

# Ciclicidad climática en sedimentos lacustres de la Formación El Castellar (Cretácico inferior, Cordillera Ibérica)

*Climatic cyclicity of the lacustrine sediments of the El Castellar Formation (Early Cretaceous, Iberian Chain)*

Natalia Illueca\*, Carlos L. Liesa y Ana R. Soria

Departamento de Ciencias de la Tierra-Instituto de Ciencias Ambientales (IUCA), Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza, C/ Pedro Cerbuna 12, 50009 Zaragoza, Spain.  
853503@unizar.es, carluis@unizar.es, anasoria@unizar.es

\*Corresponding author

## ABSTRACT

The El Castellar Formation (late Hauterivian-early Barremian) in the Castillo de Aliaga section (Galve sub-basin, NE Spain) consists mainly of lacustrine marls and limestones. The spectral analysis of time series (depth domain) constructed from data of magnetic susceptibility and lithology shows the presence of three stratigraphic cycles, with periodicities of ~57, ~13 and ~3 m. These cycles have been attributed to large eccentricity (405 kyr), short eccentricity (95 kyr) and large precession (22.4 kyr) cycles, respectively. The series comprises 10 complete cycles of short eccentricity and another two incomplete, so that the studied succession would represent a time interval of ca. 1 Ma, what is in accordance with the chronostratigraphic framework of the subbasin.

**Key-words:** Milankovitch cycles, periodicity, cyclostratigraphy, spectral analysis, data series.

## RESUMEN

La Formación El Castellar (Hauteriviense superior-Barremiense basal) en el perfil Castillo de Aliaga (subcuenca de Galve, NE España) está constituida principalmente por margas y calizas lacustres. El análisis espectral de series temporales (en el dominio de profundidad) de susceptibilidad magnética y litología muestra la presencia de tres ciclos estratigráficos, con periodicidades de ~57, ~13 y ~3 m, que han sido atribuidos, respectivamente, a los ciclos orbitales de excentricidad larga (405 ka) y corta (95 ka), y precesión larga (22,4 ka). La serie comprende 10 ciclos completos de excentricidad corta y otros dos incompletos, por lo que los sedimentos estudiados representarían en torno a 1 Ma, lo que está de acuerdo con el marco cronoestratigráfico de la subcuenca.

**Palabras clave:** Ciclos de Milankovitch, periodicidad, cicloestratigrafía, análisis espectral, series de datos.

Geogaceta, 74 (2023), 3-6  
<https://doi.org/10.55407/geogaceta98398>  
ISSN (versión impresa): 0213-683X  
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 10/02/2023

Fecha de revisión: 20/04/2023

Fecha de aceptación: 26/05/2023

## Introducción

La Formación El Castellar (Hauteriviense superior-Barremiense inferior) forma parte del registro geológico del margen occidental de la cuenca extensional cretácica del Maestrazgo. En la subcuenca de Galve, esta unidad está constituida por depósitos aluviales en su base, que evolucionan a una alternancia de margas y calizas de ambiente lacustre. La estratigrafía, paleontología, sedimentología y relaciones tectónica-sedimentación han sido ampliamente descritas (Soria, 1997; Soria et al., 2001; Liesa et al., 2006, 2023; Meléndez et al., 2009; Gasca, 2015; Castanera et al., 2022). Este trabajo pretende dar un paso más, estudiando la ciclicidad estratigráfica y climática de esta formación en esta subcuenca, como ya se ha realizado con éxito en otras unidades cretácicas de cuencas sedimentarias ibéricas (Soria et al., 2012; Muñoz et al., 2020). Para ello, se ha levantado un perfil estratigráfico de detalle en la zona de Aliaga (perfil Castillo de Aliaga; Fig. 1)

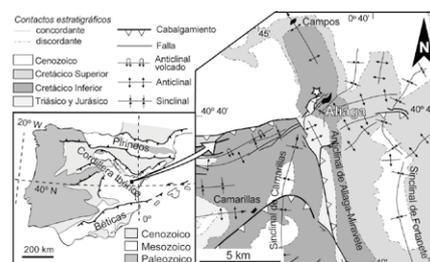
de la parte media y superior lacustre de esta unidad (Soria, 1997; Meléndez et al., 2009).

## Metodología

El perfil Castillo de Aliaga (40°40'37" N y 0°42'26"W), de 129 m, ha sido levantado capa a capa y representado a escala 1:50. Se tomaron 146 muestras (una por cada metro del perfil, más 16 extra); 98 de las cuales se estudiaron en sección pulida y/o lámina delgada, y 48 fueron levigadas y estudiadas con lupa binocular.

El análisis de la ciclicidad de esta unidad se ha realizado a partir de la construcción de dos series de datos: susceptibilidad magnética y litología. La primera de ellas está basada en datos cuantitativos tomados directamente en campo con un susceptómetro KT-20 (Georadis). La segunda se basa en un modelo numérico que distingue la litología de las rocas y sedimentos. El modelo numérico aplicado es: conglomerado (valor 1), arena (2), limo (3), arcilla (4), marga (5), margo-

caliza (6), caliza con textura *packstone* (7), caliza con textura *wackestone* (8) y caliza con textura *mudstone* (9). Todas las series están construidas con una frecuencia de un dato cada 50 cm (259 datos cada serie). Cada dato de la serie de susceptibilidad magnética promedia, al menos, tres mediciones para minimizar los errores instrumentales.



**Fig. 1.- Mapa geológico del sector noreste de la subcuenca de Galve (Cordillera Ibérica) con la localización del perfil Castillo de Aliaga (estrella) (modificado de Meléndez et al., 2009).**

*Fig. 1.- Geological map of the north-eastern sector of the Galve subbasin (Iberian Range) and location of the Castillo de Aliaga profile (star) (modified of Meléndez et al., 2009).*

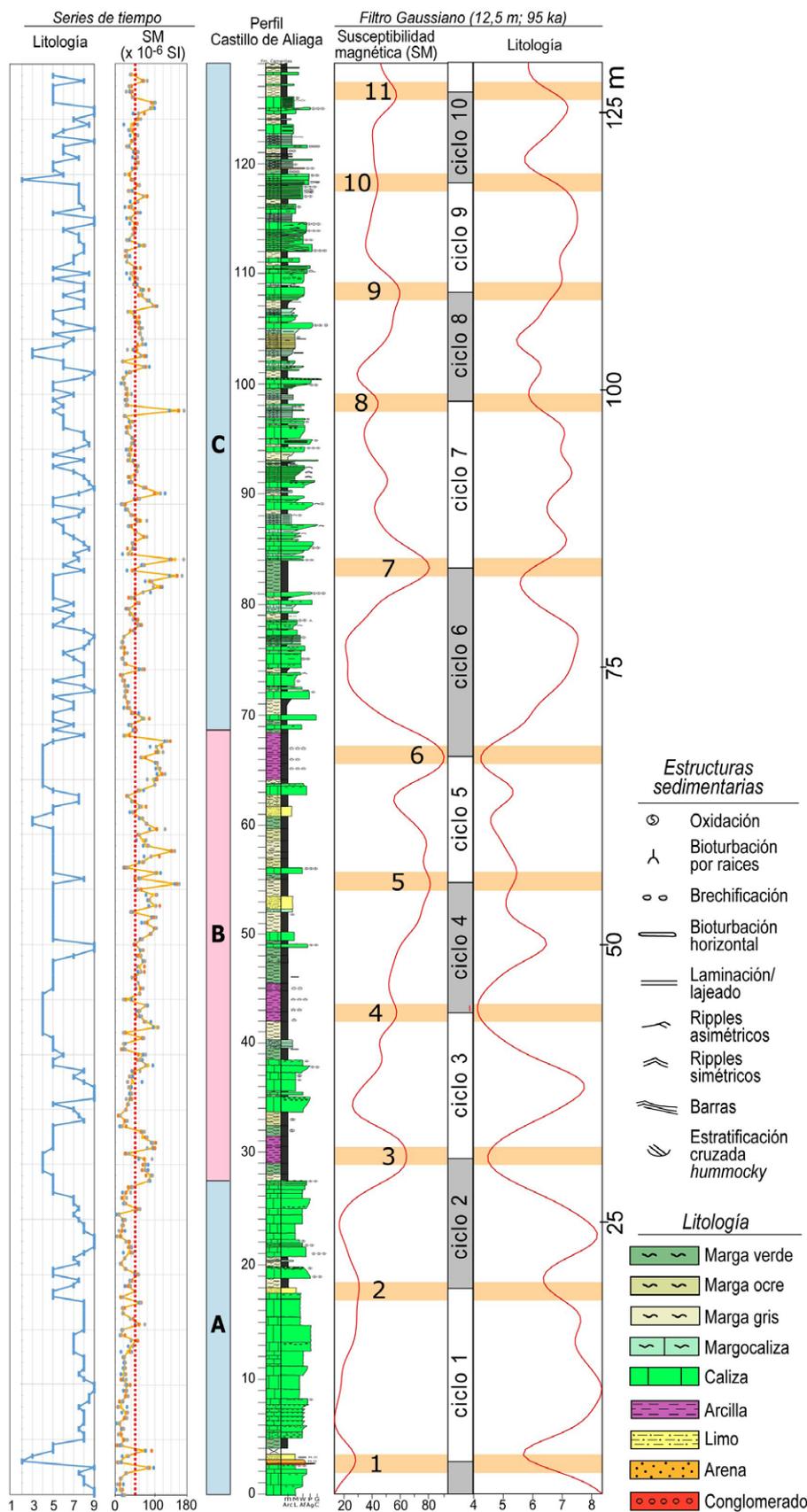
El análisis espectral (de tipo RedFit; Schulz y Mudelsee, 2002) de las series temporales (en *depth domain*) se ha llevado a cabo utilizando el software PAST (Hammer *et al.*, 2001). Se han utilizado las bandas de confianza del 95% y 99%, calculadas a partir de un modelo de ruido rojo AR(1) (Schulz y Mudelsee, 2002). Las periodicidades obtenidas se han relacionado, a partir de sus relaciones mutuas, con las correspondientes a los ciclos orbitales de la banda de frecuencia de Milankovitch (1941) para el intervalo temporal estudiado, siguiendo a Laskar *et al.* (2011). Se ha aplicado un filtro gaussiano, centrado en una frecuencia 0,08 (12,5 m), para facilitar una mejor visualización de los ciclos de excentricidad corta (moda 95 ka).

**Resultados**

El perfil Castillo de Aliaga estudiado corresponde al tramo medio-superior lacustre de la Formación el Castellar. La litología es principalmente carbonatada, alternando materiales margosos y calcáreos, e intercalando ocasionalmente niveles detríticos de arcillas (Fig. 2). En el perfil se diferencian dos tramos carbonatados (A y C; Fig. 2) separados por uno lutítico (B). Son abundantes los rasgos de exposición subaérea como bioturbación, brechificación y oxidación, y, en la parte superior del perfil, presenta laminaciones y estratificaciones cruzadas.

Los valores de susceptibilidad magnética oscilan entre 2 y 173 x10<sup>-6</sup> SI, con un promedio de 50,6 x10<sup>-6</sup> SI (línea roja discontinua; Fig. 2). Los tramos carbonatados A y C tienen valores de susceptibilidad magnética por debajo de la media, y el tramo lutítico intermedio B tiene valores que están por encima de ella. Las dos series de tiempo (susceptibilidad magnética y litología) muestran a lo largo de la serie estratigráfica variaciones y tendencias cíclicas de sus valores.

Los resultados del análisis espectral de ambas series de datos muestran picos principales de frecuencia que pasan la banda de confianza del 95% y, a veces, están relativamente próximos entre sí (Fig. 3A). En el espectro de potencia de la serie de susceptibilidad magnética, el pico más importante tiene una periodicidad de 13,2 m. También sobrepasan dicha banda de confianza picos con periodicidades de 57,3, 34,4 y 1,4 m, y casi lo alcanza un pico en 3,3 m. En el espectro de potencia de la serie litología, dos picos en 1,6 y 1,4 m superan la banda de confianza del 99%;



**Fig. 2.-** Columna estratigráfica Castillo de Aliaga de la Formación El Castellar, series de datos de susceptibilidad magnética y litología y curvas suavizadas mediante filtro gaussiano (25 datos, 12,5 m) con los ciclos diferenciados y atribuidos a la excentricidad corta (95 ka) (ver figura a color en versión web).

**Fig. 3.-** The Castillo de Aliaga stratigraphic section of the El Castellar Formation, the data curves of lithology and magnetic susceptibility (MN) series, and smoothed curves (by gaussian filter; 25 data, 12.5 m) with the distinguished cycles, here attributed to the short eccentricity (95 kyr) cycles (see color figure on web).

otros tres picos, con periodicidades de 86, 13,2 y 3,3 m, superan la del 95%, y el pico de 57,3 m casi lo alcanza (Fig. 3A).

## Interpretación y discusión

Los resultados del análisis espectral de las dos series de tiempo son bastante similares (Fig. 3A). El ciclo de periodicidad mejor definida en ambas series es el de 13,2 m (banda de frecuencias F2 en Fig. 3A). El ciclo de 3,3 m aparece bien definido en la serie litología y se observa, aunque sin alcanzar la banda de confianza del 95%, en la serie de susceptibilidad magnética (banda F3; Fig. 3A). En frecuencias más bajas y en frecuencias más altas se han reconocido varios ciclos muy próximos entre sí, con periodicidades de 86, 57,3 y 34,4 m los primeros (banda F1), y de 1,6 y 1,4 m los segundos (banda F4).

Siguiendo a Muñoz *et al.* (2020), estas periodicidades tan próximas probablemente representan la expresión de un único ciclo y resultan de variaciones o alteraciones asociadas a una actividad tectónica coetánea con la sedimentación. Durante el depósito de la Formación El Castellar se ha descrito en la subcuenca de Galve una importante actividad tectónica asociada a fallas normales (Liesa *et al.*, 2006, 2019;

Meléndez *et al.*, 2009), la cual produciría cambios en la tasa de subsidencia y, por tanto, en los espesores registrados de los ciclos. En estos casos, puede diferenciarse una periodicidad principal y otra/s secundaria/s o subordinada/s.

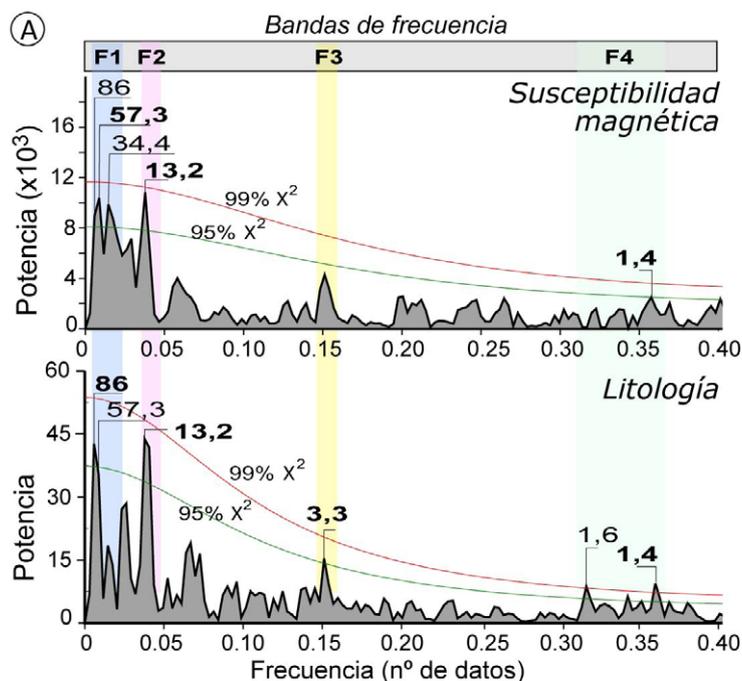
En el caso de la banda F1, las periodicidades de 86 y 57,3 m representan, respectivamente, el pico principal en la serie de litología y en la de susceptibilidad magnética, aunque en ambos casos el espectro muestra un continuo entre ellos. Hemos considerado la periodicidad de 57,3 m como principal porque damos más confianza a los resultados obtenidos de la serie de datos de la susceptibilidad magnética y porque, como veremos más adelante, presenta un mejor ajuste en las relaciones entre los diferentes ciclos y su comparación con los ciclos de Milankovitch (Fig. 3B,C). La periodicidad de 34,4 m también representaría probablemente un ciclo subordinado.

En el caso de la banda F4, la periodicidad de 1,4 m se considera la principal, por estar presente en los dos espectros de potencia, y la periodicidad 1,6 m, la subordinada.

Para relacionar los ciclos (principales y subordinados) inferidos en el perfil, expresados en metros, con los ciclos climáticos de origen astronómico (excentricidad, oblicuidad y precesión; Milankovitch, 1941), expresados en tiempo, se han estudiado las relaciones mutuas entre los mismos (Fig. 3B y C). En el primer caso, se han tenido en cuenta las duraciones de los ciclos durante el periodo de tiempo estudiado (Laskar *et al.*, 2011), es decir, la edad Hauteriviense-Barremiense de la unidad (Fig. 3B).

Las relaciones entre las periodicidades obtenidas en el Perfil del Castillo de Aliaga (Fig. 3C) muestran un buen ajuste en sus valores con las relaciones entre algunos de los ciclos de la banda de frecuencia de Milankovitch, especialmente cuando se comparan las relaciones entre las periodicidades principales obtenidas (valores destacados en negrita y con color rojo en figuras 3A y 3B). Según este ajuste, las periodicidades principales de 57,3 m, 13,2 m y 3,3 m representarían, respectivamente, los ciclos de excentricidad larga (405 ka), excentricidad corta (moda de 95 ka) y precesión larga (22,4 ka).

Los ciclos de más alta frecuencia (banda F4) no quedan dentro de este esquema. Estos ciclos podrían ser bien el reflejo de ciclos de precesión en momentos donde la tasa de sedimentación fuera más reducida, quizás en relación con una menor subsidencia asociada al movimiento de las fallas normales que



## B) Relaciones entre ciclos para el Cretácico Inferior

Ciclos	Excentricidad			Oblicuidad	Precesión	
	Larga	Corta			Larga	Corta
Tiempo (Ka)	405	125	95	37,2	22,4	18,2
405	1	3,24	4,26	10,89	18,08	22,25
125		1	1,32	3,36	5,58	6,87
95			1	2,55	4,24	5,22
37,2				1	1,66	2,04
22,4					1	1,23
18,2						1

## C) Relaciones entre las periodicidades obtenidas en el perfil Castillo de Aliaga

Ciclos (m)	Bandas de Frecuencia						
	F1	F2	F3	F4	F4	F4	
	86	57,3	34,4	13,2	3,3	1,6	1,4
86	1	1,50	2,50	6,51	26,06	53,75	61,42
57,3		1	1,66	4,33	17,31	35,81	40,93
34,4			1	2,60	10,42	21,50	24,57
13,2				1	4,00	8,25	9,43
3,3					1	2,06	2,36
1,6						1	1,14
1,4							1

Relación entre periodicidades:

- 1,50 de la misma banda de frecuencia
- 35,81 de distinta banda de frecuencia
- 40,93 principales de distinta banda de frecuencia
- 4,00 principales de distinta banda de frecuencia y correlacionadas con los ciclos de Milankovitch

**Fig. 3.- Resultados del análisis espectral. A) Espectros de potencia (periodicidades en metros) para las series de tiempo de susceptibilidad magnética y litología (periodicidades principales en negrita). B) Relaciones entre los ciclos de Milankovitch, con las periodicidades correspondientes al Cretácico Inferior (Laskar et al., 2011). C) Relaciones entre las periodicidades obtenidas en el perfil Castillo de Aliaga (ver A). (Ver figura a color en versión web).**

Fig. 3.- Results of the spectral analysis. A) Power spectra (periodicities in metres) for the time series of magnetic susceptibility and lithology (main periodicities in bold). B) Relations between all Milankovitch cycles, with the periodicities corresponding to Lower Cretaceous (Laskar et al., 2011). C) Relations between the periodicities obtained in the Castillo de Aliaga section by spectral analysis (see A). (See color figure on web).

controlaron el depósito de la unidad, o bien ciclos por debajo de la banda de frecuencia de los ciclos de Milankovitch.

Las curvas de susceptibilidad magnética y litología suavizadas con filtro gaussiano (25 datos, 12,5 m), centrado en el ciclo principal con periodicidad de 13,2 m (ciclo de excentricidad corta de 95 ka), muestran con claridad el carácter cíclico de la unidad, aunque los máximos tienen distinta amplitud (Fig. 2). Nótese cómo ambas series muestran normalmente una correlación inversa, de modo que los máximos de susceptibilidad magnética (destacados con fondo naranja y numerados en orden cronológico) se correlacionan frecuentemente con los mínimos de la serie de litología (facies detríticas), y viceversa. Los máximos de la serie de susceptibilidad magnética han sido utilizados para definir los diferentes ciclos de 95 Ka. La serie comprende un total de 10 ciclos completos y otros dos incompletos, de modo que podemos inferir que el perfil estudiado comprendería un intervalo temporal de en torno a 1 Ma. No obstante, no existen hasta el momento datos de edad absoluta que permitan la calibración astrocronológica de la misma a partir de los resultados obtenidos en este trabajo.

Esta interpretación cicloestratigráfica resulta plausible, además, por: i) implica tasas de sedimentación moderadas (~129 mm/ka), coherentes con la transición entre la etapa de iniciación y de clímax del *rifting* de esta unidad (Liesa *et al.*, 2006), y parecidas a las de otras unidades bajo régimen tectónico similar (Doglioni *et al.*, 1998; Navarrete, 2015); ii) el intervalo temporal que abarcan los sedimentos estudiados (~1 Ma) es coherente con el marco cronoestratigráfico establecido para esta unidad a partir de la edad proporcionada por asociaciones de carofitas y de las relaciones estratigráficas entre la unidades infra- y suprayacentes (Soria, 1997; Gasca, 2015; Aurell *et al.*, 2016; Liesa *et al.*, 2019), y iii) la baja latitud (20-25°N) del área de estudio podría ser la causa de que no haya quedado registrado el ciclo de oblicuidad (Olsen, 1986).

Por último, los ciclos estratigráficos registrados serían un reflejo de ciclos climáticos, con gran efecto sobre la sedimentología y condiciones ambientales del sistema. Meléndez *et al.* (2009) ya definieron las secuencias de somerización que se desarrollan en la unidad lacustre, y es razonable atribuir estas secuencias de somerización con la potencial ciclicidad climática determinada en este estudio.

## Conclusiones

El estudio cicloestratigráfico de la Formación El Castellar permite establecer que el registro sedimentario de la unidad tuvo un control climático orbital, registrándose los ciclos de excentricidad larga (405 ka), excentricidad corta (95 ka) y precesión larga (22,4 ka), con una periodicidad media de 57,3 m, 13,2 m y 3,3 m, respectivamente. Algunos de los ciclos muestran picos subordinados que probablemente son el reflejo de los cambios de subsidencia asociados a la actividad de fallas normales coetáneas con la sedimentación. El reconocimiento de, al menos, 10 ciclos de 95 ka a lo largo de la serie, implica un rango de edad para la misma de ~1 Ma, encajando con el que se atribuye a la Formación El Castellar, de edad Hauteriviense superior-Barremiense basal.

## Contribución de los autores

Los tres coautores levantaron la columna estratigráfica, tomaron las muestras y obtuvieron los datos. La primera autora hizo el estudio cicloestratigráfico. La redacción fue abordada conjuntamente por los tres coautores.

## Agradecimientos y financiación

Los autores agradecen el uso de Servicio General de Apoyo a la Investigación-SAI, Universidad de Zaragoza, los comentarios de dos revisores anónimos y la labor del editor. Esta investigación ha sido financiada por la Agencia Estatal de Investigación (AEI/10.13039/501100011033) del Gobierno de España (proyecto PID2019 - 108705 - GB - I00,) y el Gobierno de Aragón (E32\_20R: Grupo *Geotransfer. Investigación Geológica para la Ciencia y la Sociedad*). N. Illueca se beneficia de un contrato dentro del Programa INVESTIGO, en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y resiliencia.

## Referencias

- Aurell, M., Bádenas, B., Gasca, J.M., Canudo, J.I., Liesa, C., Soria, A.R., Moreno-Azanza, M. y Najas, L. (2016). *Cretaceous Research* 65, 138-162. <https://doi.org/10.1016/j.cretres.2016.04.020>
- Castanera, D., Bádenas, B., Aurell, M., Canudo, J.I. y Gasca, J.M. (2022). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 591, 110866. <https://doi.org/k6bt>

- Doglioni, C., Carminati, E., Crespi, M., Cuffaro, M., Penati, M. y Riguzzi, F. (1998). *Marine and Petroleum Geology* 15, 737-750. [https://doi.org/10.1016/S0264-8172\(98\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0264-8172(98)00052-X)
- Gasca, J.M. (2015). *Aportaciones al conocimiento sobre los dinosaurios del barremiense inferior (Cretácico inferior) de Teruel, España asociaciones fósiles, sistemática, paleobiodiversidad y afinidades paleobiogeográficas*. Tesis doctoral, Univ. de Zaragoza, 234 p.
- Hammer, Ø., Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. (2001). *Paleontologia Electronica* 4. <http://palaeo-electronica.org>
- Laskar, J., Fienga, A., Gastineau, M. y Manche, H. (2011). *Astronomy & Astrophysics* 532, A89. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201116836>
- Liesa, C.L., Soria, A.R., Meléndez, N. y Meléndez, A. (2006). *Journal of the Geological Society* 163(3), 487-498. <https://doi.org/10.1144/0016-764904-169>
- Liesa, C.L., Casas, A.M., Aurell, M., Simón, J.L. y Soria, A.R. (2023). *Basin Research* 35, 295-335. Doi: 10.1111/bre.12713
- Meléndez, M.N., Liesa, C.L., Soria, A.R. y Meléndez, A. (2009). *Sedimentary Geology* 222, 64-77. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2009.05.019>
- Milankovitch, M.M. (1941). Canon of insolation and the iceage problem. *Königlich Serbische Akademie Beograd Special Publication* 132, 484 p.
- Muñoz, A., Angulo, A., Liesa, C.L., Luzón, M.A., Mayayo, M.J., Pérez, A., Soria, A.R., Val, V. y Yuste, A. (2020). *Boletín Geológico y Minero* 131(2), 243-268. <https://doi.org/k6bv>
- Navarrete, R. (2015). *Controles alocíclicos de la sedimentación barremiense en la Subcuenca de Galve (Formación Camarillas, margen occidental e la Cuenca del Maestrazgo)*. Tesis doctoral, Univ. de Zaragoza, 444 p.
- Olsen, P.E. (1986). *Science* 234, 842-848. Doi: 10.1126/science.234.4778.842
- Schulz, M. y Mudelsee, M. (2002). *Computers & Geosciences* 28, 421-426. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(01\)00044-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00044-9)
- Soria, A. (1997). *Estudio estratigráfico-sedimentológico y tectónico del Cretácico inferior en la parte occidental de la cuenca del Maestrazgo, subcuencas de Las Parras y Galve*. Tesis doctoral, Univ. de Zaragoza, 363 p.
- Soria A.R., Liesa C.L., Meléndez A. y Meléndez M.N. (2001). *Geotemas* 3, 257-260.
- Soria, A.R., Muñoz, A., Liesa, C.L., Luzón, A., Meléndez, A. y Meléndez, M.N. (2012). *Terra Nova* 24, 407-416. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3121.2012.01080.x>