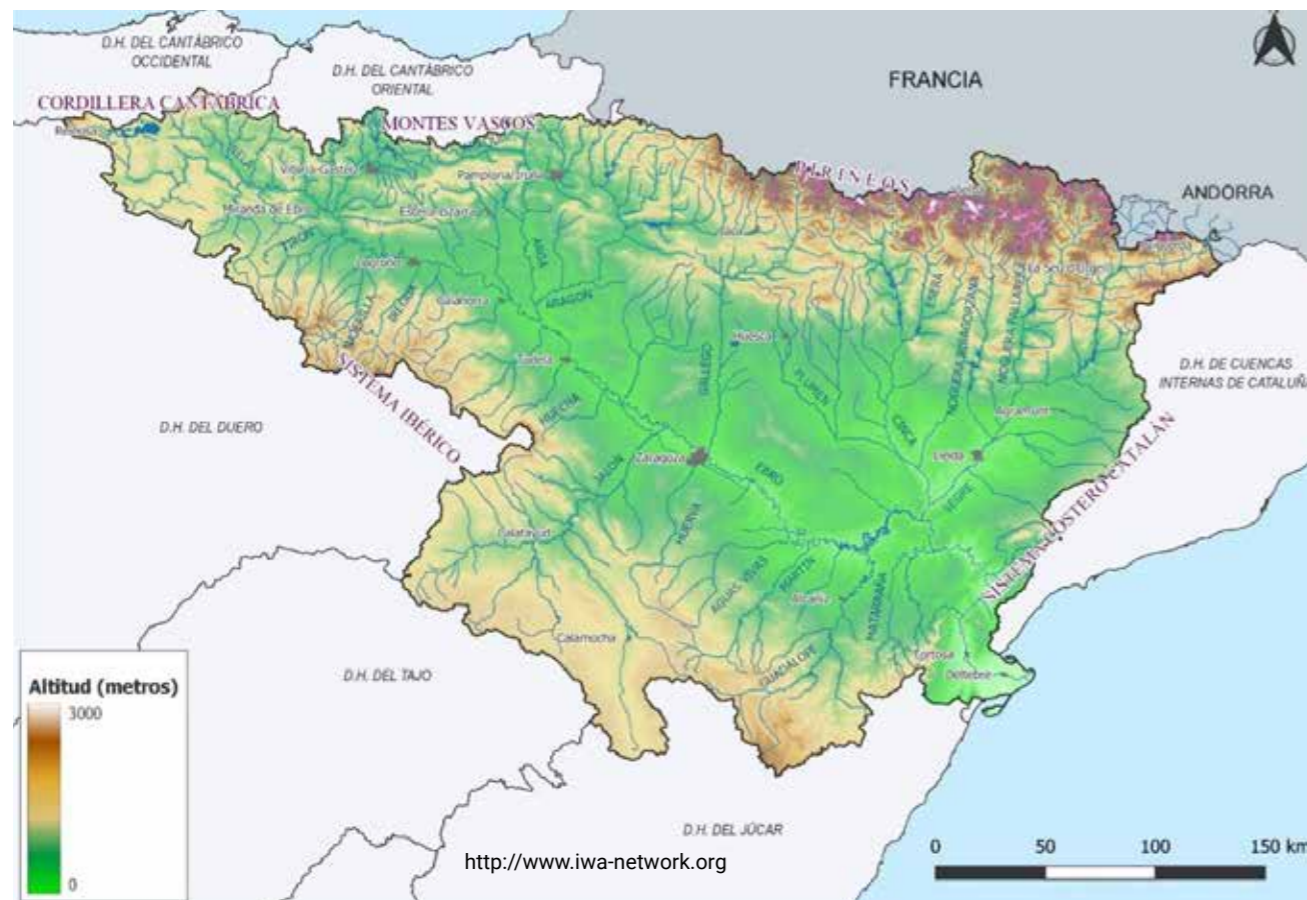


“El propósito de este artículo es conocer las causas (paleogeográficas y paleoclimáticas) de por qué la Formación Zaragoza y las dolinas están extensamente representadas en el Valle del Ebro.”

# Los lagos miocenos de la cuenca del Ebro: dinámica y paleoclima

Gonzalo Pardo, Concha Arenas y Francisco Javier Pérez Rivarés





En el nº 27 de *conCiencias.digital*, nuestros colegas Asunción Soriano y Andrés Pocoví nos ilustraban en un excelente artículo, titulado “El tiempo entre dolinas”, sobre estas depresiones de origen kárstico, su génesis y los riesgos que implican. Se referían en forma concreta a la presencia frecuente de dolinas en el Valle medio del Ebro y en la misma ciudad de Zaragoza, y señalaban que su génesis era debida a la disolución del substrato rocoso existente bajo los suelos recientes en muchas áreas de las zonas citadas. Ese substrato es bien conocido: está formado mayoritariamente por estratos de yesos ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) que alternan con capas de margas y lutitas. Estos depósitos son fácilmente reconocibles en los taludes de las vías de tren o carretera en los alrededores de Zaragoza y en los escarpes del río Ebro al este y al oeste de la ciudad, y son la base mineral del paisaje estepario monegrino (figura 1). En la literatura geológica estos depósitos son conocidos como Formación Zaragoza (Fm Zaragoza), o Yesos de Zaragoza, unidad litoestratigráfica que fue definida por Quirantes (1969-1971). En profundidad se encuentran otras sales: anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ), glauberita ( $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$ )

“Durante la mayor parte de la Era Cenozoica hasta hoy mismo, el acercamiento de las placas Africana e Ibérica ha dado lugar a la creación de diferentes relieves alpinos.”

y halita ( $\text{NaCl}$ ), esta última como la que se explota en Remolinos. El yeso, a pesar de ser la roca aflorante que da nombre a la formación, solo aparece en los 100 metros más superficiales de los sondeos realizados en ella, como resultado de la hidratación de la anhidrita. Si la génesis de las dolinas está relacionada con la composición litológica de la Fm Zaragoza, el propósito de este artículo es conocer las causas (paleogeográficas y paleoclimáticas) de por qué ambas, la Fm Zaragoza y las dolinas, están extensamente representadas en el Valle del Ebro.

#### EL ORIGEN DE LA FORMACIÓN ZARAGOZA

Durante la mayor parte de la Era Cenozoica, que abarca desde los 66 millones de años (Ma), hasta hoy mismo, el acercamiento de las placas Africana e Ibérica ha dado lugar a la creación de diferentes relieves alpinos, como los Pirineos, las cadenas Ibéricas y Costerocatalana, las Béticas y el Sistema Central. La estructuración de las cordilleras Pirenaica, Ibérica y Costerocatalana supuso la creación de una depresión entre ellas; en lenguaje geológico, una cuenca sedimentaria intermontañosa: la Cuenca del Ebro. Esta cuenca quedó aislada de los

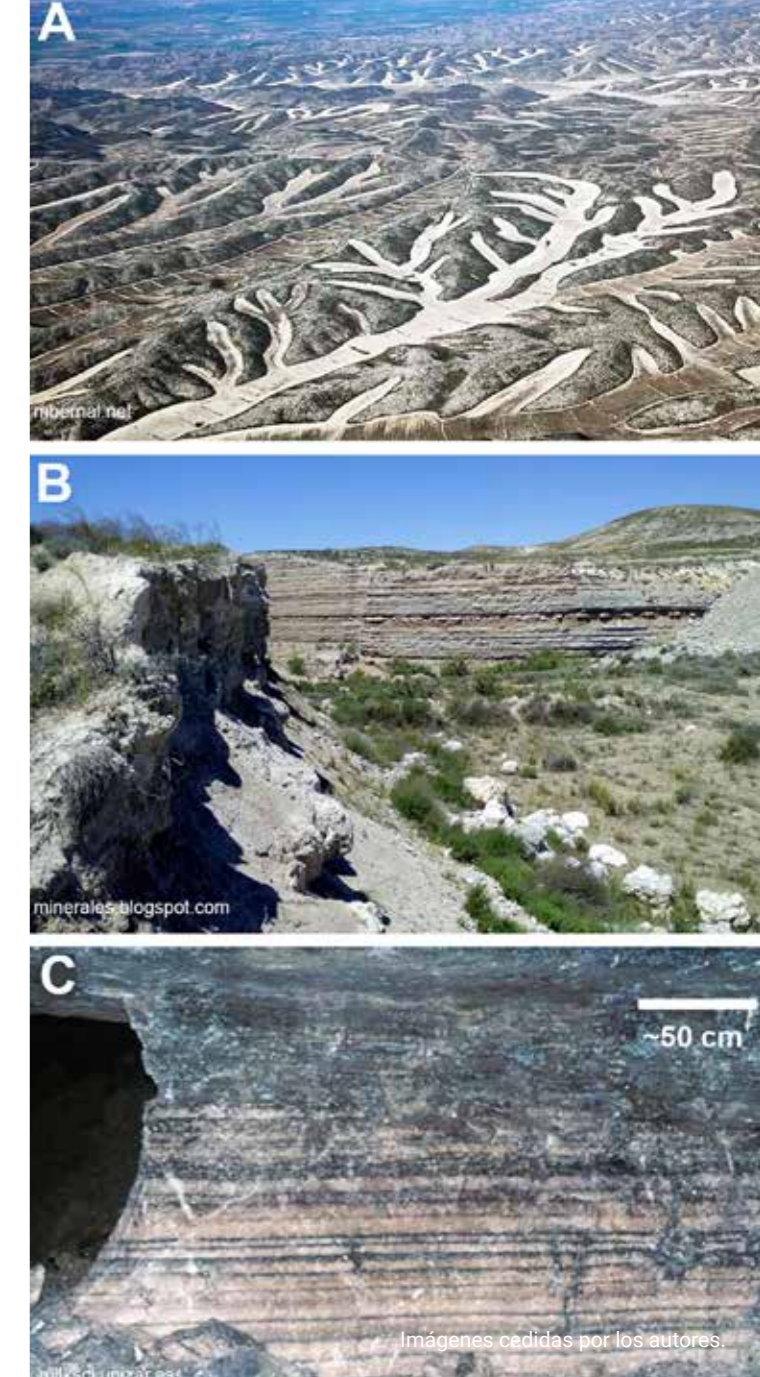


Figura 1: diversos aspectos de la Formación Zaragoza.

A) Paisaje de vales cultivadas sobre los yesos en el área de Alfajarín.

B) Explotación de grandes nódulos de yeso alabastrino en Fuentes de Ebro.

C) Un aspecto de la halita explotada en Remolinos.

océanos que rodeaban la Península hace 36 Ma (Costa et al., 2010), y permaneció en régimen endorreico hasta su apertura al Mediterráneo en un momento aún no precisado del Mioceno Superior, entre los 11,5 y 8,5 Ma (García-Castellanos et al., 2003). Durante este amplio espacio temporal, en la Cuenca del Ebro se emplazaron sucesivos sistemas lacustres cerrados y extensos que ocupaban las áreas más deprimidas en cada momento. En las situaciones climáticas de mayor aridez tales lagos eran someros, con aguas de alta salinidad. Se suceden así diferentes depósitos evaporíticos bautizados como Yesos de Barbastro, Puente La Reina y Tafalla-Falces, que se depositaron en el Oligoceno inferior, y ya durante el Oligoceno superior y Mioceno Inferior los Yesos de Zaragoza y sus equivalentes occidentales de Lerín y Los

Arcos. La Fm Zaragoza, que ocupa el centro de la cuenca, tiene una edad entre aproximadamente 28 y 16 Ma.

La existencia de anhidrita, glauberita y halita en niveles subsuperficiales de la Fm Zaragoza implica una historia compleja de precipitación mineral en un ambiente lacustre cerrado a partir de salmueras sulfato-cloruradas con suficiente Ca, Mg y Na, procesos de bombeo evaporítico en las llanuras fangosas que rodeaban al lago y transformaciones diagenéticas ulteriores (véase Salvany et al., 2007). Estos sistemas sedimentarios se conocen en la literatura geológica como *complejos de playa-lake*. Los sulfatos primarios fueron depositados como láminas en el fondo del lago (facies Sl) o estructurados como ripples debido a la acción del oleaje (facies Sr), mientras que los procesos de bombeo evaporítico condujeron a la formación de nódulos (facies Sn) y grandes tolvas de halita en las llanuras fangosas que rodeaban el cuerpo de agua. La meteorización que acompañó a la exhumación de la Fm Zaragoza dio como resultado los yesos secundarios, de textura microcristalina o también conocida como alabastrina, actualmente aflorantes, en los que, en ocasiones, aún se reconocen las formas laminares y los ripples primarios (figura 2).

Este último proceso –la exhumación– se inició en el Mioceno Superior debido a la creación y encajamiento de la red hidrográfica, cuando la cuenca adquirió el carácter

exorreico que continúa hoy. Según García-Castellanos et al. (2003) la red hidrográfica del Ebro, desde entonces, ha evacuado al Mediterráneo unos 30.000 km<sup>3</sup> de materiales del relleno de la Cuenca del Ebro y de las cordilleras que la enmarcan (figura 3). Se obtiene así la explicación del relieve actual en mesas y sierras característico del Valle central del Ebro: los Montes de Castejón, la Sierra de Alcubierre, la Plana de Zaragoza o La Muela son, en definitiva, relieves formados por erosión, testigos del relleno de la cuenca, donde los estratos conservan la disposición prácticamente horizontal del depósito original. Pero esta disposición cambia a sinclinales más o menos apretados allí donde la aparición de dolinas induce subsidencia en los estratos suprayacentes.

Con el clima del Mioceno Inferior en la Cuenca del Ebro como objetivo, este artículo se centrará en la Fm Zaragoza y su contexto paleogeográfico en un intervalo temporal que va de 21,4±0,10 a 16,2±0,14 Ma, según las dataciones magnetoestratigráficas realizadas en diversas secciones en la Sierra de Alcubierre, los Montes de Castejón y las Bardenas Reales (Pérez-Rivarés, 2016; Pérez-Rivarés et al., 2018). Durante este intervalo se registra en la cuenca un complejo de sistemas sedimentarios que recogían los productos erosionados en las cordilleras en levantamiento. Estos sedimentos (sólidos y en disolución) eran transportados y depositados en la Cuenca de Ebro por abanicos aluviales de corto recorrido y por amplios abanicos fluviales que alimentaban un

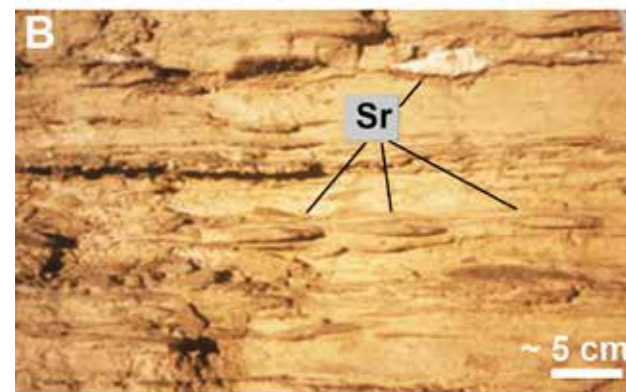


Figura 2: imágenes de campo de los yesos alabastrinos de la Fm Zaragoza.

A) Alternancia de yesos nodulosos y laminados (facies Sn y Sl).

B) Yesos con ripples (Sr).

C) Seudomorfos de tolvas de halita en yeso, en la llanura fangosa que rodeaba el lago salino de Remolinos.

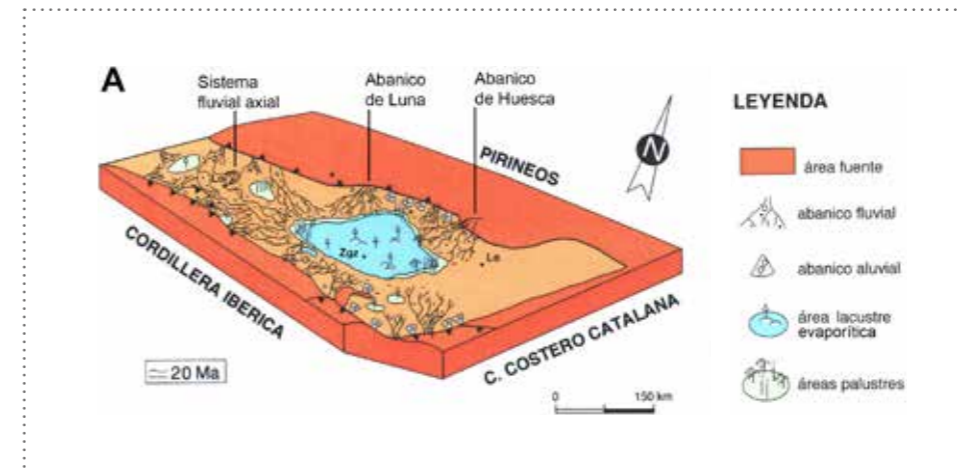
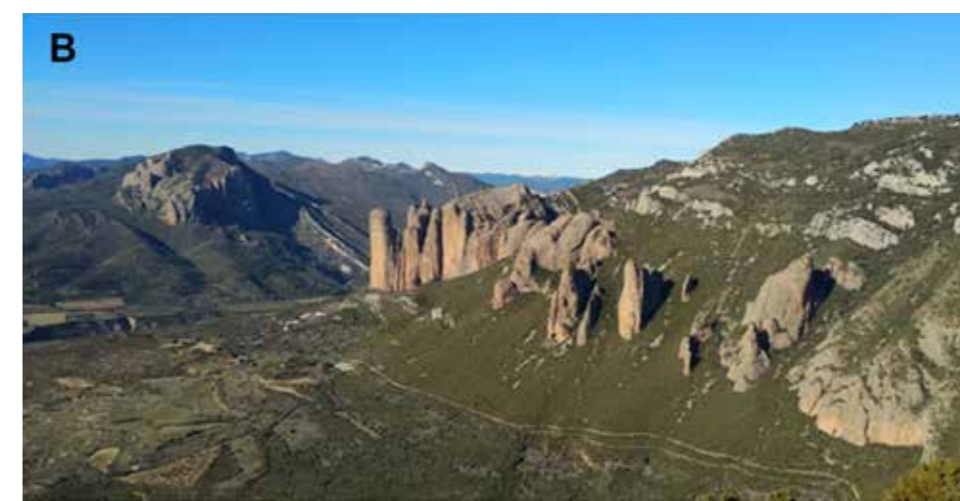


Figura 3:

A) Esquema paleogeográfico de la Cuenca del Ebro alrededor de los 20 Ma (modificado de Muñoz et al., 2002). En el momento representado, los cursos fluviales serían efímeros, y en el lago tendría lugar la precipitación de sulfatos o de halita de la Fm Zaragoza.



B) Foto de campo de conglomerados del sector proximal del abanico de Luna, con los Mallos de Riglos y de Murillo.

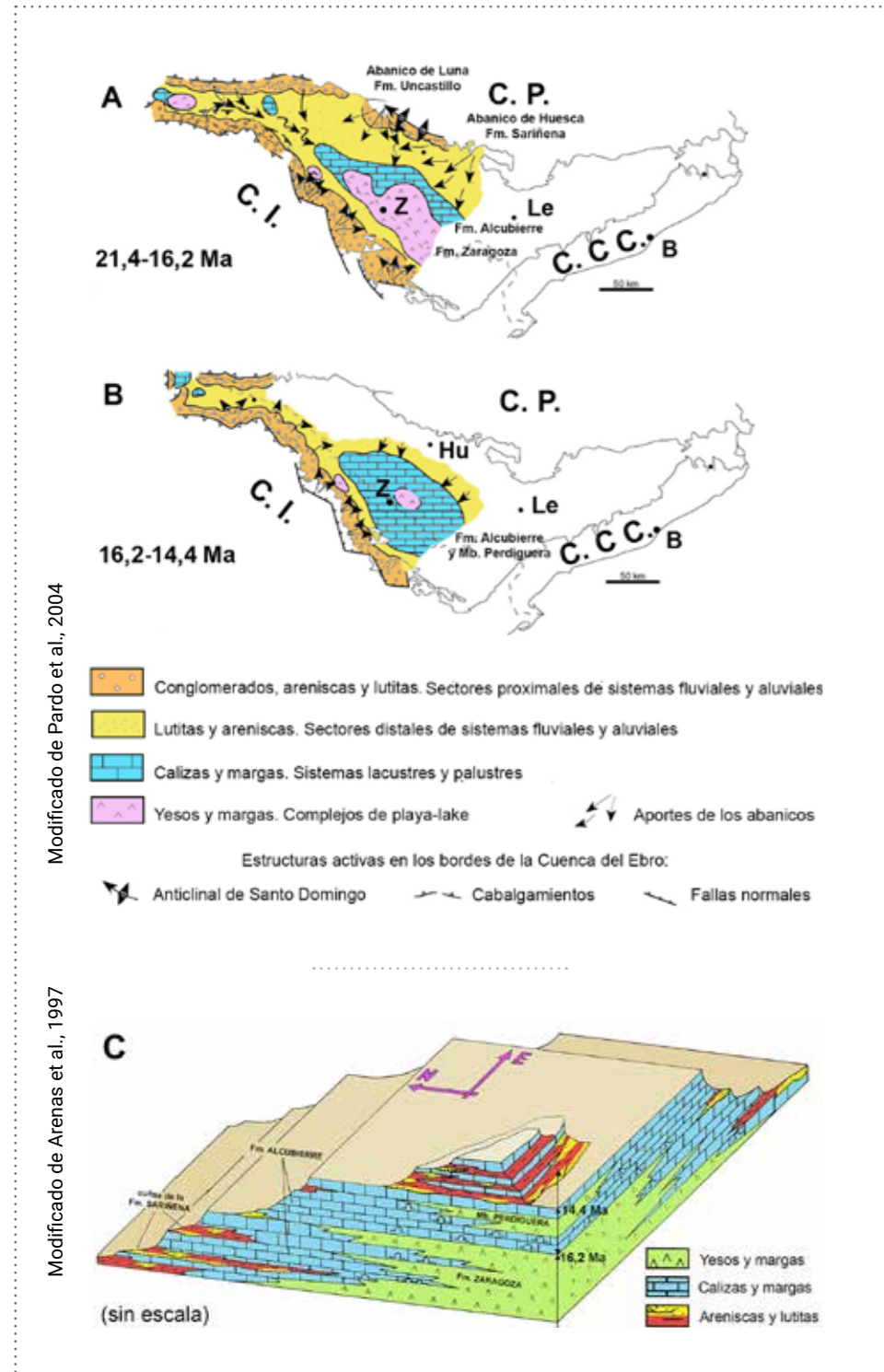


C) Imagen de su sector distal, con areniscas y lutitas acaravadas en Las Bardenas.

área lacustre extensa situada en el centro de la cuenca. El mayor volumen de materiales era suministrado desde el Pirineo por dos grandes abanicos fluviales (denominados sistemas de Huesca y Luna por Hirst y Nichols, 1986), cuyos conglomerados del borde de la cuenca y sus areniscas y lutitas de sectores más distales constituyen paisajes espectaculares.

**LAS FORMACIONES DE ZARAGOZA Y ALCUBIERRE: IMPLICACIONES CLIMÁTICAS DE SU RELACIÓN LATERAL Y VERTICAL**

Si se observa un esquema cartográfico muy simplificado de los materiales presentes en la Cuenca del Ebro durante ese intervalo de, aproximadamente, 21,4 a 16,2 Ma,



**Figura 4:**  
**A y B) Cartografía esquemática de la Cuenca del Ebro durante el intervalo temporal de los 21,4 a los 14,4 Ma, con las formaciones presentes en el sector central. En las áreas en blanco no existen afloramientos de la correspondiente unidad, cuyos materiales han desaparecido por erosión. (C. P., C. I. y C. C C.: Cordilleras Pinaica, Ibérica y Costero-catalana).**

**C) Bloque diagrama esquemático de la Sierra de Alcuabierre, con las relaciones entre las formaciones Zaragoza y Alcuabierre y las dataciones de Pérez-Rivarés et al. (2018).**

“La Fm Alcuabierre es equivalente lateral de la Fm Zaragoza hasta los 16,2 Ma.”

se ve que la Fm Zaragoza está orlada al N y NE por otra predominantemente de calizas y margas, la Fm Alcuabierre (Quirantes, 1969-1971), y su equivalente al NO, la Fm Tudela. A su vez, la Fm Alcuabierre se relaciona hacia el margen pirenaico con las formaciones de Sariñena (Quirantes, 1969-1971) y Uncastillo (Soler y Puigdefabregas, 1970), constituidas por los conglomerados, areniscas y lutitas depositadas por los abanicos de Huesca y Luna. Los aportes fluviales provenientes del sur se corresponderían con la Formación Longares (también definida por Quirantes, aunque en desuso); los aportes desde las sierras del Moncayo (abanico de Los Fayos) y de Herrera (sistemas aluviales de Tosos o de Belchite) serían menores que los del norte. Así pues, la Fm Alcuabierre se depositó en ambientes lacustres más extensos que los *playa-lake* de la Fm Zaragoza, dada su distribución areal, y con aguas con menor concentración en sales que las que dieron lugar a las evaporitas de la Fm Zaragoza, ya que en ellos se depositaron carbonatos de Ca y a veces de Ca y Mg.

Con posterioridad a los 16,2 Ma la Fm Zaragoza es sustituida por la Fm Alcuabierre, que entonces pasaría a ocupar toda el área central de la Cuenca del Ebro (figura 4), con solo una manifestación evaporítica en la Sierra de Alcuabierre, los yesos del Miembro Perdiguera (Arenas, 1993), de limitada extensión y espesor. En definitiva, la Fm Alcuabierre es equivalente lateral de la Fm Zaragoza hasta los 16,2 Ma, y su suprayacente a partir de ese momento. Con respecto al clima del Mioceno Inferior en la Cuenca del Ebro, estos hechos implican:

1. A lo largo del intervalo de 21,4 a 16,2 Ma, se dio una alternancia climática entre momentos de extrema aridez, durante los que se depositaron las evaporitas y facies asociadas de la Fm Zaragoza, y otros de mayor humedad durante los que se depositaron los carbonatos y facies asociadas de la Fm Alcuabierre.
2. A partir de los 16,2 Ma, tuvo lugar un cambio climático importante que supuso la generalización de unas condiciones más húmedas (Arenas et al., 1997).



Los carbonatos de la Fm Alcubierre poseen, como vemos, un significado importante en la interpretación del clima mioceno en la Cuenca del Ebro, y son claves para la elaboración de un modelo sedimentario que explique la evolución lacustre en función de las oscilaciones climáticas, por lo que es importante su análisis. Se reconocen los siguientes tipos de sedimentos calizos (figura 5):

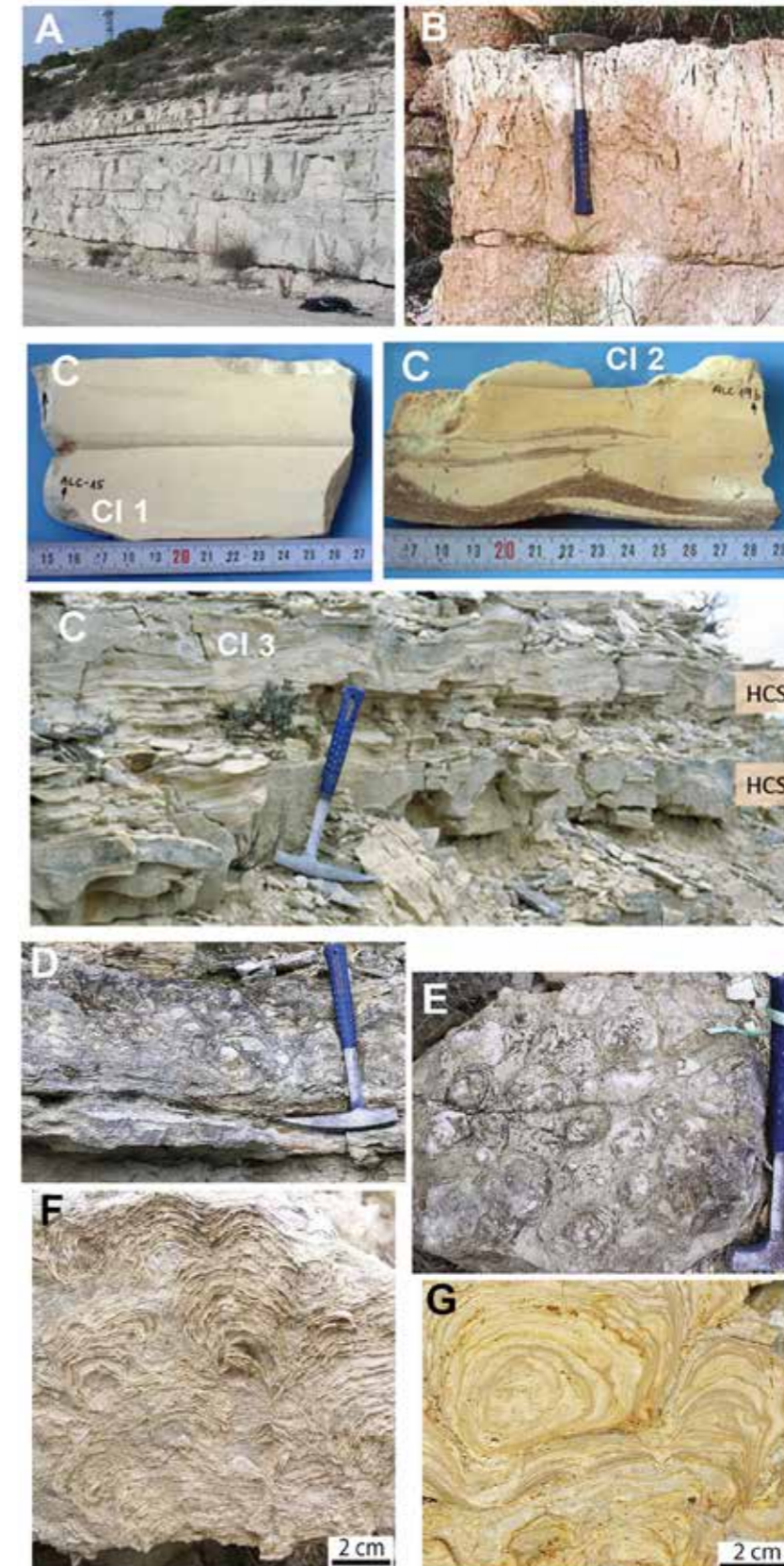
- Calizas masivas (Cm). Son biomicritas, es decir, precipitados de  $\text{CaCO}_3$  (barro carbonatado) que contienen abundantes fósiles de gasterópodos, ostrácodos y carofitas. Esto implica alta productividad biológica en aguas de poca profundidad con luminosidad adecuada para la proliferación de fauna y flora acuáticas.
- Calizas bioturbadas (Cb). Son biomicritas con rasgos de haber estado colonizadas por vegetación hidrófila, que dejó su impronta con una intensa bioturbación por raíces; además pueden presentar microkarstificación, grietas de desecación, brechificación, nodulización y superficies de oxidación, como resultado de procesos edáficos durante momentos de exposición subaérea.
- Calizas laminadas (Cl). Son micritas, comúnmente azoicas, pero pueden incluir fósiles de algas calcáreas. La laminación es debida a la presencia de láminas detríticas de granos de cuarzo o de carbonato. Las láminas detríticas de carbonato se interpretan como la reelaboración de sedimentos lacustres previos, y las siliciclásticas como la llegada de sedimento detrítico de origen fluvial al lago. Según la estructuración de estas láminas se diferencian tres subfacies que indican diferentes condiciones hidrodinámicas: Cl1 con laminación paralela, Cl2 con ondulaciones simétricas de longitud de onda centimétrica (*ripples* de oscilación) y Cl3 con ondas de longitud métrica, cuyos relieves cóncavos y convexos se truncan dando lugar a la estratificación cruzada de tipo *hummocky* (HCS en siglas inglesas). La estructuración se atribuye a corrientes de fondo en el caso de la facies Cl1, a oleaje de buen tiempo en el caso de Cl2 y a olas de tormenta en el de Cl3. En condiciones de calma tendría lugar la producción de barro carbonatado; el carácter generalmente azoico de esta micrita sugiere unas condiciones no favorables para el desarrollo de la vida acuática. La subfacies Cl3 solo se ha encontrado en la Sierra de Alcubierre, es decir, en el área más oriental del sistema lacustre, evidenciando la actua-

ción de vientos fuertes y persistentes de procedencia oeste; un precedente de nuestro cierzo actual.

- Calizas estromatolíticas (Ce). Aparecen íntimamente asociadas a las calizas laminadas. Son micritas y microesparitas con una fina laminación, sin relación con corrientes; se trata de bioconstrucciones debidas a la actividad de bacterias (posiblemente cianobacterias), que dan lugar a formas planares, de láminas onduladas o mameliformes de 2-3 cm de grosor, y a formas mayores denominadas bios-tromos y biohermos, de hasta 40 cm de espesor y 20 m de extensión visible en afloramiento, donde también se observan crecimientos columnares.

Por otra parte, el análisis de los isótopos estables de oxígeno y carbono, y de la composición mineralógica de estas facies calizas (Arenas et al., 1997) aportan datos clave para la interpretación climática: a) La composición isotópica ( $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^{13}\text{C}$ ) de las facies de calizas laminadas y estromatolíticas es más pesada que la de las calizas masivas y bioturbadas, resultado de una mayor evaporación. b) En algunos estratos de la Fm Alcubierre correlativos con la Fm Zaragoza, las facies de carbonatos laminados y estromatolíticos pueden tener porcentajes variables de dolomita en su composición mineralógica, que pueden llegar excepcionalmente al 99%; es decir, son propiamente dolomías. Estas dolomías se habrían formado a partir de agua más salina que aquella en la que se formaron las facies masivas y bioturbadas, debido a la concentración por evaporación del agua del lago y de la intersticial del sedimento ya formado. En estos casos, los valores de  $\delta^{18}\text{O}$  llegan a ser  $> 0$ , y los de  $\delta^{13}\text{C} \geq 0$ .

“Los carbonatos de la Fm Alcubierre poseen un significado importante en la interpretación del clima mioceno en la Cuenca del Ebro.”



C. Arenas

Figura 5:

Aspectos de las distintas facies de calizas de la Fm Alcubierre y formaciones correlativas lateralmente.

A) Calizas masivas, Cm, en la Plana de Sancho Abarca (Fm Tudela, equivalente lateral de la Fm Alcubierre).

B) Calizas bioturbadas por raíces, Cb.

C) Calizas laminadas, Cl: Cl 1, con laminación horizontal; Cl 2, con ripples simétricos; Cl 3, con estratificación cruzada *hummocky*.

D-G) Calizas estromatolíticas, Ce; D, imagen de campo: sobre margas, estromatolito estratiforme.

E) Relieve del techo de un estromatolito.

F) Sección de un biohermo en el que se aprecian las cúpulas de laminación estromatolítica.

G) Detalle de la laminación de un estromatolito en sección pulida.

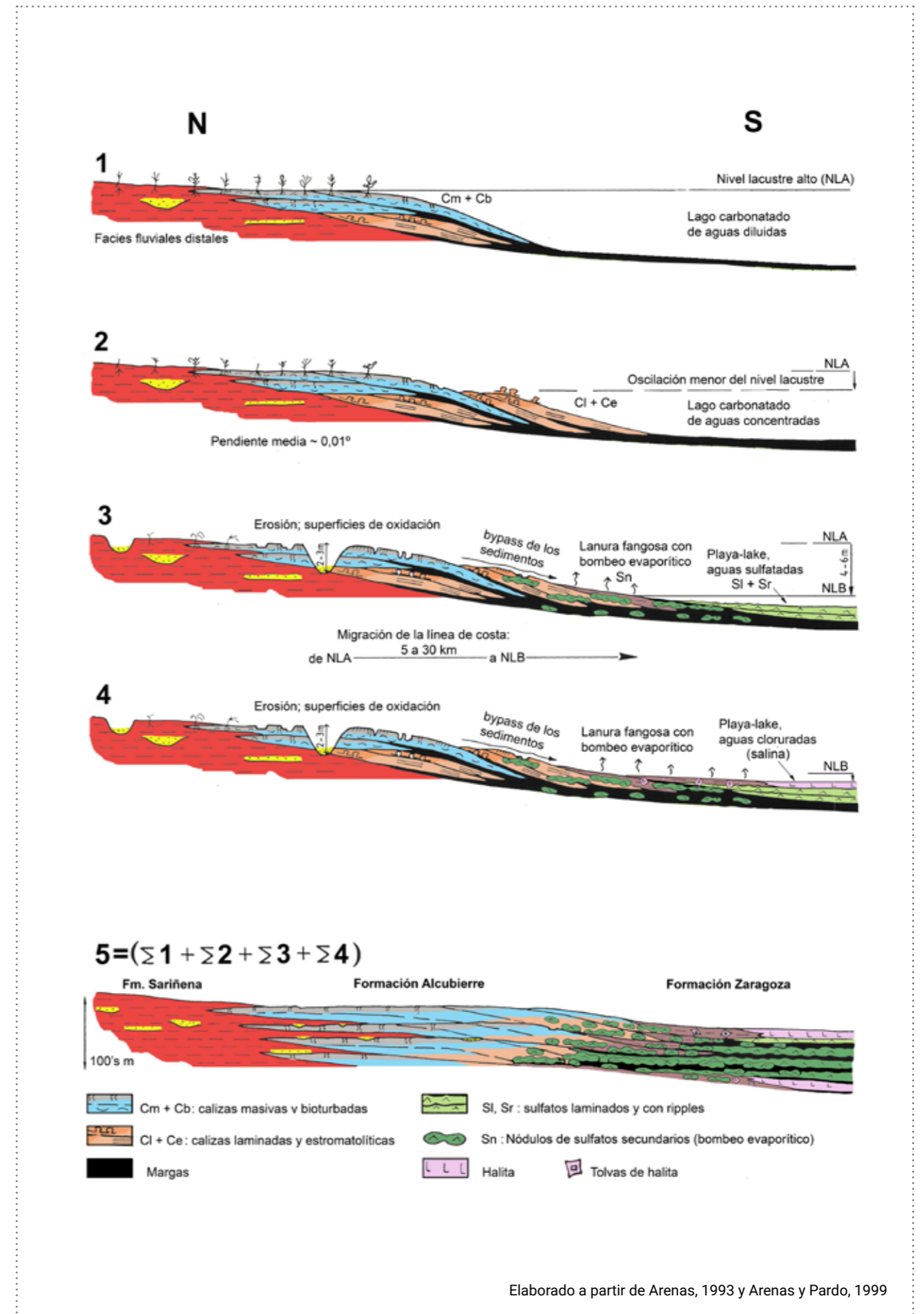
**EL MODELO SEDIMENTARIO: CLIMA Y VARIACIONES DEL NIVEL LACUSTRE**

En el modelo sedimentario elaborado (Arenas, 1993), las alternancias climáticas durante el depósito de las formaciones Zaragoza y Alcubierre se reflejan en la sedimentación lacustre según muestra el esquema conceptual de la figura 6. Partiendo de un momento de clima húmedo, con una alta relación precipitación/evaporación (1), en el lago expandido tuvo lugar la sedimentación de facies masivas, Cm. En los márgenes de la masa de agua, colonizados por vegetación palustre, tenía lugar la formación de facies bioturbadas, Cb. En las áreas más profundas y centrales del lago, la precipitación de carbonato cálcico, junto con la decantación de los aportes más finos de la escorrentía superficial, producían la sedimentación de margas. Pequeñas caídas del nivel lacustre, ocasionadas por unas condiciones climáticas de menor precipitación y/o mayor evaporación (2), causaron una mayor concentración química en el agua, con la sedimentación de facies laminadas, Cl, y estromatolíticas, Ce. Cuando las condiciones climáticas se hicieron áridas (3) el nivel lacustre cayó más, el lago disminuyó en extensión, y la escorrentía superficial erosionó y excavó cauces en los sedimentos previos. En el lago, entonces una salmuera, tuvo lugar la sedimentación de sulfatos de calcio, laminados y con ripples, Sl y Sr. El cuerpo de agua aparecía rodeado de una llanura de sedimentos finos donde tenían lugar fenómenos de bombeo evaporítico originando el crecimiento de sulfato de calcio, típicamente como nódulos, Sn, hospedados en esa llanura fangosa e incluso en las calizas de los niveles lacustres previos. Por último, la aridez más extrema (4), daría lugar a un complejo de *playa-lake* donde en la salina precipitaba halita, mientras en la llanura fangosa se producían grandes tolvas de halita, que actualmente se reconocen como pseudomorfos de yeso. La alternancia, a lo largo del tiempo, de estas distintas condiciones climáticas ha dado lugar a las acumulaciones sedimentarias de las formaciones Alcubierre y Zaragoza (5). En esta última, los sedimentos formados por la repetición de la situación climática (3) serán el sustrato donde tendrá lugar la formación de dolinas.

Este modelo cumple la premisa de que el sistema lacustre tuvo mayor extensión cuando tenían lugar los depósitos de carbonatos de la Fm Alcubierre. Viene obligado a ello por la evidencia objetiva que supone el esquema cartográfico para el intervalo temporal de 21,4 a 16,2 Ma. A la vista de ambos -esquema cartográfico y modelo- llama la atención la ausencia de una

“Las variaciones de susceptibilidad magnética en muestras extraídas de los estratos estudiados revelaron un comportamiento periódico en ciclos de unos 105 ka.”

**Figura 6: evolución lacustre en función de unas condiciones climáticas que varían desde húmedas hasta extremadamente áridas. La alternancia, en cualquier orden, de estas condiciones entre los 21,4 y los 16,2 Ma dio lugar a la relación lateral entre las formaciones Yesos de Zaragoza y Calizas de Alcubierre. Con posterioridad a los 16,2 Ma, la alternancia climática se limitaba a las condiciones (1) y (2) del modelo, con solo la breve incursión a la fase (3) que dio lugar al Miembro Yesos de Perdiguera dentro de la Fm Alcubierre.**



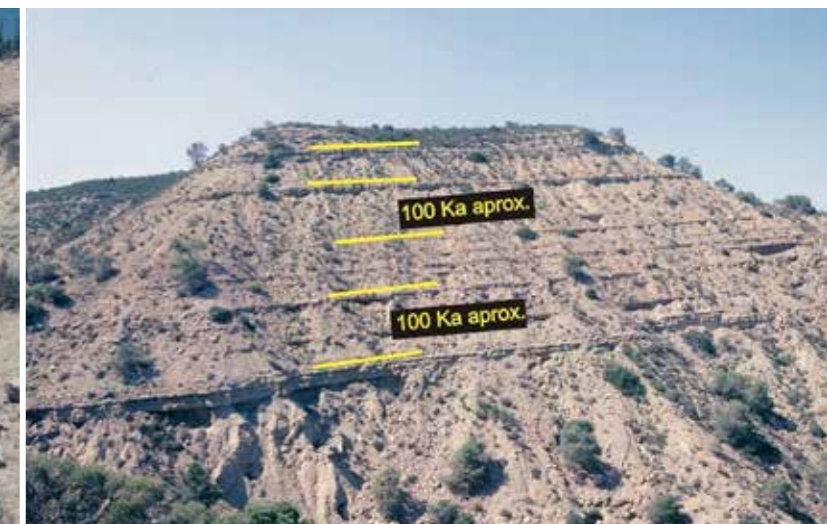
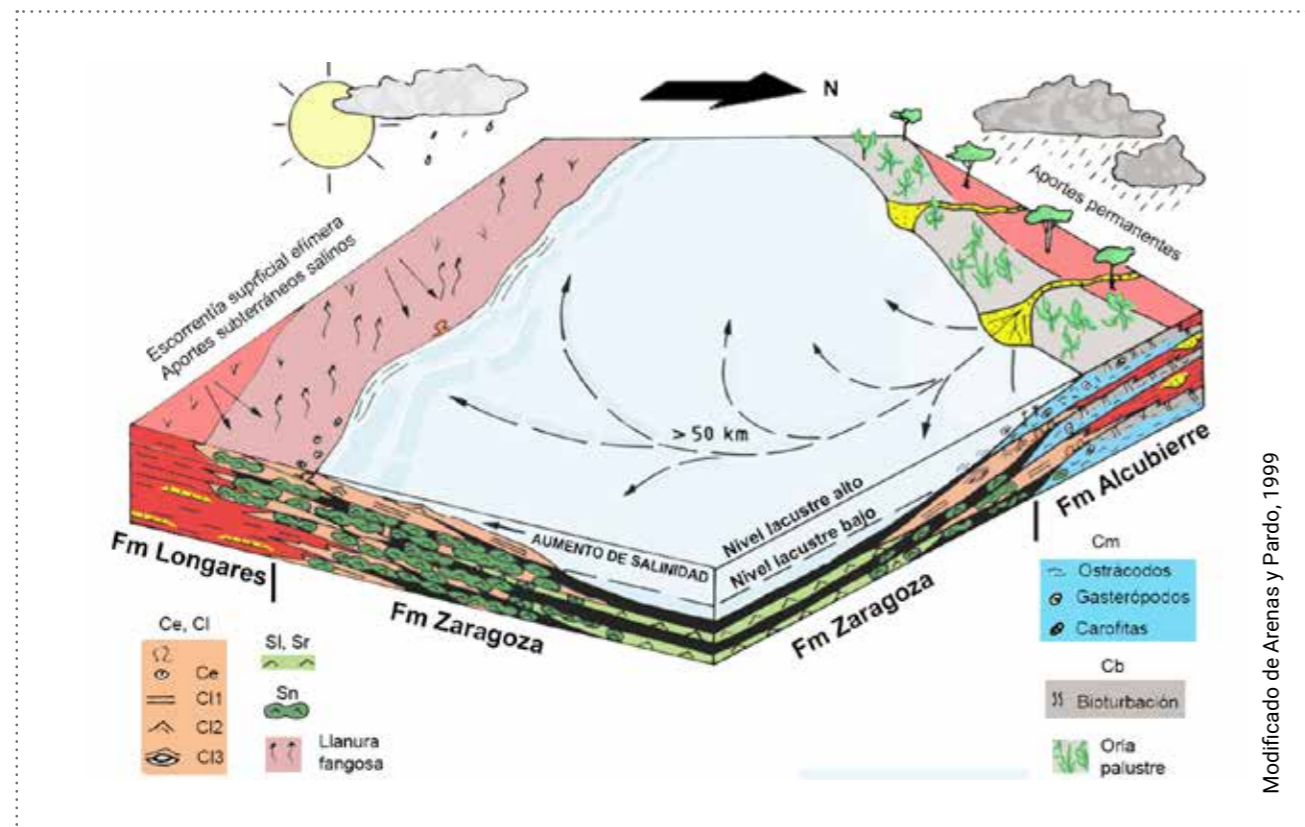
orla de carbonatos, similar a la de la Fm Alcubierre, al sur de la Fm Zaragoza durante dicho intervalo temporal. Arenas y Pardo (1999) explican esta aparente anomalía como debida a una asimetría topográfica entre el norte y el sur del sistema lacustre, pero sobre todo a una asimetría climática entre las áreas pirenaica e ibérica (figura 7). Así se explicaría la ausencia o rareza de las calizas masivas y bioturbadas que caracterizan la fase de lago expandido en el margen sur del sistema lacustre. En cambio, en las amplias llanuras fangosas que rodeaban al lago por el sur, tuvo lugar un crecimiento masivo de los nódulos de yeso hospeda-

dos en el sedimento inicial de carbonatos laminados y estromatolíticos. El resultado es un depósito caracterizado por importantes volúmenes de yeso noduloso, con intercalaciones menores de carbonatos de aguas salinas y margas; en definitiva, la Fm Zaragoza, pero sin las facies de sulfatos laminados o con *ripples*.

**LOS CONTROLES DE LAS VARIACIONES CLIMÁTICAS DEL MIOCENO INFERIOR**

La Cicloestratigrafía reconoce y analiza las variaciones de algunas propiedades físicas y químicas de las sucesiones sedimentarias, producidas como consecuencia de procesos cíclicos, generalmente externos, que afectaron a los sistemas sedimentarios en que se generaron los depósitos. En el caso de la Fm Alcubierre se estudiaron las variaciones en el espesor de estratos de calizas y de estratos no calizos (p. ej., margas o areniscas) en un intervalo de 160 m de espesor (Pérez-Rivarés, 2016). Se calculó, mediante magnetoestratigrafía, que este intervalo se había depositado en 1,7 Ma. Se encontró que existían unos patrones en la variabilidad de los espesores que se repetían y que correspondían a intervalos (o sea, períodos) de entre 19 y 25 x 10<sup>3</sup> años (ka), y de 37,5 a 42 ka. Las variaciones de sus-

**Figura 7: modelo teórico de un sistema lacustre asimétrico en cuanto a distribución de facies en el centro de la cuenca del Ebro, entre los 21,4 y los 16,2Ma (Mioceno Inferior y Medio). Nótese el depósito de calizas masivas y bioturbadas en el margen norte, simultáneo a la proliferación de yesos nodulares de bombeo evaporítico en el sur, hospedados en calizas laminadas y estromatolíticas. Esta asimetría litológica se originaría por asimetría climática entre las áreas pirenaica e ibérica.**



**Figura 8: ejemplos de reconocimiento de ciclos orbitales en las sucesiones de estratos de la sección de Albalatillo, en la Fm Alcubierre.**

**Izquierda: secuencias formadas por parejas "no caliza-caliza" atribuibles a ciclos de precesión. La persona de escala mide 2 m.**

**Derecha: agrupaciones de parejas "no caliza-caliza" con proporción creciente de calizas atribuibles a ciclos de excentricidad.**

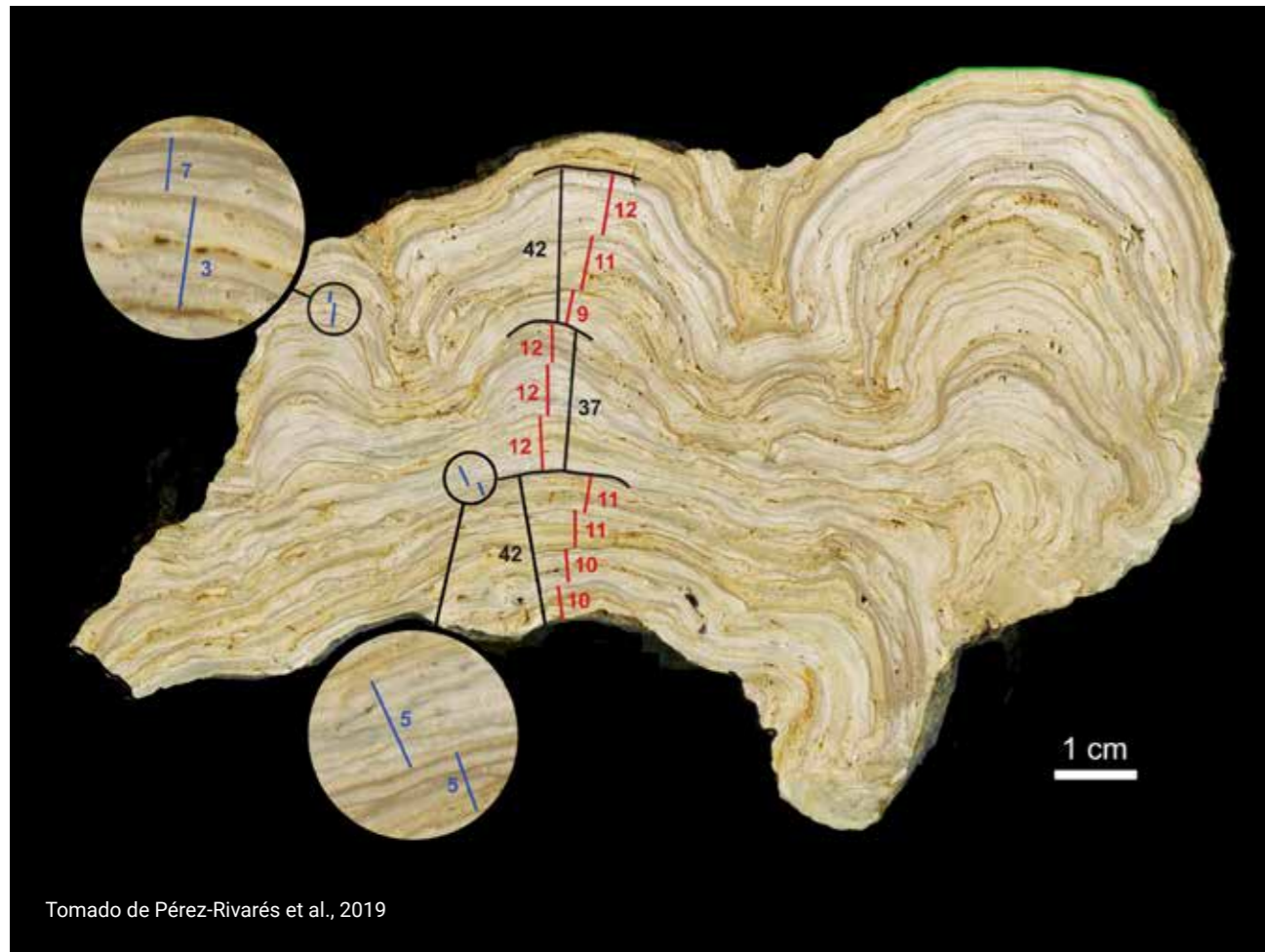
ceptibilidad magnética en muestras extraídas de los estratos estudiados revelaron un comportamiento periódico en ciclos de unos 105 ka.

Los periodos encontrados en la Fm Alcubierre son similares a los que presentan ciertos parámetros astronómicos del planeta Tierra conocidos como ciclos de Milankovitch (véase Weedon, 2003). Estos parámetros son: la precesión, cuyo ciclo dura aproximadamente 21 ka, la oblicuidad, que oscila cada 41 ka de media, y la excentricidad de la órbita, que varía entre sus valores extremos cada 100 ka aproximadamente (figura 8). La combinación de estos tres parámetros orbitales da lugar a variaciones en la duración, ángulo de incidencia e intensidad de la radiación solar que reciben las diferentes zonas del planeta, y como consecuencia tiene una influencia importante en las fluctuaciones climáticas.

Otro ejemplo de cómo la variabilidad climática afecta a la sedimentación se puede observar en la laminación de los estromatolitos de la Fm Alcubierre (Pérez-Rivarés et al., 2019). La laminación estromatolítica consiste en una alternancia de láminas calcíticas oscuras y claras, cuya textura y espesor refleja el desarrollo de bacterias y las condiciones de depósito. Los cambios de espesor y color de las parejas de láminas (que se consideran anuales; Martín-Bello et al., 2019) permitieron establecer unos ciclos que se repetían con una frecuencia similar a la de fenómenos de circulación atmosférica/oceánica ENSO (El Niño-Southern Oscillation), NAO (North Atlantic Oscillation) o AMO (Atlantic Multidecadal Oscillation), así como los ciclos de manchas solares (SUNSPOT).

**BIBLIOGRAFÍA**

- Arenas C. (1993). *Sedimentología y paleogeografía del Terciario del margen pirenaico y sector central de la cuenca del Ebro (zona aragonesa occidental)*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 858 p. <https://zaguan.unizar.es/record/70725>.
- Arenas C., Casanova J. y Pardo G. (1997). Stable-isotope characterization of the Miocene lacustrine systems of Los Monegros (Ebro Basin, Spain): palaeogeographic and palaeoclimatic implications. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 128: 133-155.
- Arenas C. y Pardo G. (1999). Latest Oligocene–Late Miocene lacustrine systems of the north-central part of the Ebro Basin (Spain): sedimentary facies model and palaeogeographic synthesis.



**Figura 9: ejemplo de la sección pulida de un estromatolito de la Fm Alcuabierre donde se identifican los diferentes patrones de ciclicidad reconocidos: las líneas azules corresponden con ciclos similares a la NAO o la ENSO; las líneas rojas corresponden a los ciclos identificados con los ciclos solares de Schwabe (de 11 años); las líneas negras corresponden a los ciclos de orden tipo AMO.**

Aunque no se puede afirmar que en el Mioceno actuaran fenómenos climáticos como los actuales, los períodos detectados en los estromatolitos de la Fm Alcuabierre (figura 9) revelan una variabilidad climática plurianual, decadal e incluso multidecadal.

*A la memoria de nuestro compañero y amigo Arsenio Muñoz Jiménez, responsable de la primera síntesis estratigráfica de la Cuenca del Ebro en la literatura internacional y experto en Cicloestratigrafía.*

Gonzalo Pardo, Concha Arenas y Francisco Javier Pérez Rivarés  
Dpto de Ciencias de la Tierra  
Facultad de Ciencias  
Universidad de Zaragoza

*Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 151: 127–148.

- García-Castellanos D., Vergés J., Gaspar-Escribano J. y Cloetingh S. (2003). Interplay between tectonics, climate and fluvial transport during the Cenozoic evolution of the Ebro Basin (NE Iberia). *Journal of Geophysical Research*, 108, 2347, doi: 10.1029/2002JB002073. B7.
- Costa E., Garcés M., López-Blanco M., Beamud E., Gómez-Paccard M. y Larrasoaña J.C. (2010). Closing and continentalization of the South Pyrenean foreland basin (NE): magnetostratigraphic constraints. *Basin Research*, 22: 904-917.
- Hirst J.P.P. y Nichols G.J. (1986). Thrust tectonic controls on the Miocene distribution patterns, Southern Pyrenees. En: Ph. Allen y P. Homewood (Editores), *Foreland Basins*. IAS Special Publication, 8: 247-258.
- Martín-Bello L., Arenas C., Andrews J., Alonso-Zarza A.M., Marca A. (2019). Multi-scale records of climate change in lacustrine stromatolites: insights from the Miocene Ebro Basin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 530, 312–329.
- Muñoz A., Arenas C., González A., Luzón A., Pardo G., Pérez A. y Villena J. (2002). Ebro basin (northeastern Spain). En: W. Gibbons y T. Moreno (Editores), *The Geology of Spain*. The Geological Society, Londres, pp. 301-309.
- Pardo G., Arenas C., González A., Luzón A., Muñoz A., Pérez A., Pérez-Rivarés F.J., Vázquez-Urbez M., y Villena J. (2004). La Cuenca del Ebro. En: J.A Vera

(Editor principal), *Geología de España*. SGE-IGME, Madrid, pp. 533–543.

- Pérez-Rivarés F.J. (2016). *Estudio magnetoestratigráfico del Mioceno del sector central de la Cuenca del Ebro: Cronología, correlación y análisis de la ciclicidad*. Tesis doctoral, Universidad de Zaragoza, 281 p. <https://zaguan.unizar.es/record/79504>
- Pérez-Rivarés F.J., Arenas C., Pardo G., Garcés M. (2018). Temporal aspects of genetic stratigraphic units in continental sedimentary basins: examples from the Ebro basin, Spain. *Earth-Sciences Reviews*, 178: 136–153.
- Pérez-Rivarés F.J., Martín-Bello L. y Arenas-Abad C. (2019). Periodicity in stromatolitic lamination: A potential record of ENSO, NAO, and SUNSPOT in the Miocene lacustrine record of the Ebro Basin, Spain. *Sedimentary Geology*, 390: 83–99
- Quirantes J. (1969-1971). *Estudio sedimentológico y estratigráfico del Terciario continental de Los Monegros*. Tesis Doctoral, Universidad de Granada. Publicaciones de la Institución Fernando el Católico (CSIC), Diputación provincial de Zaragoza, 207 p.
- Salvany J.M., García-Veigas J. y Ortí F. (2007). Glauberite–halite association of the Zaragoza Gypsum Formation (Lower Miocene, Ebro Basin, NE Spain). *Sedimentology*, 54: 443-467.
- Soler M. y Puigdefabregas C. (1970). Líneas generales de la geología del Alto Aragón Occidental. *Pirineos*, 96: 5-20.
- Weedon G.P. (2003). *Time-Series Analysis and Cyclostratigraphy: examining stratigraphic records of environmental cycles*. Cambridge University Press, Cambridge, 259 p.

