla 2) se ha construido el diagrama de flujo que se muestra en la Fig. 3a donde se incluyen todas las transiciones probables entre facies. Del análisis de este diagrama se deduce que es imposible integrar todas las facies en una única secuencia tipo, por lo que se han establecido las siguientes (Fig. 3b):

Secuencia tipo A: Con espesores que oscilan entre 5 y 15 metros, está formada por areniscas y limolitas que muestran una evolución vertical profundizante. El límite de secuencia (LS) se manifiesta por una superficie erosiva formada en relación con una progradación de los ambientes fluviales. La secuencia representa el paso de ambientes fluviales con canales y depósitos de llanura de inundación a la parte proximal de un sistema deltaico donde son frecuentes las estructuras de escape de fluidos, las costras ferruginosas y la bioturbación que, junto con la evolución vertical granocreciente, caracterizan los lóbulos deltaicos.

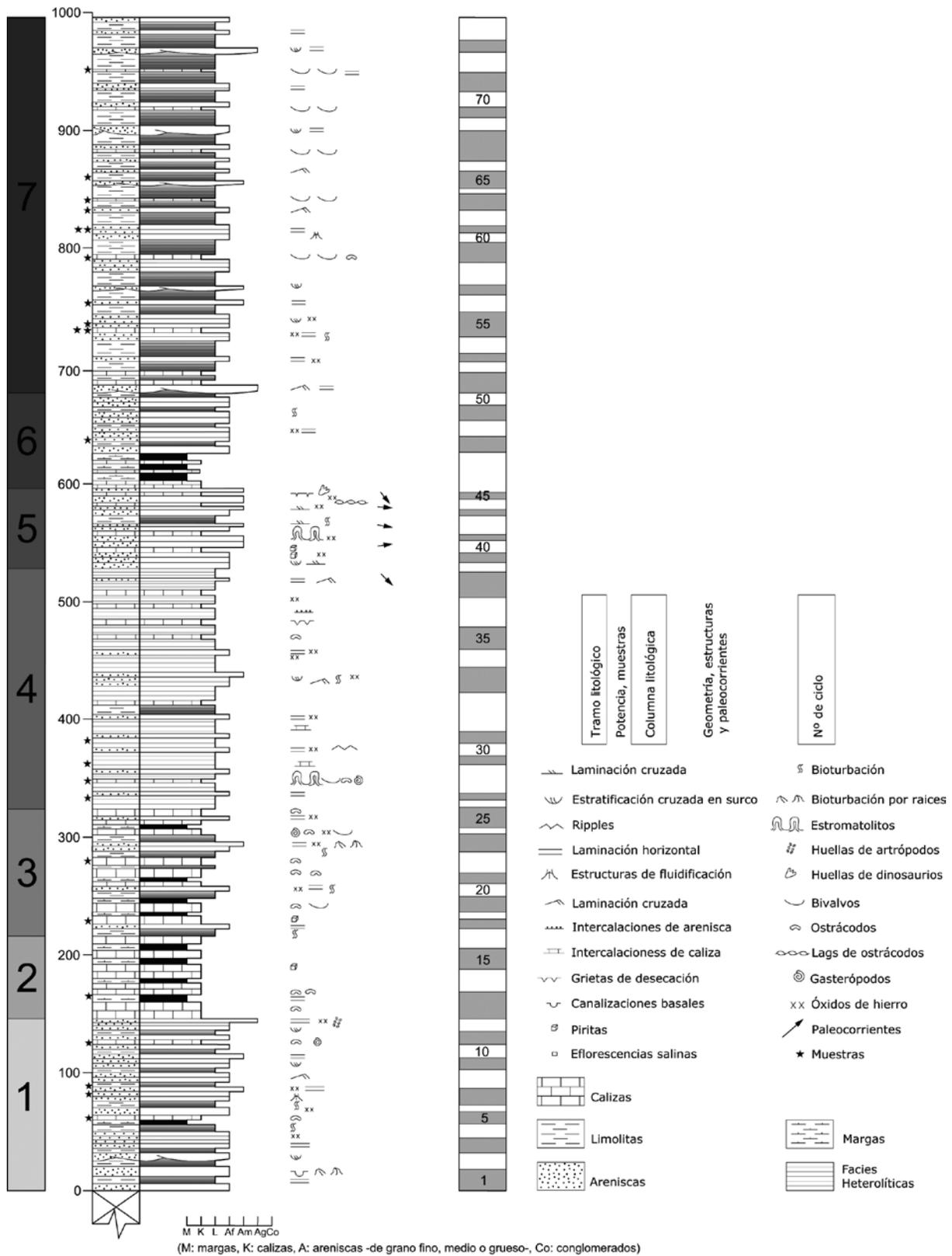


Figura 2. Columna estratigráfica del Grupo Enciso en la zona de Munilla. En la figura se muestran los 7 tramos caracterizados y los 74 ciclos sedimentarios identificados (bandas alternantes grises y blancas en la parte derecha).

Figure 2. Synthetic log of the stratigraphic section of the Munilla zone (Enciso Group), showing the seven sub-units and the 74 lacustrine cycles (alternating grey and white bands on the right).

Facies		Descripción	Procesos	
a	Areniscas en estratos canaliformes + limolitas	Alternancia de areniscas y limolitas grises. Las areniscas van desde grano fino a grueso, tienen cemento carbonatado y se disponen en estratos canaliformes integrando paquetes de hasta 2 m de espesor. Presentan laminación horizontal y cruzada, <i>ripples</i> , estratificación cruzada en surco y óxidos de hierro a techo de los estratos. Las limolitas se presentan masivas, localmente con laminación horizontal y, hacia el techo de la columna, muestran aspecto pizarroso. Localmente presentan óxidos de hierro.	Canales fluviales/ distributarios	Sistema Fluvial
	Areniscas en estratos tabulares + Limolitas	Alternancia de areniscas y limolitas grises. Las areniscas van de grano fino a grueso. Se disponen en estratos tabulares de hasta 2 m de potencia, formando paquetes de hasta 7 m, a veces con evolución vertical granodecreciente. Presentan laminación horizontal y cruzada, estratificación cruzada, <i>ripples</i> , canalizaciones basales, óxidos de hierro y localmente bioturbación. Las limolitas aparecen con textura masiva o laminada, con finas capas de areniscas; a techo de la columna muestran aspecto pizarroso. Presentan óxidos de hierro y bioturbación.	Llanura de inundación	
b	Areniscas en estratos sigmoidales + limolitas	Alternancia de areniscas y limolitas grises. Las areniscas son de grano fino a grueso, dispuestas en estratos sigmoidales o irregulares de hasta 2 m de potencia, formando paquetes de hasta 7 m de espesor, con evoluciones verticales granocrecientes, ocasionalmente con morfología de lóbulo. Presentan laminación horizontal y cruzada, estratificación cruzada, <i>ripples</i> , estructuras de escape de fluidos, bioturbación por raíces y galerías, canalizaciones basales, huellas de pisadas de dinosaurios, grietas de desecación y óxidos de hierro. Las limolitas son masivas, a veces laminadas, con finas capas de areniscas. A techo de la columna muestran aspecto pizarroso. Presentan bioturbación y óxidos de hierro.	Delta	Sistema deltaico
c	Limolitas + areniscas en estratos tabulares	Limolitas de color gris oscuro con intercalaciones de areniscas del mismo color. Las limolitas se disponen en estratos tabulares de hasta 3 m de espesor, formando paquetes que alcanzan los 7 m de potencia. Localmente presentan bioturbación, laminación paralela y niveles finos de arenisca. Las areniscas son de grano fino, a veces medio y se disponen en estratos tabulares de potencia decimétrica.	Prodelta	
d	Calizas + Limolitas	Alternancia de calizas y limolitas grises. Las calizas corresponden a micritas, intramicritas y biomicritas, generalmente <i>mudstone-packstone</i> , localmente <i>grainstone</i> (bioesparitas) con ostrácodos, gasterópos y restos de bivalvos. A techo de los estratos, se pueden observar concentraciones laminadas de ostrácodos. Localmente muestran bioturbación y laminación horizontal. Se disponen en estratos tabulares de hasta 1.2 m de espesor y se agrupan en paquetes que alcanzan los 6 m de potencia. Las limolitas son masivas, localmente laminadas. Se disponen en estratos tabulares de potencia centimétrica y decimétrica.	Lago mixto detrítico/ carbonatado	Sistema lacustre
e	Facies Heterolíticas	Alternancia de limolitas y areniscas de color ocre, con calizas y margas grises. Las limolitas presentan laminación horizontal, al igual que las areniscas, que son de grano fino y muy fino. Las calizas son generalmente micritas y biomicritas <i>mudstone-packstone</i> , muy ocasionalmente <i>grainstone</i> (bioesparitas). Todas estas litologías se disponen en niveles milimétricos, apilados en paquetes de hasta 10 m de espesor. Presentan capas de ostracoditas, óxidos de hierro y bioturbación. Localmente presentan bandeados de tonos ocre.	Lago con influencia detrítica	

Facies		Descripción	Procesos	
f	Calizas + margas	Calizas grises de tonos claros y oscuros, con intercalaciones de margas de igual color. Las calizas corresponden a micritas ocasionalmente fétidas y, raramente, a biomicritas (<i>mudstone-packstone</i>) con ostrácodos, restos de gasterópodos, capas de ostracoditas y de areniscas de grano fino. Se presentan en estratos tabulares de hasta 1.5 m de espesor y se agrupan formando paquetes de hasta 12 m de potencia con bioturbación, laminación horizontal, óxidos de hierro, pirritas y estructuras de escape de fluidos. Las margas son masivas, localmente laminadas. De forma ocasional presentan capas de areniscas de grano fino y de calizas grises oscuras con ostrácodos. Se disponen en estratos tabulares de hasta 4.6 m de espesor.	Lago con influencia carbonatada	Sistema lacustre
		Calizas grises, localmente limosas, que corresponden a micritas, intramicritas y biomicritas, generalmente <i>mudstone-packstone</i> , localmente <i>grainstone</i> (bioesparitas) con ostrácodos, gasterópodos y bivalvos. Se disponen en estratos tabulares, a veces con base irregular, de hasta 1.2 m de espesor que se apilan en paquetes de hasta 6 m de potencia. Ocasionalmente presentan laminación horizontal, canalizaciones basales, laminaciones estromatolíticas y grietas de desecación.		

Tabla 1. Descripción e interpretación de las facies presentes en los materiales del Grupo Enciso (sección de Munilla).

Table 1. Description and interpretation of the facies in the Enciso Group (Munilla section).

a

	LS	a	b	c	d	e	f	g
LS		16	2	15	12	16	8	7
a	2		10	2	3	0	0	0
b	51	0		4	0	1	3	0
c	5	1	15		7	0	2	2
d	4	0	10	7		2	3	3
e	6	0	19	0	4		0	1
f	2	0	3	6	1	2		7
g	5	0	2	2	1	5	5	

b

	LS	a	b	c	d	e	f	g
LS		0.129	-0.267	0.024	0.023	0.086	0.004	-0.004
a	-0.163		0.360	-0.017	0.072	-0.097	-0.079	-0.075
b	0.531	-0.076		-0.092	-0.124	-0.099	-0.042	-0.089
c	-0.141	-0.036	0.227		0.108	-0.103	-0.021	-0.017
d	-0.156	-0.067	0.106	0.100		-0.033	0.021	0.025
e	-0.095	-0.067	0.393	-0.142	0.023		-0.083	-0.045
f	-0.190	-0.065	-0.089	0.149	-0.059	-0.004		0.257
g	0.010	-0.064	-0.205	-0.110	-0.093	-0.014	-0.014	

Tabla 2. Resultado del análisis de las facies del Grupo Enciso mediante cadenas de Markov. a) Matriz con el número de transiciones entre facies. b) Matriz con los resultados (probabilidades de transición entre facies). Las transiciones representativas se señalan con un fondo gris. Los valores más altos corresponden a transiciones más probables, mientras que los valores negativos o 0 representan transiciones no válidas.

Table 2. Results of the Markov chain analysis for the Enciso Group: a) Matrix showing the number of transitions identified from one facies to another; b) Matrix with the final results obtained from the analysis, i.e. the representative transitions (positive values are highlighted with a grey background) between facies. A higher value represents a more probable transition, and a negative value or 0 represent no valid transitions.

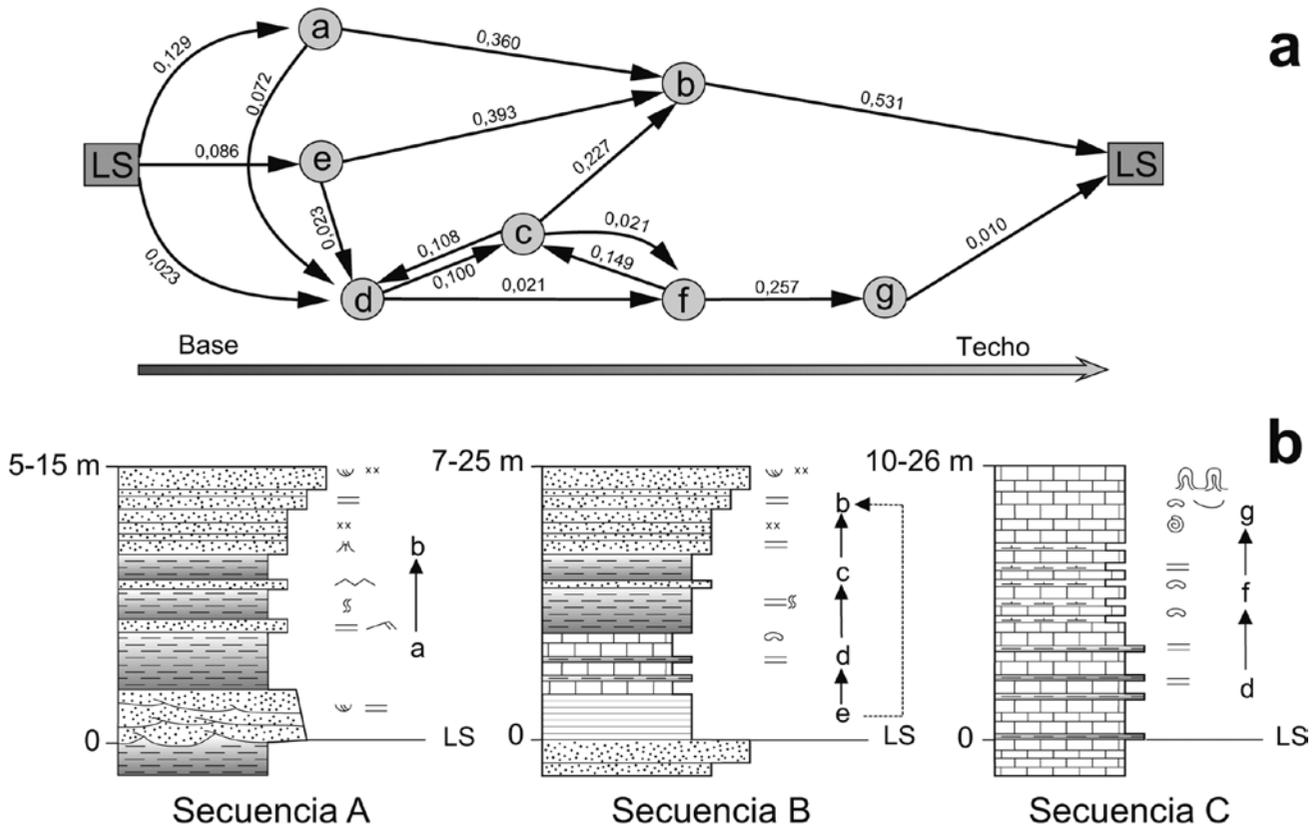


Figura 3. a) Diagrama de flujo en el que se muestran los resultados de las transiciones más representativas entre facies según el análisis de Markov. b) Secuencias tipo diferenciadas. Leyenda: LS: límite de secuencia, a-g: facies de la Tabla 1. Símbolos como en la Figura 2.
Figure 3. a) Flow diagram showing the results of the Markov chain analysis for the representative facies transitions. These results form the basis for the proposed type-sequences in Figure b). Legend: LS: cycle boundary; a to g: facies as in Table 1. Symbols as in Figure 2.

Secuencia tipo B: Con espesores entre 7 y 25 metros, muestra una evolución vertical somerizante. El límite de secuencia viene dado por una rápida profundización. La secuencia representa diferentes subambientes dentro de un lago predominantemente siliciclástico. Se inicia con facies heterolíticas, finamente laminadas, localizadas en la parte más profunda que pasan a calizas con lutitas, también laminadas y estas a las facies de prodelta, terminando la secuencia con las facies proximales deltaicas. También es frecuente el paso directo de las facies heterolíticas a las facies deltaicas, sin registro de facies carbonatadas, lo que se puede interpretar como lagos predominantemente de carácter siliciclástico, con escasa o nula presencia de subambientes carbonatados.

Secuencia tipo C: Con espesores entre 10 y 26 metros, muestra una evolución vertical somerizante y representa la sedimentación en un ambiente de lago carbonatado. Sobre el límite de secuencia, caracterizado por una profundización, aparecen facies de lutitas y calizas laminadas que pasan a calizas con margas donde se reconoce laminación horizontal y ostrácodos y termina con calizas lacustres marginales

con gasterópodos, bivalvos y laminaciones estromatolíticas.

A partir de la interpretación de estas secuencias tipo se propone un modelo sedimentario integrado por subambientes fluviales distales, representados por canales arenosos y llanuras de inundación, lateralmente relacionados con un sistema deltaico instalado en los márgenes de un lago siliciclástico (Fig. 4a) alternando con un sistema lacustre carbonatado caracterizado por la presencia de plataformas con alta productividad biológica (Fig. 4b). En el modelo se puede observar la posición relativa de las distintas facies respecto a la línea de costa lacustre, aspecto que ha sido utilizado para la elaboración de la serie de tiempo en la que se basa el análisis espectral.

La serie se ha dividido, para su descripción, en 7 tramos basándonos en la variabilidad de los subambientes sedimentarios que han quedado registrados en las facies. En el tramo 1 dominan los ambientes fluviales y deltaicos. Se identifican facies correspondientes a canales fluviales, llanuras de inundación y lóbulos deltaicos emplazados en los márgenes de áreas lacustres carbonatadas. El tramo 2 presenta fa-

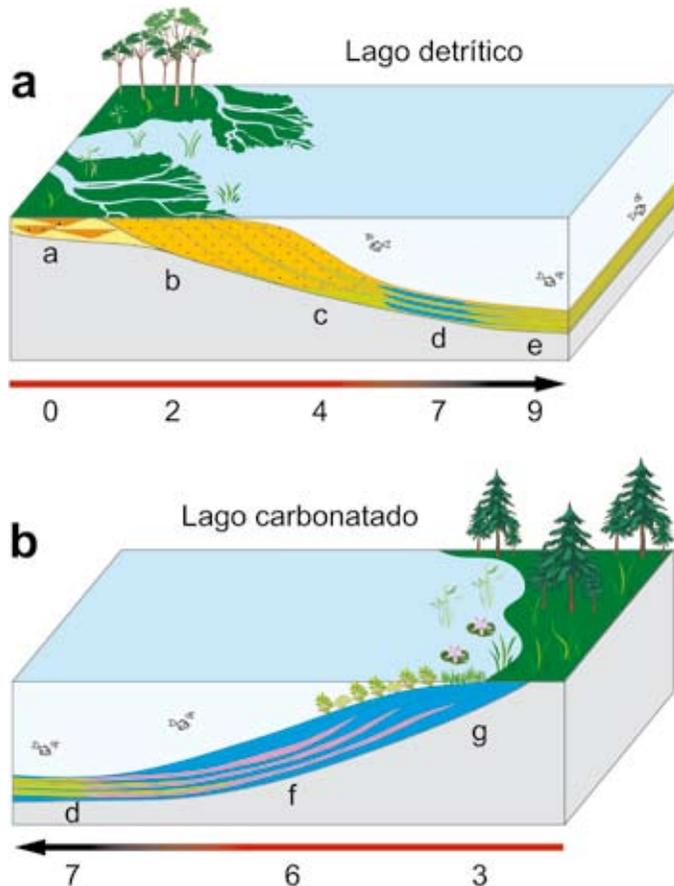


Figura 4. Modelo de facies y ambientes sedimentarios con las facies que los integran y propuesta de rangos de profundidad para elaborar la serie de tiempo. a) Ambiente fluvial distal y lago siliciclástico. b) Lago carbonatado.

Figure 4. Sedimentological model (not to scale) proposed for the Enciso Group. The model shows the characterized environments: a) distal riverine and siliciclastic lacustrine environments and b) carbonate lacustrine environment. The figure also shows the position of each facies relative to the palaeolacustrine shoreline and its assigned depth rank.

cies de lagos carbonatados someros con abundantes restos orgánicos y bioturbación. En el tramo 3 se observa una alternancia de los subambientes sedimentarios descritos en los tramos 1 y 2, mientras que el tramo 4 muestra facies lacustres laminadas referibles a subambientes más profundos, por lo general alejados de la zona de enraizamiento de las plantas, aunque localmente alternan con subambientes lacustres más someros e incluso con ambientes deltaicos. El tramo 5 representa una vuelta a los ambientes predominantemente deltaicos. El tramo 6 comienza con un subambiente de lago carbonatado profundo con facies lacustres laminadas que paulatinamente pasa a ambientes deltaicos a techo del tramo, mientras que el tramo 7 muestra una lenta transición hacia las facies fluviales del Grupo Oliván.

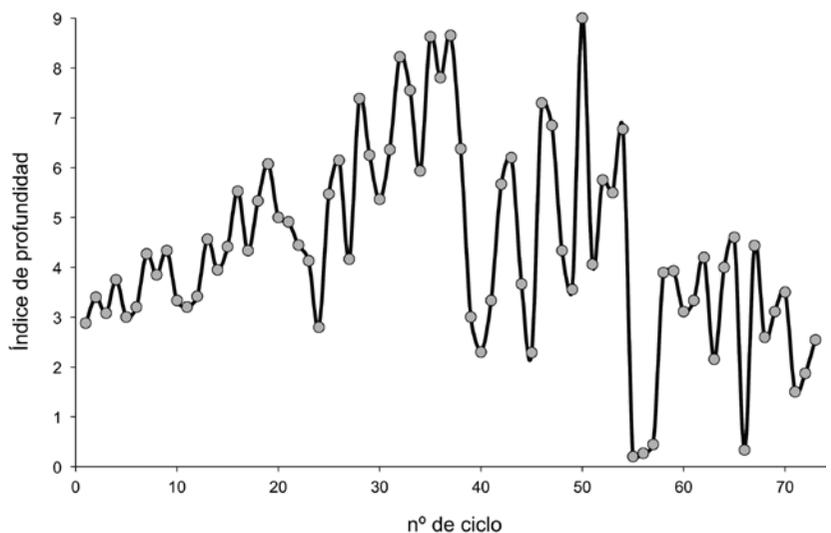
Cicloestratigrafía

En la columna estratigráfica de Munilla (Fig. 2), se han definido 74 ciclos sedimentarios, en función de las asociaciones de facies que se observan y de la evolución vertical somerizante o profundizante que reflejan. Los límites se han marcado por saltos bruscos o cambios en la tendencia vertical. Estos ciclos corresponden a las secuencias más fácilmente identificables en campo y son referibles a las secuencias tipo definidas con el análisis de cadenas de Markov.

A partir de los ciclos identificados se ha calculado el índice ponderado de profundidad en función de las facies que los integran, el rango de profundidad asignado a cada una de ellas (de 0 a 9, ver modelo de la Fig. 4) y el espesor de cada una de las facies en cada ciclo. La variación de este índice a lo largo del tiempo muestra (Fig. 5) como el ambiente sedimentario va

Figura 5. Índice de profundidad calculado para cada una de las secuencias (ver Figura 2). Se observan profundizaciones graduales (ciclos 1 a 38 y 40 a 50) separados por bruscos descensos del índice de profundidad.

Figure 5. Mean depth index for each cycle (see Fig. 2) versus cycle number. Gradual deepening (cycles 1 to 38 and 40 to 50) separated by abrupt shallowing can be seen in the depth index.



profundizándose desde la base de la serie hasta un máximo relativo situado en el ciclo 35. Tras una breve etapa con una acusada somerización, aparece reflejada una profundización gradual hasta el ciclo 50, donde se alcanza el valor más elevado para luego mostrar una rápida somerización, que marca la transición hacia las facies fluviales del Grupo Oliván.

Para discriminar entre la señal climática y tectónica que ha quedado registrada en la sedimentación de los materiales del Grupo Enciso, (ya que es evidente la presencia de una tectónica distensiva que se manifiesta por la aparición de fallas normales sinsedimentarias de escala decamétrica, con orientación NE-SO), se ha considerado la relación entre el espacio de acomodación y el espesor de los diferentes ciclos identificados que se puede analizar en un gráfico (Fig. 6) donde se muestran las desviaciones del espesor de cada ciclo en relación con el espesor promedio calculado para toda la columna, siguiendo la metodología establecida por Schwarzacher (2005).

En el gráfico de la Fig. 6 se observan dos intervalos en los que el espacio de acomodación en la cuenca crece de forma muy importante (ciclos 13 al 16 y 32 a 37, con una nueva reactivación en el techo de la columna). Estos momentos de máxima creación de espacio de acomodación están separados por largos intervalos donde el espacio de acomodación decrece de forma gradual. La falta de periodicidad en la repetición de estos bruscos aumentos en el espacio de acomodación, puede relacionarse con etapas de subsidencia anormalmente alta.

Análisis espectral

Uno de los principales objetivos de este estudio es poner de manifiesto, mediante análisis estadísticos, la

posible existencia de ciclicidad climática de alta y baja frecuencia que haya podido quedar registrada durante la sedimentación, principalmente lacustre, del Grupo Enciso a pesar de que se deposita en una cuenca de rift tectónicamente activa.

A partir del modelo sedimentológico de la Fig. 4 se ha asignado a cada facies un valor numérico de profundidad que varía entre 0 (facies fluviales) y 9 (facies lacustres profundas). Con el rango de profundidades establecido para cada facies se ha elaborado una serie de tiempo con un intervalo de muestreo de 1 metro, obteniéndose una serie de tiempo de 967 datos una vez eliminados los tramos cubiertos (Fig. 7). El análisis espectral de la serie de tiempo se ha realizado mediante los programas de análisis espectral REDFIT y Wavelet englobados en el software PAST.

A la serie de tiempo se le ha aplicado un test tipo Bonferroni (Thomson, 1990) y así garantizar que nuestro análisis tiene la protección para evitar falsos positivos (Fig. 8). En esta figura se observa que hay tres máximos del espectro que superan la banda de confianza del 99.9%. El que aparece definido de una forma más clara corresponde a un periodo de 16.66 m y será el punto de anclaje para la interpretación de los ciclos de Milankovitch. En las frecuencias entre 0.2 y 0.25, aparecen 2 picos peor definidos que corresponden a periodicidades entre 4 y 5 metros.

A partir del análisis mediante REDFIT de la serie de tiempo del rango de profundidades, dividida en tres tramos iguales con una superposición del 50% y ventana rectangular, se identifican 5 máximos correspondientes a ciclos sedimentarios periódicos en 90.56 m, 16.66 m, 7.14 m, 5.37 m y 3.93 m; 4 de los cuales sobrepasan el nivel de confianza del 99%, (Fig. 9a). Para comprobar la fiabilidad de estos ciclos periódicos, se ha realizado un análisis paralelo de la serie de tiem-

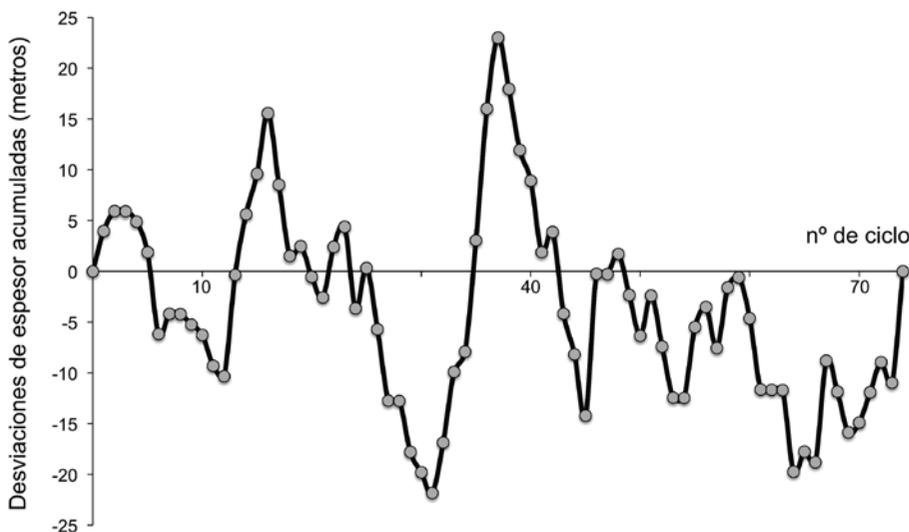


Figura 6. Desviaciones sobre el espesor promedio de los ciclos identificados en el Grupo Enciso (perfil de Munilla) siguiendo la metodología de Schwarzacher (2005). En el gráfico se observan de forma muy clara largas etapas con disminución gradual del espacio de acomodación, separadas por cortas etapas con fuertes incrementos (ciclos 13 al 16 y 32 a 37) que se pueden referir a momentos de aumento de la subsidencia de la cuenca por causas tectónicas.

Figure 6. Differences in the average spacing of cycle boundaries in the Enciso Group (according to the method of Schwarzacher, 2005) showing long intervals of decreasing accommodation space separated by short episodes of significant increases (cycles 13 to 16 and 32 to 37), which are related to increased tectonic activity.

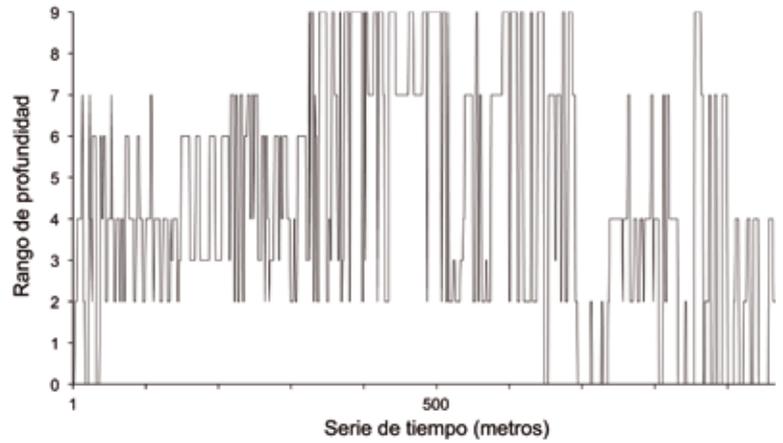


Figura 7. Serie de tiempo construida a partir de la interpretación de las variaciones en la profundidad de las facies que integran los ciclos (ver Figura 5).

Figure 7. Time series constructed from the interpreted variations in depth (depth rank) of the lacustrine facies (see Fig. 5).

po utilizando la simulación Monte Carlo para calcular las bandas de confianza. El resultado se muestra en la Fig. 9b donde se puede comprobar que todos los ciclos superan la banda de confianza del 99% por lo que resulta improbable la intervención del azar en la formación de estos ciclos.

También se ha analizado la serie de tiempo mediante la transformada de Wavelet (Fig. 10). En este gráfico se puede observar la periodicidad de los ciclos (que se manifiesta por la persistencia en la horizontal de colores grises) y la parte de la serie de tiempo don-

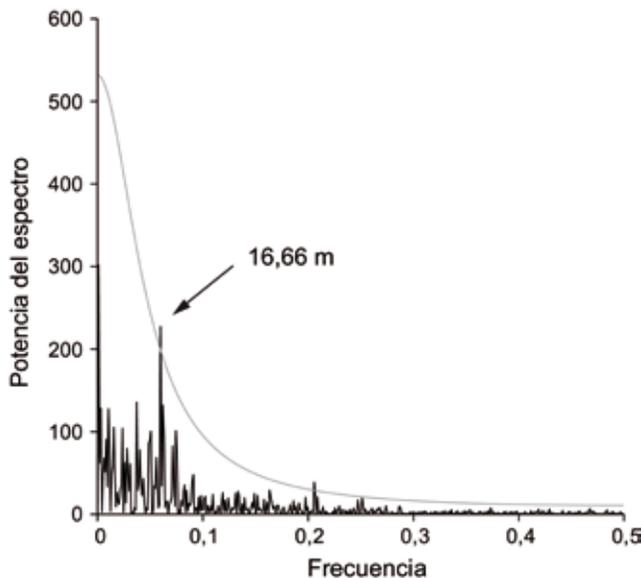


Figura 8. Test tipo Bonferroni (Thomson, 1990) aplicado a la serie de tiempo del rango de profundidades (Figura 7). La línea gris corresponde a una banda de confianza del 99.9%. El pico más representativo del espectro de potencia corresponde a un periodo de 16.66 m.

Figure 8. Bonferroni-type correction (Thomson, 1990; grey line = 99.9% confidence level) applied throughout the time series (depth rank) established for the Enciso Group (Figure 7). The most representative peak of the power spectrum corresponds to a period of 16.66 m.

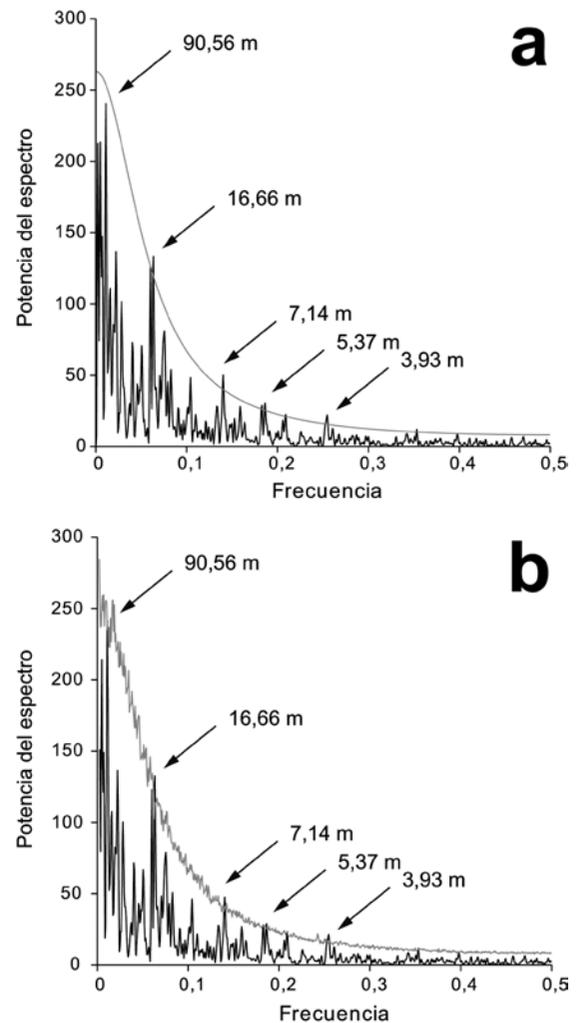


Figura 9. Espectro de potencia de la serie de tiempo de la Figura 7 construida a partir de las variaciones en la profundidad de las facies. a) Banda de confianza del 99% (línea gris) calculada con χ^2 . b) Banda de confianza del 99% (línea gris) calculada mediante la simulación de Monte Carlo.

Figure 9. Power spectrum of the data series from Figure 7. Confidence level > 99% (grey line) calculated with a) χ^2 model, and b) Monte Carlo simulation model.

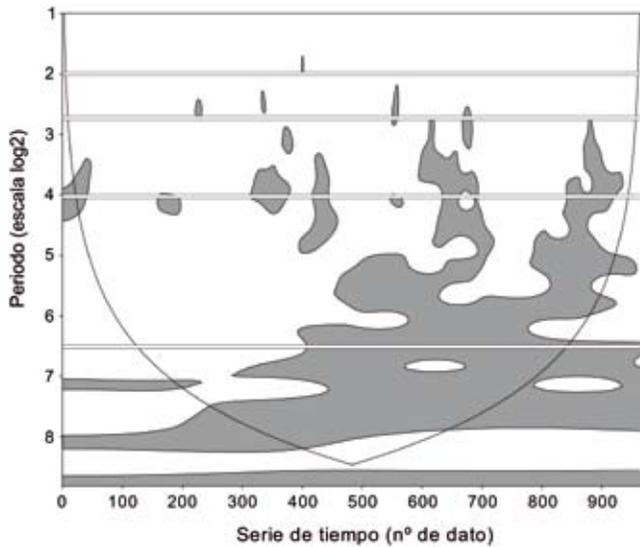


Figura 10. Análisis de la serie de tiempo mediante Wavelet. Los rectángulos blancos corresponden a los máximos obtenidos mediante el análisis de REDFIT (Figura 10). La línea negra en torno al color gris representa la banda de confianza del 95%. Las líneas simétricas de color negro a ambos lados del diagrama simbolizan el cono de influencia, por debajo del cual los valores carecen de fiabilidad estadística.

Figure 10. Wavelet power spectrum of the time series of the Enciso Group depth-rank variations. The white rectangles represent the main periods according to REDFIT analysis. The black lines around the shaded area represent a 95% confidence level with respect to a red-noise background, and the area below the thin U-shaped curve denotes the cone of influence (COI). Inside the COI, the edge effects may become important and the results should be interpreted with caution.

de aparece la ciclicidad periódica. Para facilitar la interpretación del gráfico, se han trazado rectángulos blancos coincidiendo con el periodo de los máximos obtenidos mediante el análisis espectral REDFIT. De esta forma, se aprecia como el periodo de 2^4 , correspondiente al ciclo de ~16 metros aparece, aunque de forma discontinua, en toda la serie de tiempo, mientras que el periodo de $2^{6.5}$ correspondiente al ciclo de ~90 metros, solamente aparece en la mitad superior de la serie de tiempo, aproximadamente a partir del dato 400.

Discusión y conclusiones

Ciclos de Milankovitch

Las relaciones entre las frecuencias encontradas en el análisis espectral de las series de tiempo es uno de los mejores métodos de calibración temporal de los ciclos periódicos encontrados. En la Tabla 3a se muestran los máximos obtenidos en el análisis espectral de la serie de tiempo definida en los materiales del Grupo Enciso y las relaciones existentes entre ellos y en la Tabla 3b los máximos y las relaciones existentes entre las frecuencias de Milankovitch calculadas a partir de las curvas de excentricidad, oblicuidad y precesión

a

m	90.56	16.66	7.14	5.37	3.93
90.56	1	5.44	12.68	16.86	23.04
16.66		1	2.33	3.10	4.24
7.14			1	1.33	1.82
5.37				1	1.37
3.93					1

b

ka	Excentricidad	Oblicuidad	Precesión
	405.0	94.8	37.1
405.0	1	4.27	10.92
94.8		1	2.56
37.1			1
22.3			
18.1			

Tabla 3. a) Relaciones entre los máximos obtenidos en el análisis espectral (REFFIT) de la serie de tiempo del Grupo Enciso (Figura 9). b) Relaciones entre los ciclos de Milankovitch calculados para el Cretácico Inferior (-118 a -110 Ma) a partir de los valores de insolación de Laskar et al. (2004).

Table 3. a) Ratios of the cycle thicknesses obtained by REDFIT spectral analysis of the time series of the Enciso Group (Fig. 9); b) Matrix showing the Milankovitch periodicities and their ratios for the period between -118 to -110 Ma. Periodicities were obtained by applying spectral analysis (REFFIT) to the numerical solution for the Earth's insolation values calculated by Laskar et al. (2004).

de Laskar *et al.*, (2004), para el intervalo temporal de -118 a -110 Ma. El análisis comparativo de los valores es la herramienta fundamental para identificar y correlacionar los ciclos encontrados en nuestro análisis con las frecuencias de Milankovitch.

El punto de partida de este análisis, en base a los valores obtenidos en el test de tipo Bonferroni (Fig. 8), es el ciclo de 16.66 m; ciclo que, por otra parte, es el que con mayor facilidad se identifica sobre el terreno y constituye la base del análisis secuencial que se muestra en la Fig. 2. Del análisis comparativo de las Tablas 3a y b se deducen dos posibles interpretaciones para este ciclo: (i) que corresponda al ciclo de excentricidad corta (94.8 ka) o (ii) que sea una de las modas del ciclo de precesión.

(i) Si el ciclo básico de 16.66 m es el de excentricidad (94.8 ka), el de 90.56 m sería el de excentricidad larga (405 ka); mientras que el de 7.14 m sería el de oblicuidad (37.1 ka) aunque, en las latitudes a las que se depositó el Grupo Enciso (intertropicales), este ciclo debería tener escasa representatividad. Finalmente, los ciclos de 5.37 y 3.93 m corresponderían a las dos modas principales del ciclo de precesión.

(ii) Si el ciclo de 16.66 m es el de precesión, el ciclo de 90.56 m sería el de excentricidad corta (94.8 ka), mientras que los ciclos más pequeños estarían por debajo de las frecuencias de Milankovitch.

La primera interpretación tiene como puntos a favor que todos los ciclos periódicos identificados en los sedimentos del Grupo Enciso son referibles a alguna de las frecuencias establecidas por Milankovitch. Además, las tasas de sedimentación que se pueden calcular a partir de esta interpretación (16.66 metros en 94.8 ka) proporcionan valores que, aunque elevados (175 m/Ma), no lo son tanto considerando las especiales características de subsidencia del sector oriental de la cuenca de Cameros, y serían compatibles con las cuencas de tipo rift según Allen y Allen (2005). Otro punto fuerte de esta interpretación es que, a pesar de que los valores numéricos de las relaciones entre ciclos no siempre son coincidentes con los valores deducidos de las relaciones entre las frecuencias de Milankovitch calculadas para el Cretácico inferior, sí que son valores aproximados y además son cinco los valores comparados, lo que aporta una mayor fiabilidad a la correlación. Las variaciones en estos valores pueden justificarse por el ruido (variaciones en la velocidad de sedimentación, interrupciones sedimentarias, compactación diferencial, etapas erosivas, ...) asociado a cualquier proceso sedimentario. Además, hay que destacar que las frecuencias que superan el test de tipo Bonferroni, corresponderían, de acuerdo

con esta interpretación, al ciclo de excentricidad corta y a las dos modas del ciclo de precesión, ciclicidades que serían las más representativas en una paleolatitud como la que corresponde a la cuenca de Cameros durante el Cretácico inferior (20-30°N). A partir de la tasa de sedimentación obtenida con esta interpretación (175 m/Ma) y considerando el espesor de la columna (996 m), se puede estimar que la duración temporal de los sedimentos del Grupo Enciso en Munilla se sitúa en torno a 5.7 Ma, valor que resulta compatible con el obtenido por otros autores para este grupo (Tischer, 1966; Mas *et al.*, 2002; Schudack and Schudack, 2009 y Clemente, 2010).

La segunda interpretación es mucho más simple, ya que solamente los ciclos de 16.66 y 90.56 m estarían dentro del rango de frecuencias de Milankovitch (precesión y excentricidad corta, respectivamente) y el valor de la relación entre estos ciclos sedimentarios (5.44) está muy próxima a la relación entre las frecuencias de Milankovitch (5.24). Las debilidades de esta interpretación son que no explica las ciclicidades encontradas por debajo de 16.66 m y que la tasa de sedimentación resultante (16.66 m en 18.1 ka) arroja un valor de 920 m/Ma, muy por encima de los valores normales en cuencas de tipo rift, incluso en situaciones excepcionales de subsidencia como la del sector oriental de la cuenca de Cameros, siendo este un valor propio de las cuencas más subsidentes de tipo *strike-slip* (Allen and Allen, 2005). De acuerdo con esta interpretación, teniendo en cuenta la tasa de sedimentación obtenida (920 m/Ma) y considerando el espesor de la columna (996 m), la duración temporal de los sedimentos del Grupo Enciso en Munilla se situaría en 1.08 Ma, valor que resulta muy inferior al obtenido por otros autores (*ops. cit.*) para el Grupo Enciso.

Variaciones eustáticas

La hipótesis que presenta una mayor coherencia, aunque tendrán que ser estudios más amplios los que certifiquen o descarten esta interpretación, es que el ciclo de 16.66 m corresponda a excentricidad corta, (94.8 ka). Los resultados obtenidos han permitido establecer la influencia de la tectónica y el clima sobre la sedimentación, así como calcular la tasa de sedimentación y el intervalo temporal correspondiente a la sedimentación del Grupo Enciso en el sector oriental de la cuenca de Cameros. Uno de los objetivos de este trabajo era avanzar también en el establecimiento de una datación para esta unidad y se planteaba como metodología de trabajo la sintonización de la serie con la curva eustática de Haq *et al.* (1988).

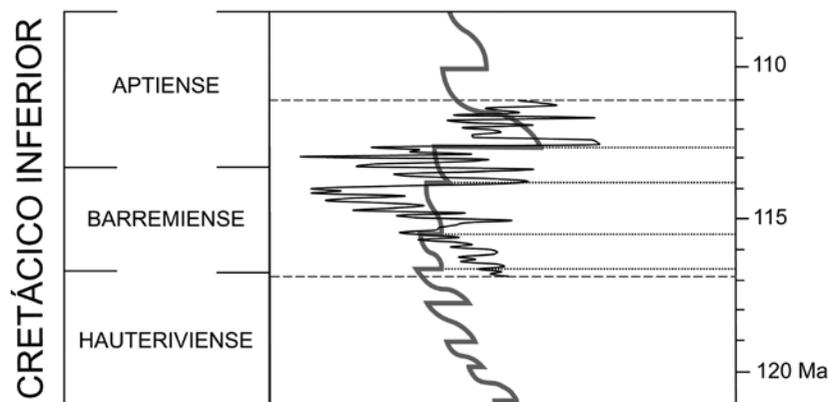


Figura 11. Propuesta de correlación del índice de profundidad calculado para el Grupo Enciso en el perfil de Munilla y la curva de variaciones eustáticas de Haq *et al.*, (1988).

Figure 11. Proposed correlation between the depth index calculated for the Enciso Group in the Munilla section and the eustatic curve variations drawn by Haq *et al.*, (1988).

El control eustático reconocido por Mas *et al.*, (1993) y Sacristán-Horcajada *et al.*, (2012) en la sedimentación de los depósitos sinrift de la cuenca de Cameros y por Guiraud and Seguret (1985), Alonso and Mas (1993) y Suárez-González *et al.* (2010) en la Fm Leza, perteneciente al Grupo Enciso, permite realizar un intento de sintonización de la curva de variación del índice de profundidad con la curva de Haq *et al.*, (1988). En el trabajo de Mas *et al.*, (1993) se correlacionan los máximos eustáticos (Haq *et al.*, 1987) con las máximas extensiones de los depósitos lacustres de cada secuencia de depósito de la cuenca de Cameros. La falta de sincronía entre las curvas es interpretada por los autores por la interacción de factores tectónicos. Los depósitos lacustres del Grupo Enciso (Fm. Leza) se relacionan con la transgresión del Aptiense inferior (Alonso and Mas, 1993).

El análisis de facies de la Fm Leza (en la zona de Préjano) demuestra que la sedimentación se produjo en un sistema de lagos costeros de agua salobre, con una clara influencia marina, más acusada hacia el techo de la unidad (Suárez-González *et al.*, 2010). Esta conclusión se basa en la presencia de foraminíferos bentónicos y abundantes algas Dasicladáceas que aparecen junto a fósiles continentales.

Como puede verse en nuestra correlación (Fig. 11) se observa un estrecho paralelismo entre la curva del índice de profundidad determinado para el Grupo Enciso (Fig. 5) en el perfil de Munilla y la curva de variaciones eustáticas, a partir del cual se puede confirmar la existencia de un control eustático del nivel de base lacustre durante la sedimentación de esta unidad. De acuerdo con la correlación establecida la sedimentación del Grupo Enciso se iniciaría en el techo del Hauteriviense y finalizaría hacia la parte central del Aptiense. Esta correlación supondría un lapso temporal de 5.9 Ma (ver líneas discontinuas horizontales en la Fig. 11), valor muy similar al obtenido mediante la correlación de los ciclos sedimentarios periódicos procedentes del análisis espectral con las frecuencias de

Milankovitch (5.7 Ma). Sin embargo, este estudio no permite encontrar elementos distintivos que confirmen de forma inequívoca la sintonización de la curva de variaciones eustáticas (Haq *et al.*, 1988) con la curva de variaciones en el índice de profundidad, por lo que será necesario disponer de un control temporal más preciso de la serie, principalmente a partir de estudios magnetoestratigráficos si todavía se conserva la señal magnética primaria tras la remagnetización (Villalaín *et al.*, 2003) que sufrió la serie en el Albiense.

Agradecimientos

Trabajo subvencionado por el Grupo de Investigación de la DGA "Análisis de cuencas sedimentarias continentales" y el Instituto de Estudios Riojanos. Agradecemos al equipo editorial y a los revisores Ildefonso Armenteros y José Rodríguez Fernández las correcciones y comentarios que han contribuido a mejorar la versión final del texto.

Referencias

- Abdul Aziz, H. 2001. Astronomical forcing in continental sediments. (An integrated study of Miocene deposits from the Calatayud and Teruel basins, NE Spain). *Geologica Ultraiectina*, 207 pp, Utrecht, The Netherlands (PhD Thesis).
- Abdul Aziz, H., Hilgen, F.J., Krijgsman, W., Sanz-Rubio, E. and Calvo, J.P. 2000. Astronomical forcing of sedimentary cycles in the middle to late Miocene continental Calatayud Basin (NE Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 177, 9-22.
- Abdul Aziz, H., Sanz-Rubio, E., Calvo, J.P., Hilgen, F.J. and Krijgsman, W. 2003. Palaeoenvironmental reconstruction of a middle Miocene alluvial fan to cyclic shallow lacustrine depositional system in the Calatayud Basin (NE Spain). *Sedimentology*, 50, 211-236.
- Abels, H.A., Abdul Aziz, H., Calvo, J.P., Tuenter, E. 2009a. Shallow lacustrine microfacies document orbitally paced

- lake-level history in the Miocene Teruel Basin (NE Spain). *Sedimentology*, 56, 399-419.
- Abels, H.A., Abdul Aziz, H., Ventra, D., Hilgen, F.J. 2009b. Orbital climate forcing in mudflat to marginal lacustrine deposits in the Miocene Teruel Basin (Northeast Spain). *Journal of Sedimentary Research*, 79, 831-847.
- Allen, P.A. and Allen, J.R. 2005. *Basin analysis. Principles and applications*. (2ª Ed.) Blackwell Sci. Pub., Oxford, 549 pp.
- Alonso, A. and Mas, J.R. 1993. Control tectónico e influencia del eustatismo en la sedimentación del Cretácico inferior de la cuenca de Los Cameros. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 17, 285-310.
- Anadón, P., Cabrera, Ll., Julià, R. and Marzo, M. 1991. Sequential arrangement and asymmetrical fill in the Miocene Rubielos de Mora Basin (Northeast, Spain). *International Association of Sedimentologists, Special Publication*, 13, 257-275.
- Casas-Sainz, A.M. 1992. El frente norte de las Sierras de Cameros: estructuras cabalgantes y campo de esfuerzos. *Zubía*, monográfico, (4), Instituto de Estudios Riojanos, 220 pp.
- Casas-Sainz, A.M. 1993. Oblique tectonic inversion and basement thrusting in the Cameros Massif (Northern Spain). *Geodinamica Acta*, 6, 202-216.
- Casas-Sainz, A.M., Cortes, A., Gil, A., Maestro, A., Muñoz, A., Pocoví, A., Martínez, B., Oliva, B., Liesa, C., Castillo, E., Pueyo, E., Millán, H., Simón, J.L., Arlegui, L., Aurell, M., Mata, M.P., Tena, S. and Román, T. 1995. *Estructura y evolución mesozoica-terciaria de las Sierras de Cameros-Demanda (Cordillera Ibérica)*. VII Reunión Comisión de Tectónica SGE, 113 pp.
- Casas-Sainz, A.M. and Gil-Imaz, A. 1998. Extensional subsidence, contractional folding and thrust inversion of the Eastern Cameros Basin, northern Spain. *Geologische Rundschau*, 86, 802-818.
- Casas-Sainz, A.M. and Simón Gómez, J.L. 1992. Stress field and thrust kinematics: a model for the tectonic inversion of the Cameros Massif (Spain). *Journal of Structural Geology*, 14, (5), 521-530.
- Clemente, P. 2010. Review of the Upper Jurassic-Lower Cretaceous stratigraphy in western Cameros Basin, Northern Spain. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 23 (3-4), 101-143.
- Doublet, S., García, J.P., Guiraud, M. and Ménard, A. 2003. Wave-dominated siliciclastic and carbonate sedimentation in a Lower Cretaceous lake (Cameros basin, northern Spain). *Journal of Iberian Geology*, 29, 11-28.
- Gil, J., García-Hidalgo, J.F., Mateos, R. and Segura, M. 2009. Orbital cycles in a Late Cretaceous shallow platform (Iberian Ranges, Spain). *Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 274, 40-53.
- Glenn, C.R. and Kelts, K. 1991. Sedimentary rhythms in Lake Deposits. In: Einsele, G., Ricken, W. and Seilacher, A. (eds.), *Cycles and events in stratigraphy*. Springer, 188-221.
- Gómez-Fernández, J.C. and Meléndez, N. 1994. Climatic control on Lower Cretaceous sedimentation in a playalake system of a tectonically active basin, Huérteles Alloformation, Cameros Basin, (north-central Spain). *Journal of Paleolimnology*, 11, 91-107.
- Guimerà, J., Alonso, A. and Mas, R. 1995. Inversion of an extensional-ramp basin by a newly formed thrust: the Cameros basin (N Spain). In: Buchanan, J.G. and Buchanan, P.G. (eds.), *Basin Inversion*. Geological Society Special Publication, 88, 433-453.
- Guiraud, M. and Seguret, M. 1985. A realising solitary overstep model for the late Jurassic-Early Cretaceous (Wealdian) Soria strike-slip basin (Northern Spain). In: Biddle, K.T. and Crithie-Blick, N. (eds.), *Strike-slip deformation, basin formation and sedimentation*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 37, 159-175.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T., and Ryan, P.D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4 (1), 1-9.
- Haq, B.H.; Hardenbol, J. and Vail, P.R. 1987. Chronology of fluctuating sea levels since the Triassic. *Science*, 235, 1156-1167.
- Haq, B.L., Hardenbol, J. and Vail, P. 1988. Mesozoic and Cenozoic Chronostratigraphy and Eustatic Cycles. In: Wilgus, C.K., Hastings, B.S., Kendall, C.G.St.C., Posamentier, H.W., Ross, C.A. and Van Wagoner, J.C. (eds.), *Sea-level Changes: an integrated approach*. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists. Special Publication, 42, 71-108.
- Hofmann, A., Tourani, A. and Gaupp, R., 2000. Cyclicity of Triassic to Lower Jurassic continental red beds of the Argana Valley, Morocco: Implications for syn-rift sediment accumulation. *Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 161, 229-266.
- Laskar, J., Robutel, P., Joutel, F., Gastineau, M., Correia, A.C.M. and Levrard, B. 2004. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth. *Astronomy and Astrophysics*, 428, 261-285.
- Liesa, C.L., Soria, A.R., Meléndez, N. and Meléndez, A. 2006. Extensional fault control on the sedimentation patterns in a continental rift basin: El Castellar Formation, Galve sub-basin, Spain. *Journal of the Geological Society of London*, 163, 487-498.
- Markov, A.A. 1971. Extension of the limit theorems of probability theory to a sum of variables connected in a chain. In: Howard, R. (ed.), *Dynamic Probabilistic Systems*, volume 1: Markov Models, 552-577.
- Martel, A.T. and Gibling, M.R. 1991. Wave-dominated lacustrine facies and tectonically controlled cyclicity in the Lower Carboniferous Horton Bluff Formation, Nova Scotia, Canada. In: Anadón, P. Cabrera, L. and Kelts, K. (eds.), *Lacustrine facies analysis*. International Association of Sedimentologists, Special Paper, 13, 223-243.
- Mas, J.R., Alonso, A., and Guimerà, J. 1993. Evolución tectonosedimentaria de una cuenca extensional intraplaca: La cuenca finijurásica-eocretácica de Los Cameros (La Rioja-Soria). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 6 (3-4), 129-144.
- Mas, J.R., Guimerà, J. and Alonso, A. 1997. Evolution of a mesozoic intraplate extensional basin: the Cameros Basin (North Spain). Annual Meeting of IGCP Project No. 369. *Comparative Evolution of Peri-Tethyan Rift Basins*, Vol. 1, 33-36.
- Mas, R., Benito, M.L., Arribas, J., Serrano, A., Guimerà, J., Alonso, A. and Alonso Azcárate, J. 2002. La cuenca de

- Cameros: desde la extensión finijurásica-eocretácica a la inversión terciaria – implicaciones en la exploración de hidrocarburos. *Zubía*. Monográfico 14, 9-64.
- Mas, R., Benito, M.L., Arribas, J., Serrano, A., Guimerà, J., Alonso, A. and Alonso Azcárate, J. 2003. The Cameros Basin: From Late Jurassic-Early Cretaceous Extension to Tertiary Contractual Inversion-Implications of Hydrocarbon Exploration. Northwest Iberian Chain, North Spain. *Geological Field Trip*, 11, American Association of Petroleum Geologists.
- Mata, M.P., Casas, A.M., Canals, M.A., Gil, A. and Pocoví, A. 2001. Thermal history during Mesozoic extension and Tertiary uplift in the Cameros Basin, northern Spain. *Basin Research*, 13, 91-111.
- Meléndez, N., Liesa, C.L., Soria, A.R. and Meléndez, A. 2009. Lacustrine system evolution during early rifting: El Castellar Formation (Galve sub-basin, Central Iberian Chain). *Sedimentary Geology*, 222, 64-77.
- Milankovitch, M. 1941. *Kanon der Erdbestrahlungen und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem*. Royal Academy of Serbia 133, Belgrade, 633 pp.
- Muñoz, A., Soria, A., Canudo, J.I., Casas, A.M., Gil, A. and Mata, M.P. 1997. Caracterización estratigráfica y sedimentológica del Albiense marino del borde Norte de la Sierra de Cameros. Implicaciones paleogeográficas. *Cuadernos de Geología Ibérica*, 22, 139-163.
- Muñoz-Jiménez, A. and Casas-Sainz, A.M. 1997. The Rioja Trough (N Spain): tectosedimentary evolution of a symmetric foreland basin. *Basin Research*, 9, 65-85.
- Olsen, P.E. 1986. A 40-million-year lake record of early Mesozoic orbital climatic forcing. *Science*, 234, 842-848.
- Olsen, P.E. and Kent, D.V. 1996. Milankovitch climate forcing in the tropics of Pangea during the Late Triassic. *Palaeogeography Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 122, 1-26.
- Paz, J.D.S. and Rossetti, D.F. 2005. Linking lacustrine cycles with 304 syn-sedimentary tectonic episodes: an example from the Codó Formation (Late Aptian), northeastern Brazil. *Geological Magazine*, 142, 269-285.
- Sacristán-Horcajada, S., Mas, R. and Arribas, M.E. 2012. Evolución de los sistemas lacustres asociados al estadio temprano de rift en el Semigraben de Rupelo (NO de la cuenca de Cameros, España): subsidencia e influencia marina. *Geo-Temas*, 13, 159-162.
- Salas, R., Guimerà, J., Mas, R., Martín-Closas, C., Meléndez, A. and Alonso, A. 2001. Evolution of the Mesozoic Central Iberian Rift System and its Cenozoic Inversion (Iberian Chain). In: Cavazza, W., Roberston, A.H.F.R. and Ziegler, P. (eds.), *Peri-Tethyan Rift/Wrench Basins and Passive Margins*. Mémoires Museum National Histoire Naturel, 186, 145-185.
- Schudack, U. and Schudack, M. 2009. Ostracod biostratigraphy in the Lower Cretaceous of the Iberian chain (eastern Spain). *Journal of Iberian Geology*, 35, 141-168.
- Schulz, M. and Mudelsee, M. 2002. REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers & Geosciences*, 28, 421-426.
- Schwarzacher, W. 2005. Stratification and cyclicity of the Dachstein Limestone in Lophers, Leogang and Steinernes Meer (Northern Calcareous Alps, Austria). *Sedimentary Geology*, 181, 93-106.
- Soria, A.R. 1997. *La sedimentación en las cuencas marginales del surco Ibérico durante el Cretácico Inferior y su control tectónico*. Tesis Doctoral, Universidad de Zaragoza, 363 pp.
- Soria A. R., Muñoz, A., Liesa, C.L., Luzón, A., Meléndez, A. and Meléndez, M. N. 2012. Climate-driven cyclicity in an Early Cretaceous synrift lacustrine series (Aguilón sub-basin, NE Spain). *Terra Nova*, 24, 407-416.
- Stampfli, G.M. and Borel, G.D. 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letters*, 196, 17-33.
- Steenbrink, J., Van Vugt, N., Kloosterboer, M. L. and Hilgen, F.J., 2000. Refinement of the Messinian APTS from sedimentary cycle patterns of the lacustrine Lava section (Servia Basin, NW Greece). *Earth and Planetary Science Letters*, 181, 161-173.
- Suárez-González, P., Emma Quijada, I., Mas J.R. and Benito M.I. 2010. Nuevas aportaciones sobre la influencia marina y la edad de los carbonatos de la Fm Leza en el sector de Préjano (SE de La Rioja). Cretácico Inferior, cuenca de Cameros. *Geogaceta*, 49, 7-10.
- Thomson, D.J. 1990. Time series analysis of Holocene climate data. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*. Series A 330, 601-616.
- Tischer, G. 1966. El delta wealdico de las montañas ibéricas occidentales y sus enlaces tectónicos. *Notas y Comunicaciones del Instituto Geológico y Minero de España*, 81, 53-78.
- Torrence, C. and Compo, G.P. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 61-78.
- Van Vugt, N., Steenbrink, J., Langereis, C.G., Hilgen, F.J. and Meulenkamp, J.E. 1998. Magnetostratigraphy-based astronomical tuning of the early Pliocene lacustrine sediments of Ptolemais (NW Greece) and bed-to-bed correlation with the marine record. *Earth and Planetary Science Letters*, 164, 535-551.
- Villalain, J.J., Fernández-González, G., Casas, A.M. and Gil-Imaz, A. 2003. Evidence of a Cretaceous remagnetization in the Cameros Basin (North Spain): implications for basin geometry. *Tectonophysics*, 377, 101-117.
- Ziegler, P.A. 1988. *Evolution of the Arctic-North Atlantic and the Western Tethys*. American Association of Petroleum Geologists. Memoir 43, Tulsa, 198 pp.

Recibido: octubre 2012

Revisado: diciembre 2012

Aceptado: diciembre 2012

Publicado: abril 2013

