Revista de la Sociedad Geológica de España 28 (1)

ISSN (versión impresa): 0214-2708
ISSN (Internet): 2255-1379

ANÁLISIS COMPARADO DE SECUENCIAS DE ALTA FRECUENCIA EN PLATAFORMAS CARBONATADAS CON SUBSIDENCIA DIFERENCIAL (SINEMURIENSE, CORDILLERA IBÉRICA)

Comparative analysis of high-frequency sequences across different subsident domains of the Sinemurian Iberian carbonate platform (NE Spain)

Marcos Aurell y Beatriz Bádenas

Departamento de Ciencias de la Tierra, Universidad de Zaragoza, 50008 Zaragoza
maurell@unizar.es, bbadenas@unizar.es

Abstract: *We present here the results of a comparative analysis of high frequency sequences recorded along the shallow carbonate platform developed during the Upper Sinemurian in the Northern Iberian Basin. The facies and sequential analysis was performed in three areas separated from each 50-60 km, which have different sedimentation rates. The Almonacid de la Cuba area includes the thickest succession (up to 38 m) and the largest number of sequences (up to 15). In Calanda, with intermediate subsidence rates (up to 18 m), the maximum number of recorded sequences is 11, while in the lower subsidence area of Montalbán-Castel de Cabra (7-12 m thick succession), the record of sequences ranges between 6 and 9. Most of the sequences have a shallowing upward facies evolution, are 1 to 3 m thick, and are bounded by flooding surfaces linked to stages of episodic increase of accommodation. The study from continuous outcrops, allows to evaluate the lateral continuity of these discontinuities (at least 10 km). This continuity suggests the existence of a regional or global allocyclic factor to explain the origin of the sequences. Successive stages of increasing accommodation affected the studied domain of the basin, but had a variable record depending on the rates of subsidence that operated in each platform sector analysed. In areas with low rates of subsidence, which are dominated by high-energy grain-supported facies (oolitic, peloidal, intraclastic, bioclastic), the number of sequences identified is lower, since the sequence boundaries tend to be amalgamated. In the more subsiding domains of the platform there is a significant preservation of the low-energy sub-wave base micritic facies, and the record of sequences and sequence boundaries is more complete and continuous.*

Key words: *sequences, platform, carbonates, Sinemurian, Iberia.*

Resumen: *Se ha realizado el análisis comparado de las secuencias de alta frecuencia registradas a lo largo de la plataforma carbonatada somera, desarrollada durante el Sinemuriense superior en la Cuenca Ibérica septentrional. El análisis de facies y secuencial fue realizado en tres sectores separados entre si 50–60 km, que presentan diferentes tasas de sedimentación. En Almonacid de la Cuba se encuentra el registro más potente (hasta 38 m) y el mayor número de secuencias (hasta 15). En Calanda, con valores de subsidencia intermedios (hasta 18 m), el número de secuencias máximo registrado es de 11, mientras que en la zona de menor subsidencia (de 7 a 12 m, Montalbán-Castel de Cabra), el registro de secuencias oscila entre 6 y 9. Por lo general, se trata de secuencias de somerización de 1 a 3 m de espesor, limitadas por superficies de inundación, que marcan incrementos episódicos del espacio de acomodación. El estudio a partir de afloramientos continuos, permite evaluar la extensión lateral de estas discontinuidades (al menos 10 km). Esta extensión sugiere la existencia de un factor alocíclico regional o global para explicar el origen de las secuencias. Las sucesivas etapas de incremento del espacio de acomodación afectarían a todo el dominio de la cuenca estudiado, pero tendrían un registro variable en función de las tasas de subsidencia que tuvieron lugar en uno u otro sector de la plataforma analizado. En las zonas con bajas tasas de subsidencia, donde dominan las facies granosopor-*

tadas (oolíticas, peloidales, intraclásticas, bioclásticas) de alta energía, el número de secuencias identificadas es menor, ya que los límites de secuencia se encuentran amalgamados. En los dominios más subsidentes de la plataforma, donde se preserva una proporción mayor de las facies micríticas submareales abiertas acumuladas por debajo del nivel de base del oleaje, el registro de las secuencias y límites de secuencia es más completo y continuo.

Palabras clave: *secuencias, plataforma, carbonatos, Sinemuriense, Iberia.*

Aurell, M. y Bádenas, B. (2015): Análisis comparado de secuencias de alta frecuencia en plataformas carbonatadas con subsidencia diferencial (Sinemuriense, cordillera Ibérica). *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 28(1): 77-90.

Es común que el registro sedimentario de los dominios someros de las plataformas carbonatadas se organice en secuencias de espesor métrico, con una evolución de facies somerizante o profundizante-somerizante, limitadas por discontinuidades ligadas a incrementos bruscos en el espacio de acomodación (*e.g.*, Pratt *et al.,* 1992). El origen de estas secuencias de alta frecuencia y su repetición en el registro sedimentario es objeto de debate, y se han relacionado con tres procesos (o la combinación de ellos): cambios cíclicos del nivel del mar inducidos por oscilaciones eustáticas (ciclos orbitales o de Milankovitch, *e.g.* Strasser *et al.,* 1999; Fischer *et al.*, 2004); movimientos de fallas sinsedimentarias, que se traducen en pulsos de subsidencia, que pueden afectar a dominios más o menos extensos de una determinada cuenca sedimentaria (*e.g.*, Hardie, 1986; De Benedictis *et al.,* 2007); migraciones de los cinturones de facies en combinación con una subsidencia continua (modelo autocícilico, *e.g.*, Ginsburg, 1971; Burgess *et al.,* 2001).

Bosence *et al.* (2009) estudiaron el origen de las secuencias de alta frecuencia del Sinemuriense (Jurásico Inferior), a partir de la comparación de su registro en diversas plataformas del Tetis Occidental (Fig. 1A). El análisis comparado de 7 series estratigráficas, tres de ellas situadas en la Península Ibérica (Gibraltar, Loma Prieto y Almonacid de la Cuba: ver G, LP y AC en la Fig. 1A), permitió discutir la contribución de los procesos regionales y locales. Según Bosence *et al.* (2009), el diferente número de ciclos registrados en cada una de estas series locales, su espesor variable y la particular distribución y organización de facies, indican que la tectónica sinsedimentaria extensional produjo una señal particular para cada cuenca sedimentaria. Aunque se considera que la tectónica es el proceso dominante, los autores de este trabajo no descartan el registro superpuesto de una señal eustática y/o autocíclica en una u otra cuenca.

Las secuencias del Sinemuriense expuestas en los afloramientos de Almonacid de la Cuba (Zaragoza) fueron objeto de un estudio más detallado en Bádenas *et al.* (2010). En ese trabajo, se analizaron y correlacionaron 12 series locales a lo largo de un afloramiento de 12 km de continuidad lateral. Se identificaron y correlacionaron a lo largo de todo el afloramiento 11 secuencias que, hacia la parte superior de la sucesión se subdividían en 2 o 3 secuencias de extensión lateral limitada (de entre 3 a 5 km). Estas secuencias de extensión limitada fueron denominadas "secuencias discontinuas". Las etapas de incremento rápido del espacio de acomodación ligadas a los límites de secuencias fueron tentativamente relacionados con pulsos tectónicos, aunque al igual que en el trabajo de Bosence *et al.* (2009), no se descartó la influencia del eustatismo, a la vista de la continuidad lateral de las secuencias analizadas a escala de afloramiento. En el trabajo de Bádenas *et al.* (2010) se concluye que, en cuencas con una tectónica extensional activa, como es el caso de la Cuenca Ibérica septentrional durante el Sinemuriense (Aurell *et al.,* 2003; Gómez y Goy, 2005), el número de secuencias registradas puede ser variable, siendo mayor en los dominios más subsidentes.

El objetivo del presente estudio es aportar nuevos datos, que permitan entender de forma más precisa la interacción entre los factores que controlan el registro de las secuencias de alta frecuencia en dominios someros de las plataformas carbonatadas. Para ello, hemos abordado el análisis mediante una escala de trabajo intermedia a la abarcada en trabajos previos. En el presente estudio, se plantea el análisis comparado entre el tipo y número de secuencias de alta frecuencia registradas durante el Sinemuriense en cuatro localidades, separadas varias decenas de km entre sí, pero enmarcadas dentro de un mismo ámbito paleogeográfico, en la Cuenca Ibérica septentrional (Fig. 1B). El espesor completo de las sucesiones analizadas varía de un sector a otro, en función de las tasas de subsidencia particulares en cada uno de ellos. El análisis comparado entre las secuencias registradas en dominios de la Cuenca Ibérica septentrional con diferente subsidencia, permite discutir acerca de la interacción entre los factores locales y los factores regionales y/o globales, que controlan la creación de espacio de acomodación en la cuenca de sedimentación.

Marco geológico y metodología

La Cuenca Ibérica es una cuenca intracratónica localizada al Oeste del Tetis, en la parte nororiental de Iberia (Fig. 1A). Se desarrolló durante la extensión mesozoica, en relación con las fases tectónicas que originaron la apertura del Tetis Occidental y del Atlántico Norte y Central (*e.g.*, Salas y Casas, 1993). El registro sedimentario del Jurásico Inferior de la Cuenca Ibérica septentrional se organiza en un ciclo transgresivo-regresivo de largo término, con el máximo de profundización localizado hacia su parte superior, en la parte media del Toarciense (Fig. 1C; Aurell *et al.,* 2003; Gómez y Goy, 2005). La transgresión del inicio del Jurásico implicó la progresiva inundación de la cuenca, desde las facies transicionales carbonatadas y evaporíticas del Hettangiense-Sinemuriense inferior (Fms. Lécera y

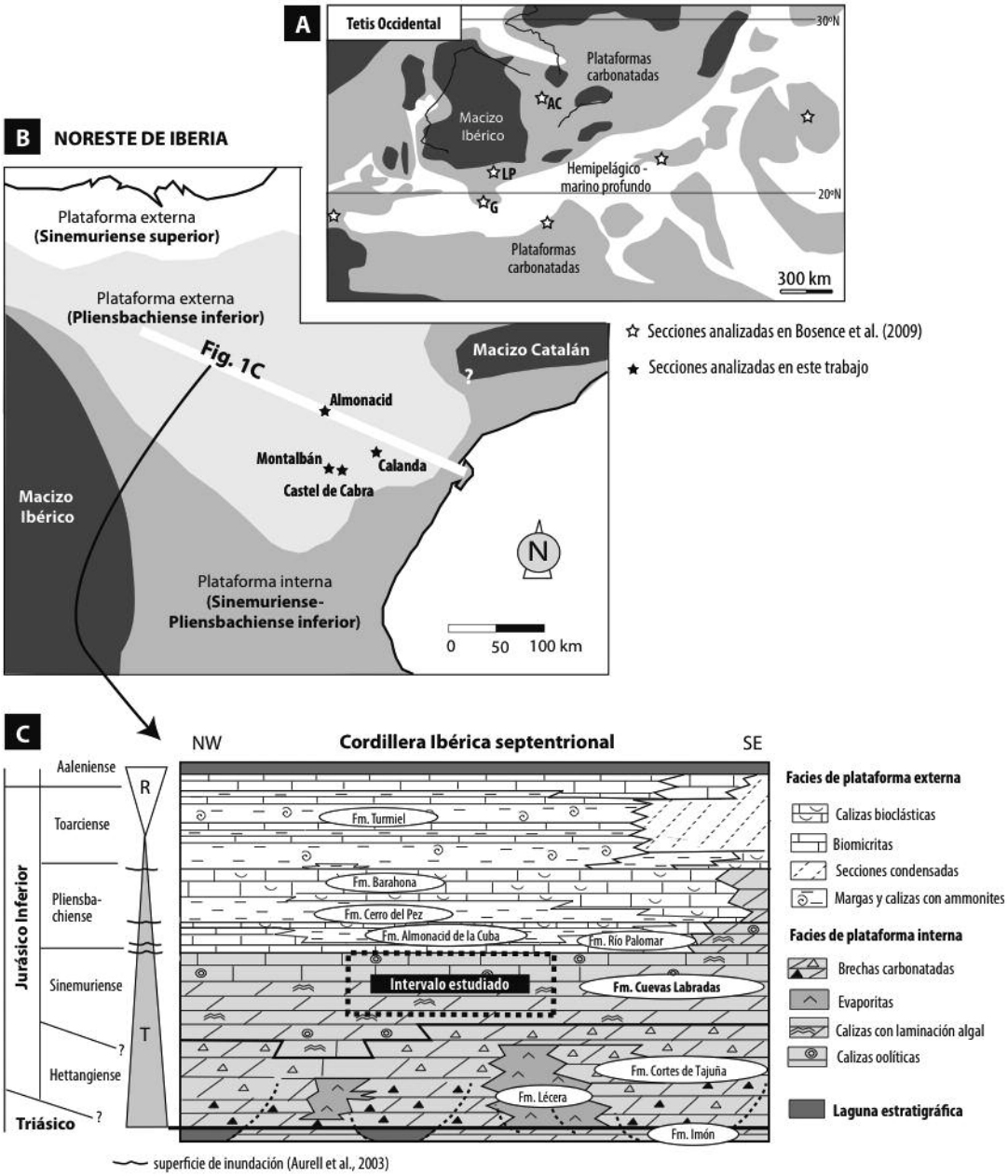

Fig. 1.- A: Paleogeografía del Tetis occidental, en la que se indica la situación de las secciones analizadas en Bosence *et al.* (2009); G: Gibraltar, LP: Loma Prieto, AC: Almonacid de la Cuba. B: Paleogeografía de la Península Ibérica Nororiental, en la que se indica la situación de las secciones analizadas en este trabajo. C: Síntesis estratigráfica del Jurásico Inferior en la Cordillera Ibérica Septentrional (B y C, modificada de Aurell *et al.,* 2003).

Cortes de Tajuña) a los carbonatos submareales y perimareales del Sinemuriense medio y superior (Fm. Cuevas Labradas). La Cuenca Ibérica fue además afectada por eventos transgresivos al final del Sinemuriense (parte media de la Cronozona Raricostatum), con la instalación generalizada de facies de plataforma abierta (Fm. Río Palomar) en su parte septentrional. La parte occidental y meridional de la cuenca no fue afectada por estos eventos transgresivos, de modo que en este dominio continuó la sedimentación de plataforma interna somera durante todo el Sinemuriense y Pliensbachiense inferior (Fig. 1B; Aurell *et al.,* 2003; Gómez y Goy, 2005).

En el presente trabajo se muestran los resultados obtenidos a partir del estudio de la parte superior de la Formación Cuevas Labradas en cuatro localidades. El sector de Almonacid de la Cuba (provincia de Zaragoza) corresponde a la zona de mayor subsidencia, con el registro de una sucesión de 32–38 m de espesor (*Depocentro de Azuara*, en Gómez y Goy, 2005; Bádenas *et al.,* 2010). Los afloramientos estudiados en la proximidad de las localidades de Montalbán y Castel de Cabra (provincia de Teruel), unos 50 km al sur de Almonacid (Fig. 2), corresponden a dominios poco subsidentes, ya que tienen espesores totales de 7 y 12 m respectivamente (parte septentrional del *Alto de El Maestrazgo*, en Gómez y Goy, 2005). Las sucesiones estudiadas en Calanda (provincia de Teruel), situadas unos 60 km al sureste de Almonacid (Fig. 2), tienen un espesor intermedio, comprendido entre 16–18 m.

El análisis sedimentológico y secuencial de las sucesiones analizadas está basado en la determinación de las fa-

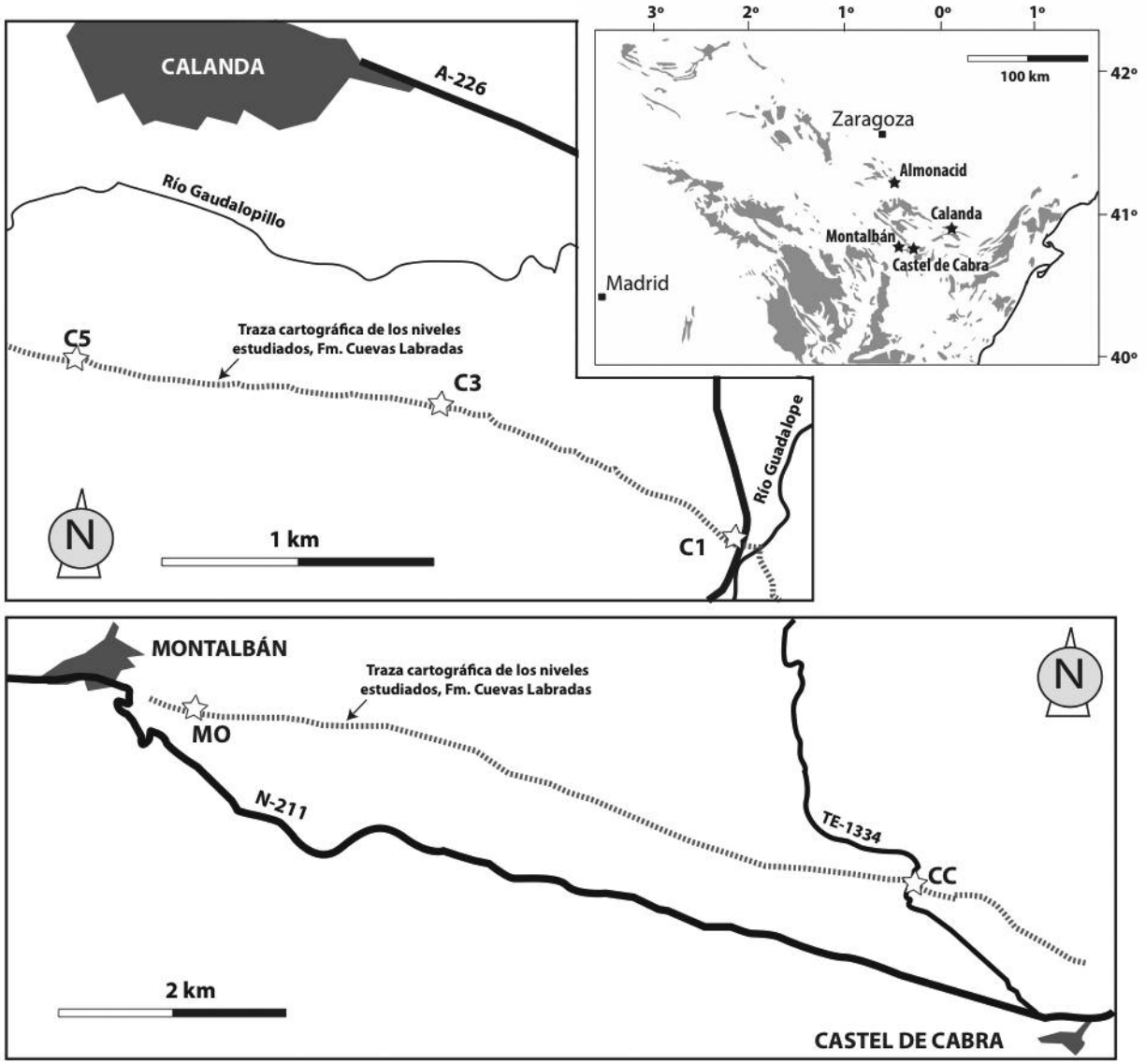

Fig. 2.- Situación de las series analizadas en el entorno de las localidades de Calanda (C1, C5, C3), Montalbán (MO) y Castel de Cabra (CC).

cies nivel a nivel, a partir de observaciones de campo, completadas mediante la observación de secciones pulidas (lupa binocular) y láminas delgadas (microscopio petrográfico). En el campo se caracterizaron también las superficies de discontinuidad sedimentaria, que marcan saltos bruscos en la evolución vertical de facies. Estas discontinuidades corresponden a planos de estratificación marcados, y algunas de ellas fueron seguidas en el campo y mediante ortofotos, con el fin de establecer una correlación física entre las series locales levantadas en los afloramientos continuos de Almonacid (Bádenas *et al.,* 2010) y Calanda.

La posible equivalencia lateral de las series estudiadas en Almonacid, Calanda y Castel de Cabra-Montalbán está basada en criterios lito y bioestratigráficos. La Fm. Cuevas Labradas está limitada a techo por una superficie encostrada y ferruginizada, formada durante el evento transgresivo del final del Sinemuriense (Cronozona Raricostatum). Esta superficie se considera isócrona a lo largo de todo el dominio estudiado (Cuenca Ibérica septentrional; Aurell *et al.,* 2003; Gómez y Goy, 2005), y se ha tomado como nivel de referencia para correlacionar el techo de las cuatro localidades estudiadas. El inicio de las sucesiones analizadas se ha tomado a partir del cambio litológico neto entre la parte inferior y superior de la Fm. Cuevas Labradas. A partir de este límite, abundan los niveles de calizas tabulares micríticas y granosoportadas bien cementadas, que forman escarpes bien marcados en todas las series analizadas. La posible isocronía de este límite es coherente con los datos biostratigráficos disponibles. En particular, en los niveles basales de todas las sucesiones estudiadas se ha identificado el foraminífero bentónico *Everticyclammina praevirguliana*, que es la especie índice utilizada para definir una biozona en la parte media del Sinemuriense en las plataformas desarrolladas en el entorno del Mediterráneo occidental (Boudagher- Fadel y Bosence, 2007).

De acuerdo con los datos expuestos, los materiales analizados se extienden desde la parte media del Sinemuriense (Biozona de *Everticyclammina praevirguliana*) hasta la superficie de inundación generalizada del final del Sinemuriense. Se corresponden con el ciclo transgresivo-regresivo

de tercer orden LJ2-1 definido por Gómez y Goy (2005). El ciclo LJ2-1 tiene una duración aproximada de 3,5 millones de años (escala temporal según Gradstein *et al*., 2004), y su pico transgresivo se localiza en la parte media del Sinemuriense superior, al final de la Cronozona Obtusum.

Análisis de facies y reconstrucción del medio sedimentario

Las series estudiadas comprenden facies de calizas micríticas con laminación algal, biomicríticas y granosoportadas, desarrolladas en ambientes someros de una plataforma carbonatada de tipo rampa, desde ambientes supramareales, hasta ambientes marinos abiertos de baja energía, localizados por debajo del nivel de base de oleaje (Bádenas *et al.,* 2010). En la figura 3 se indican las principales características de los cinturones de facies que caracterizan los dominios de sedimentación someros de la rampa carbonatada del Sinemuriense superior en la Cuenca Ibérica septentrional. En la figura 4 se muestran imágenes representativas de los diferentes tipos de facies.

De acuerdo con los datos aportados en este trabajo y en Bádenas *et al.* (2010), se han diferenciado cuatro asociaciones de facies, que representan diferentes dominios de sedimentación:

(1) *Asociación de facies 1*, de *llanura de mareas*, acumuladas en zonas inter- y supra-mareales de baja energía, dominadas por calizas con laminación de origen algal (*mudstone-bindstone*). La presencia local de *tepees,* porosidad fenestral y de grietas de desecación, indica la existencia de periodos de exposición subaérea.

(2) *Asociación de facies 2*, de *lagoon*, dominada por micritas localmente bioturbadas (*Facies 2a*, de *mudstones* y *wackestones*) con escaso contenido en restos fósiles. Entre los granos esqueléticos predominan, por orden de abundancia, los bivalvos, gasterópodos, ostrácodos y algas dasicladáceas. En menor proporción se encuentran equinodermos, foraminíferos (textuláridos, miliólidos) y braquiópodos. Estos componentes pueden formar cuerpos tabulares de facies granosoportadas (*Facies 2b*, de *packstones-grainstones*). Se trata de acumulaciones en el *lagoon* a partir de eventos episódicos de alta energía. Los componentes más abundantes en la *facies 2b* son los peloides, restos de moluscos (gasterópodos y bivalvos) y las algas dasicladáceas (localmente muy abundantes, en particular el género *Palaeodasycladus*) y localmente ooides.

(3) *Asociación de facies 3*, de ambientes submareales abiertos de alta energía, desarrolladas por encima del nivel de base de oleaje habitual o de buen tiempo, que en este tipo de plataformas epicontinentales se localiza a una profundidad de hasta 5–10 m (*e.g.*, Aurell *et al.,* 1998). Incluye un amplio abanico de facies granosoportadas (*packstones-grainstones*), dominadas por ooides, peloides, intraclastos micríticos redondeados y bioclastos en diferentes proporciones (ver descripciones de detalle en Bádenas *et al.,* 2010). Entre los bioclastos dominan los bivalvos, gasterópodos, foraminíferos (lituólidos y textularidos), braquiópodos, crinoideos, equínidos (radiolas y placas), solenoporáceas, *Cayeuxia*, y escasos restos de corales. Ocasionalmente se encuentran niveles con estratificación cruzada. Tal y como fue indicado en el trabajo de Bádenas *et al.* (2010), los diferentes tipos de facies granosoportadas se encuentran interdigitadas, aunque de forma general, existe un gradiente proximal-distal entre la *facies 3a,* dominada por ooides bien clasificados, la *facies 3b* "mixta", con componentes variados y poco clasificados (ooides, peloides, intraclastos y bioclastos en proporción variable) y la *facies 3b*, generalmente dominada por peloides bien clasificados, si bien pueden contener intraclastos micríticos redondeados, bioclastos y oncoides en menor proporción.

(4) *Asociación de facies 4*, de ambientes submareales abiertos de baja energía, localizadas por debajo del nivel de oleaje de buen tiempo, dominados por *wackestones* y *mudstones* bioturbados, con un contenido relativamente elevado y diverso de peloides y bioclastos (crinoides, placas y radiolas de equínidos, bivalvos, gasterópodos, lituólidos, textuláridos, braquiópodos). Son frecuentes los niveles bioclásticos y peloidales de espesor centimétrico

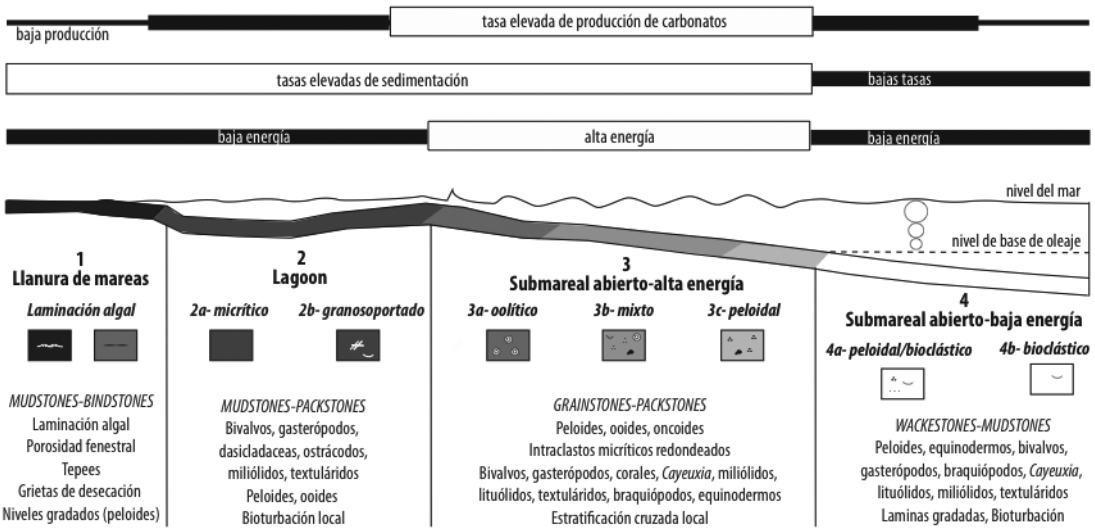

Fig. 3.- Síntesis sobre los procesos sedimentarios, ambientes, facies y componentes en los cuatro cinturones de facies diferenciados dentro de la plataforma somera Sinemuriense. Realizada a partir de Bádenas *et al.* (2010) y datos de este trabajo.

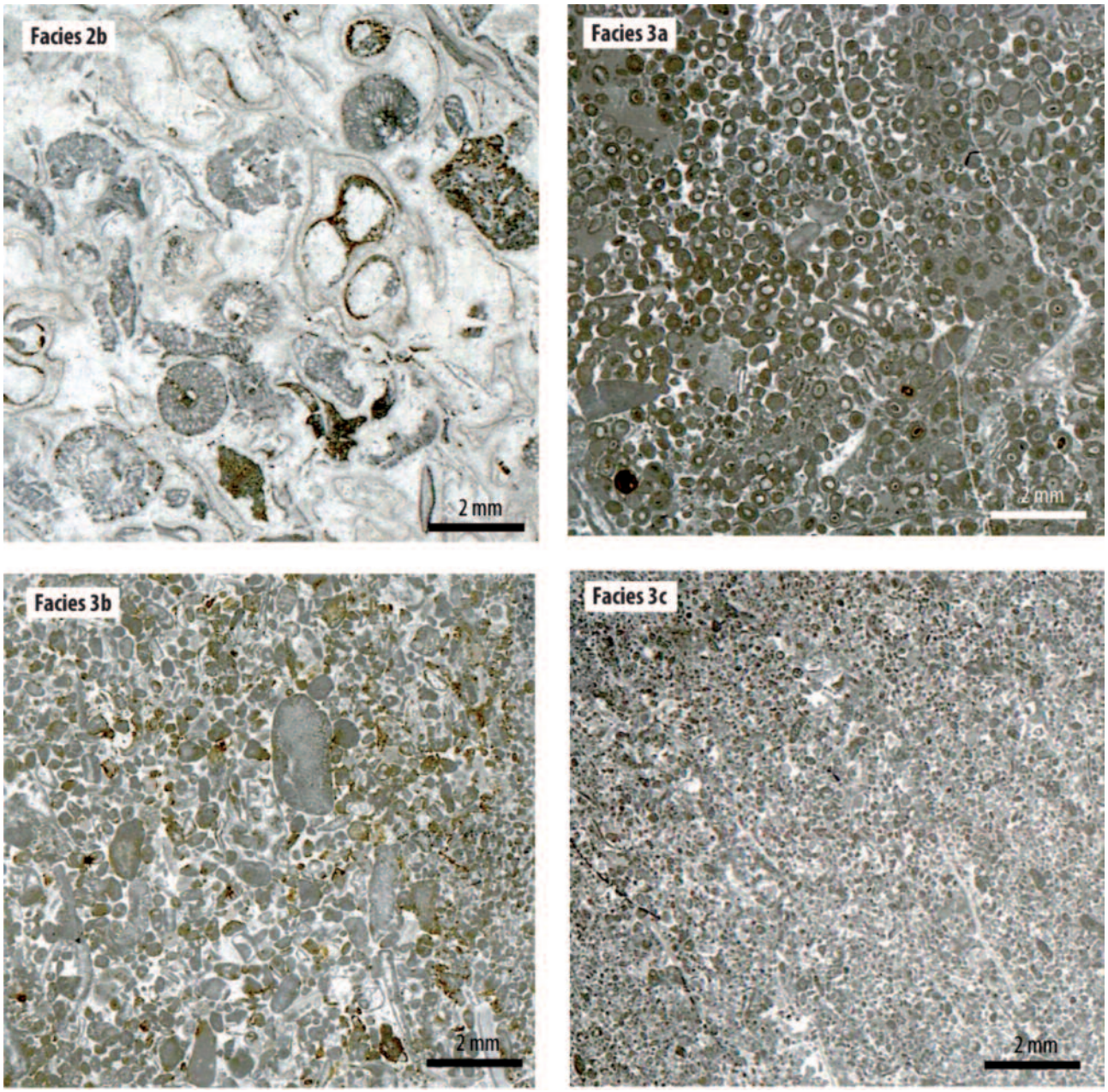

Fig. 4.- Fotos representativas de las facies (tomadas de Calanda). Facies 2b: *Grainstone* bioclástico, con abundantes dasicladáceas (*Palaeodasycladus*), gasterópodos y bivalvos; Facies 3a: *Grainstone-packstone* de ooides, con intraclastos, bivalvos y equinodermos; Facies 3b: *Grainstone* "mixto", con intraclastos, peloides y bioclastos (textuláridos, gasterópodos, bivalvos, *Cayeuxia*, equinodermos); Facies 3c: *Packstone-grainstone* de peloides con bioclastos (lituólidos, textuláridos, bivalvos).

gradados, que se interpretan como depositados a partir de flujos densos inducidos por oleaje de tormentas (tempestitas). Dentro de estas facies se han diferenciado una facies más proximal, dominada por *wackestones* (ocasionalmente *packstones*) peloidales y bioclásticos bioturbados (*facies 4a*), y una facies relativamente más distal, de textura *mudstone* a *wackestone* con escasos fósiles (*facies 4b*), en particular bivalvos, braquiópodos y crinoides.

Análisis secuencial

La definición de secuencias en los diferentes sectores analizados, se basa en la existencia de superficies netas, que se pueden trazar a escala de afloramiento, y que representan interrupciones en la sedimentación, ligadas a saltos bruscos en la evolución vertical de facies (ver Bádenas *et al.,* 2010). La mayor parte de las secuencias diferenciadas muestran una evolución de facies somerizante, si bien se reconocen también secuencias profundizantes, agradacionales y con una evolución profundizante-somerizante.

Almonacid de la Cuba

La distribución de las secuencias identificadas por Bádenas *et al.* (2010) en el afloramiento continuo de 12 km de extensión lateral de Almonacid de la Cuba se muestra, de forma simplificada, en la Fig. 5. El análisis secuencial en las 12 series analizadas (de 32 a 38 m espesor), permitió

identificar dos tipos de secuencias: secuencias continuas 1 a 11, cuyos límites se pueden trazar a lo largo de todo el afloramiento; secuencias discontinuas, que aparecen hacia la parte superior de las sucesiones estudiadas (en las secuencias 8, 9 y 10), cuyos límites tienen un máximo de 5 km de continuidad lateral (Fig. 5).

Las 11 secuencias continuas de 2 a 5 m de espesor medio se apilan formando una evolución vertical de largo término profundizante-somerizante (Fig. 5). Las secuencias 1 y 2 tienen una evolución vertical somerizante, con el paso de facies de *lagoon* micríticas y granosostenidas, a facies laminadas formadas en ambientes inter- y supra-mareales. La secuencia 3 muestra el tránsito vertical brusco entre un término inferior oolítico (cinturón somero de alta energía abierto) a facies micríticas de *lagoon*. Las secuencias 4 a 7 son continuas y corresponden al estadio de máxima profundización, ya que están dominadas por facies micríticas relativamente más distales y profundas, de ambientes submareales abiertos de baja energía. Las secuencias 8 a 11 son somerizantes, con un término inferior de espesor va-

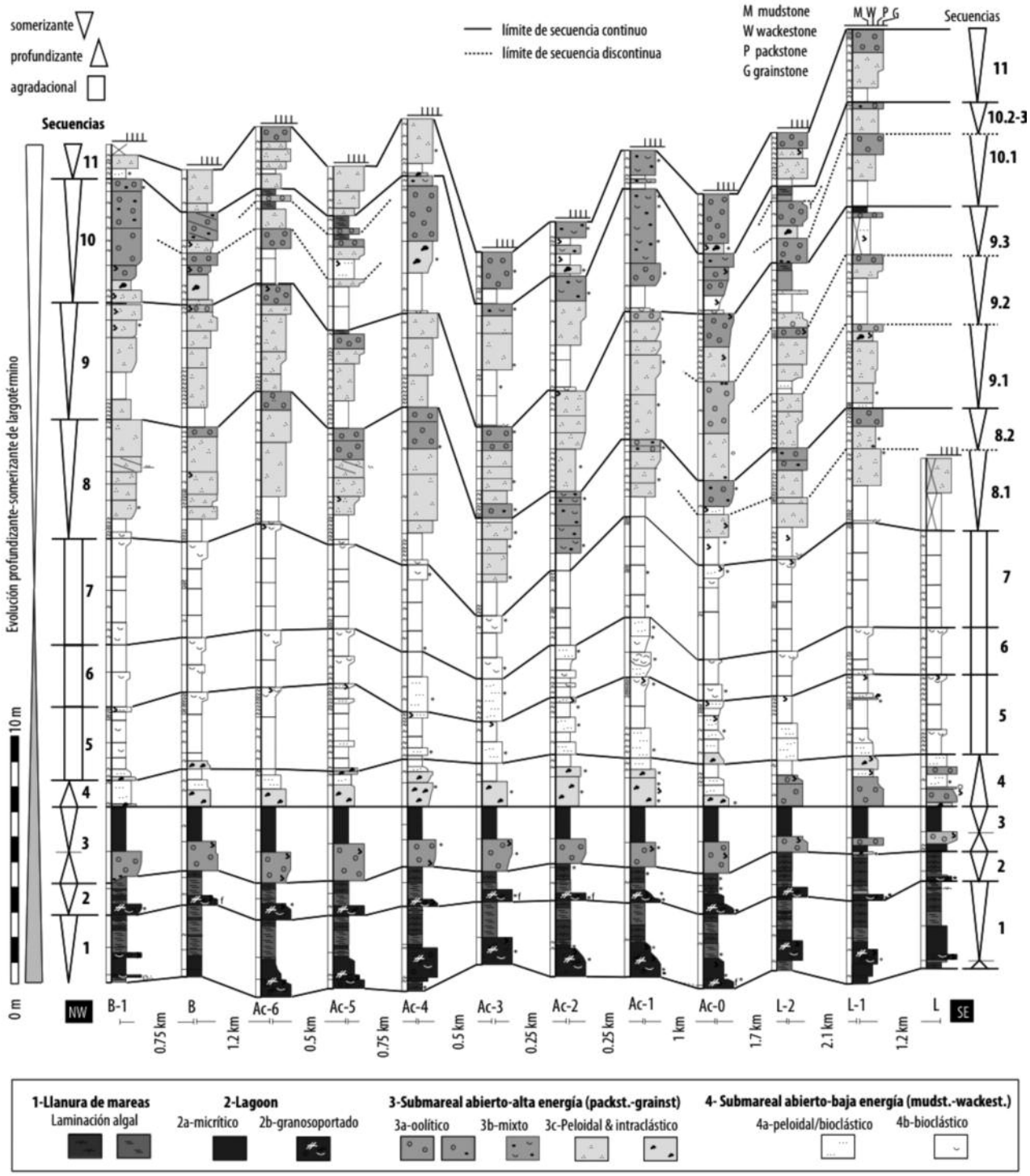

Fig. 5.- Correlación entre las secuencias diferenciadas en los 12 perfiles analizados en los afloramientos de Almonacid de la Cuba. Simplificado a partir de Bádenas *et al.* (2010).

riable de facies micríticas de plataforma abierta de baja energía, y un término superior granosostenido de plataforma abierta de alta energía, con proporciones variables de componentes esqueléticos y no esqueléticos (ooides, peloides, intraclastos). A techo de algunas de estas secuencias se encuentran evidencias de exposición subaérea intermitente (facies laminadas con grietas de desecación, *teppes* y/o pososidad fenestral). En determinados sectores, las secuencias 8 a 10 presentan lateralmente mayor espesor y se desdoblan en secuencias somerizantes discontinuas, limitadas por discontinuidades de menor extensión lateral. En particular, en torno a las secciones Ac-0 y L-1, se identifican hasta 8 secuencias discontinuas (ver secuencias 8.1–10.3 en la figura 5).

Calanda

Al sur de Calanda se encuentra un afloramiento que expone de forma prácticamente continua la parte superior de la Fm. Cuevas Labradas objeto de estudio, a lo largo de casi 3 km. El análisis secuencial se ha realizado a partir del estudio nivel a nivel de tres perfiles (C1, C3 y C5), separados entre si 1,2 y 1,3 km respectivamente (Fig. 2). En los tres perfiles, se han diferenciado 10 secuencias limitadas por superficies de estratificación bien marcadas (Fig. 6), que han podido ser correlacionadas mediante el seguimiento de sus límites en el campo y en ortofotos. Las secuencias de alta frecuencia reconocidas se agrupan formando una evolución profundizante-somerizante de largo término (Fig. 7), similar a la observada en Almonacid de la Cuba.

Se han diferenciado 10 secuencias de alta frecuencia, cuyo espesor oscila entre 1 y 3 metros, con una evolución vertical de facies variable. La secuencia 1 presenta generalmente una evolución de facies simétrica, profundizante-somerizante y está enteramente formada por facies granosoportadas, con niveles dominados por facies oolíticas relativamente más proximales. La secuencia 2 tiene una evolución profundizante, con facies micríticas abiertas localizadas en la parte superior. No obstante, en el perfil C3 se reconoce un límite de secuencia bien marcado, que limita las secuencias discontinuas 2.1 y 2.2. Las secuencias 3 y 4 tienen un evolución profundizante-somerizante, con las facies micríticas abiertas de baja energía localizadas hacia su parte media y el dominio de las facies granosoportadas peloidales relativamente más proximales.

En la secuencia 5 predominan las facies micríticas abiertas de baja energía, que se presentan localmente recristalizadas y dolomitizadas. Por encima, las secuencias 6 a 10 corresponden a secuencias somerizantes, limitadas por superficies de profundización. En el perfil C1, la secuencia 6 se divide en dos secuencias discontinuas somerizantes. De modo similar, la secuencia 10 se divide en dos secuencias discontinuas en el perfil C5. Las secuencias 8 y 10 están localmente coronadas por las facies de *lagoon* micríticas y granosoportadas (con abundantes dasicladáceas y gasterópodos).

Castel de Cabra-Montalbán

Al norte de la provincia de Teruel, a lo largo del flanco sur del anticlinal de Montalbán, las unidades del Jurásico Inferior forman un afloramiento continuo que se extiende a lo largo de más de 7 km, entre las poblaciones de Montalbán y Calanda. El análisis secuencial de la parte superior de la Fm. Cuevas Labradas se ha realizado a partir del estudio nivel a nivel de dos perfiles (Castel de Cabra y Montalbán), separados entre si 6,5 km (Figs. 2 y 8). Las condiciones de afloramiento no permiten realizar perfiles de detalle intermedios. La equivalencia lateral entre los dos perfiles analizados se ha establecido a partir de datos biostratigráficos (presencia de *Everticyclammina praevirguliana* en la base de ambas sucesiones) y litoestratigráficos. En particular, los niveles estudiados en la parte alta de la Fm. Cuevas Labradas están bien cementados y forman una cresta continua, que se puede correlacionar mediante la ortoimagen entre uno y otro perfil.

El espesor total de la unidad estudiada y las secuencias definidas se reducen notablemente desde Castel de Cabra (12 metros; 9 secuencias) hasta Montalbán (7 metros; 6 secuencias). De forma general, dominan las facies granoso-

Fig. 6.- Distribución de las secuencias diferenciadas en los perfiles Calanda-1 (C1) y Calanda-5 (C5).

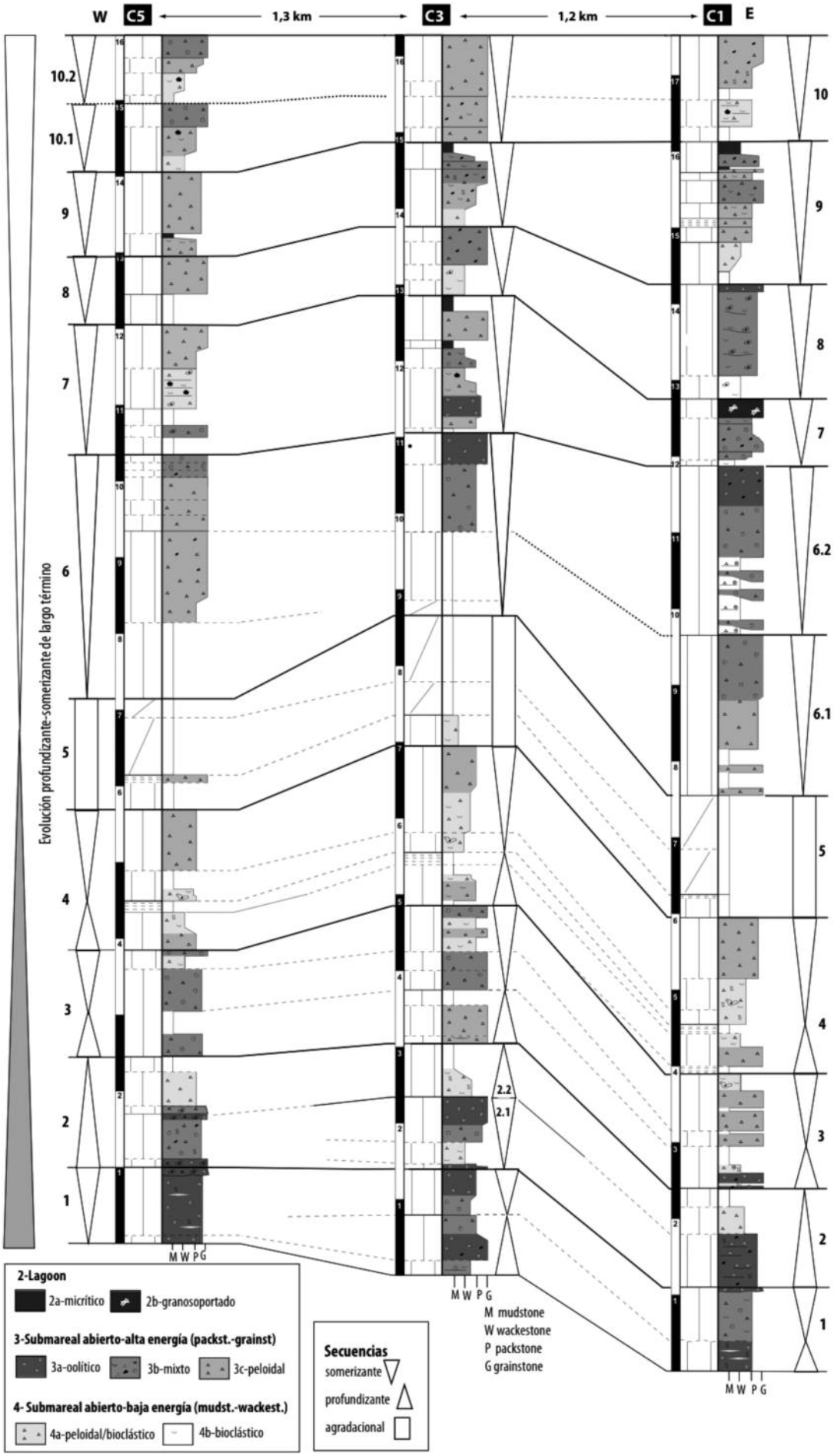

Fig. 7.- Correlación entre las secuencias diferenciadas en los 3 perfiles de Calanda (C1, C3, C5).

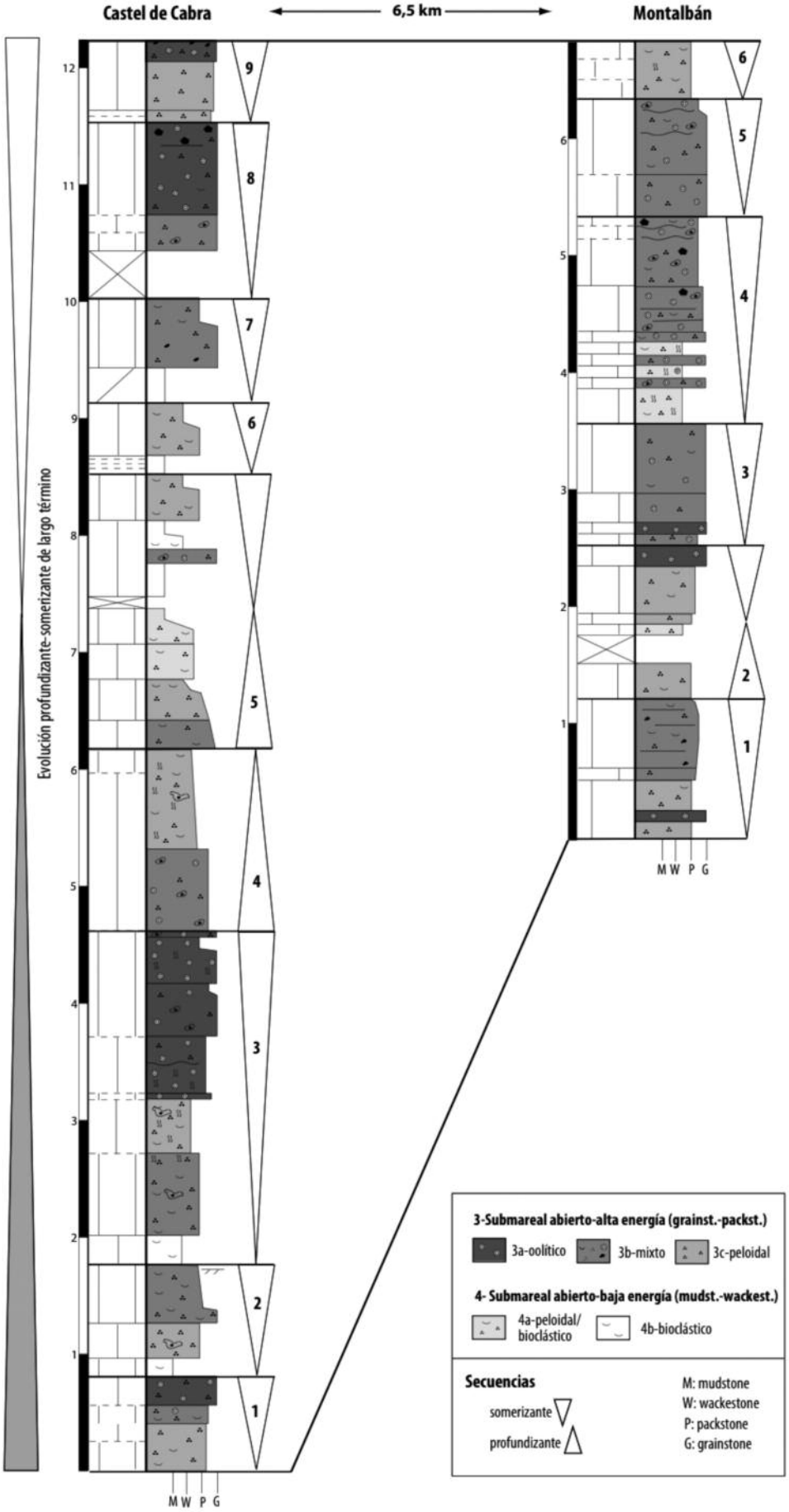

Fig. 8.- Distribución de las secuencias diferenciadas en los perfiles de Montalbán y Castel de Cabra.

portadas submareales abiertas de alta energía en ambas sucesiones, con la particularidad de contener una proporción relativamente elevada de granos detríticos bien redondeados (cuarzo), indicativa de la existencia de zonas emergidas próximas. Las facies micríticas de plataforma abierta de baja energía dominan tan sólo hacia la parte media de la sección de Castel de Cabra. El dominio de esas facies ha permitido identificar el máximo transgresivo de un ciclo profundizante-somerizante de largo término, similar al definido en Almonacid y Calanda. Estos niveles fangosos son muy escasos en la serie poco subsidente de Montalbán, que está casi enteramente dominada por facies granosoportadas con abundantes granos de cuarzo.

Las secuencias de alta frecuencia identificadas tienen un espesor que oscila entre los 0,5 y 3 m. Las secuencias 1-3 y 6-9 identificadas en Castel de Cabra son somerizantes, y presentan un término inferior poco potente de facies micríticas abiertas de baja energía. Las secuencias 4 y 5 muestran una evolución profundizante y profundizante-somerizante, respectivamente. En Montalbán, todas las secuencias identificadas (excepto la secuencia 2) tienen una evolución somerizante, con las facies micríticas abiertas tan sólo representadas en la secuencia 4.

Discusión: comparación entre los diferentes sectores

En la figura 9 se ha sintetizado la evolución vertical de secuencias y facies observada en cada uno en los sectores analizados. Para realizar este esquema simplificado, las facies se han agrupado en 5 grandes tipos, que representan sucesivos cinturones de facies dentro de la plataforma, desde la asociación de facies 1 de llanura de mareas más proximal hasta la asociación de facies 4 submareal de baja energía, localizada por debajo del nivel de base de oleaje, en los dominios relativamente más distales. Se han indicado los límites de secuencias. En el caso de Almonacid de la Cuba y Calanda, se ha tomado como referencia los dos perfiles localizados en el extremo de los afloramientos. En ambos casos, la correlación entre los límites de secuencia se ha establecido mediante seguimiento fotogeológico y en

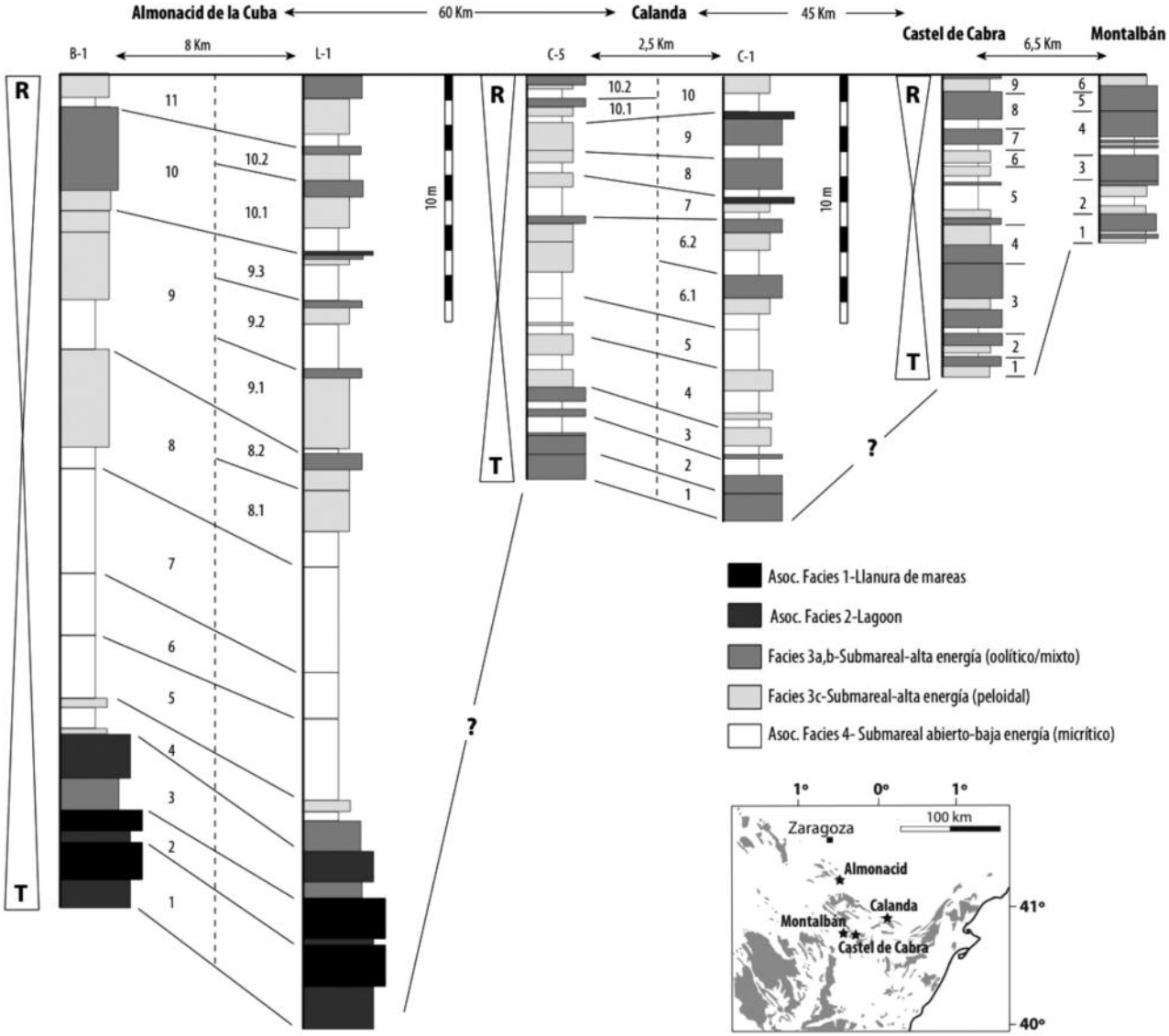

Fig. 9.- Esquema sintético de la distribución de facies y secuencias en los perfiles analizados.

el campo. En el caso de Montalbán-Castel de Cabra, no ha sido posible establecer correlaciones entre los límites de secuencia definidos en uno y otro perfil.

La comparación entre las secuencias registradas en Almonacid, Calanda y Castel de Cabra-Montalbán, se puede realizar partiendo de la suposición de que las secciones estudiadas cubren el mismo intervalo temporal. La edad equivalente de las secciones estudiadas está fundamentada en datos biostratigráficos (ver apartado de marco geológico) y en la evolución de facies profundizante-somerizante observada en todos los sectores, que se correspondería con el ciclo de tercer orden T-R LJ2-1 definido por Gómez y Goy (2005) en todo el ámbito de la Cuenca Ibérica septentrional.

Las localidades de Almonacid de la Cuba y Calanda están separadas 60 km y corresponden a dos dominios de la plataforma con una subsidencia particular, mayor en el caso de Almonacid. El número de secuencias continuas definidas en ambos perfiles es prácticamente coincidente (Fig. 9). Sin embargo, en el dominio más subsidente de Almonacid, es frecuente el registro de secuencias discontinuas, de modo que en algunas secciones (como en la sección L-1), se encuentran apiladas en la vertical hasta 15 secuencias. Los perfiles de Castel de Cabra y Montalbán representan dominios poco subsidentes de la plataforma. En este caso, el número de secuencias registradas es sensiblemente menor, y se reduce a 9 y 6 secuencias respectivamente

Los datos expuestos muestran que existe una relación directa entre la tasa de subsidencia de la plataforma y el número de secuencias de alta frecuencia registradas. Esta observación es coherente con la hipótesis planteada en el trabajo de Bádenas *et al.* (2010) a partir de las observaciones realizadas en Almonacid de la Cuba, donde se propone que el número de secuencias registradas a lo largo de la plataforma somera varía en función de las tasas de subsidencia. De esta forma, en zonas poco subsidentes, dos secuencias continuas a escala de afloramiento se podían amalgamar en una sola y, de modo inverso, en zonas más subsidentes, una secuencia continua se podía dividir en dos o más secuencias discontinuas (Fig. 10).

Otro aspecto interesante es el diferente registro de determinadas facies en uno u otro dominio de la plataforma. En particular, las facies más internas de llanura de mareas y de *lagoon* se desarrollan de forma significativa en los intervalos transgresivos de largo término de los dominios más subsidentes, donde la creación de espacio de acomodación es más elevada. Se observa también una progresiva reducción del espesor relativo de los términos submareales abiertos de baja energía conforme disminuye la subsidencia. En los perfiles de Almonacid, las facies micríticas distales suponen en torno al 40% del total de la sucesión, mientras que en el sector menos subsidente de Castel de Cabra-Montalbán, esta proporción se reduce al 10-20%. De modo inverso, la proporción de facies granosostenidas incrementa considerablemente. Es precisamente en estas facies donde se concentrarán un mayor número de secuencias amalgamadas, tal y como se había demostrado en Bádenas *et al.* (2010) a partir del estudio del afloramiento continuo de Almonacid (ver Figs. 9 y 10).

Los límites de las secuencias de alta frecuencia están ligadas a episodios de incremento brusco del espacio de acomodación. El origen de estos incrementos episódicos, bien por la tectónica local, bien por oscilaciones eustáticas, es objeto de debate. El origen tectónico implicaría la existencia de hundimientos episódicos de uno u otro sector de la plataforma, ligados a la tectónica extensional que tuvo lugar en la Cuenca Ibérica septentrional durante el Sinemuriense. La existencia de tales pulsos tectónicos no puede ser descartada, si bien las evidencias de una tectónica extensiva activa (por ejemplo, bloques basculados, depósitos sintectónicos con formación de abanicos de capas, etc.) son escasas en todos los afloramientos analizados (ver Bádenas *et al.,* 2010).

El modelo alternativo de origen de las secuencias identificadas en este trabajo implicaría la existencia de ciclos eustáticos ligados a cambios climáticos episódicos (ciclos orbitales), que tendrían un registro irregular y variable a lo largo de la plataforma, en función de las tasas de subsidencia. El número máximo de secuencias registradas en el dominio más subsidente de la plataforma (Almonacid de la Cuba), es 15. Teniendo en cuenta la duración aproximada del intervalo estudiado (3,5 Ma), la duración media de las secuencias en las zonas donde el registro es más continuo, oscilaría en torno a 200 ka. Las tasas de acumulación medias en estos dominios relativamente más subsidentes no son muy elevadas, ya que oscilarían en torno a 1 cm/1000 años. La duración media de las secuencias tiene un valor intermedio entre los ciclos orbitales de excentricidad de rango corto y largo (100 ka y 400 ka respectivamente). Esta duración media se reduce notablemente en los sectores menos subsidentes (350 ka en Calanda; casi 600 ka en Montalbán).

En trabajos previos se ha postulado la impronta en la sedimentación de las plataformas marinas someras del Jurásico de ciclos eustáticos inducidos por ciclos orbitales de excentricidad de corto término (*e.g.*, Crevello, 1991; Bádenas *et al.,* 2004; Colombié y Strasser, 2005). Según Crevello (1991), los ciclos eustáticos inducidos por estas variaciones orbitales tuvieron una amplitud máxima de 4 a 5 m durante el Sinemuriense. Los estudios de cicloestratigrafía previos, que han permitido identificar la impronta de los ciclos orbitales en el registro sedimentario del Jurásico de la Cuenca Ibérica, se han llevado a cabo en sucesiones continuas y potentes, con una tasa de subsidencia mucho mayor a la observada en el sector estudiado de la plataforma Sinemuriense. Por ejemplo, las sucesiones del Titoniense-Berriasiense analizadas por Bádenas *et al.* (2004) en la Cuenca Ibérica oriental (Salzadella, Montanejos), presentan tasas de acumulación medias de 7-8 cm/1000 años. Es posible que la discrepancia entre el número de ciclos registrados en la Cuenca Ibérica septentrional durante el Sinemuriense (hasta 16 ciclos) y el número de ciclos de excentricidad de rango corto que teóricamente deberían haber quedado registrados durante el intervalo de tiempo analizado (hasta 35 ciclos en un intervalo de 3,5 Ma), se pudiera explicar debido a las bajas tasas de subsidencia observadas (tasas de acumulación máximas de 1 cm/1000 años). Estas bajas tasas favorecieron los procesos de ero-

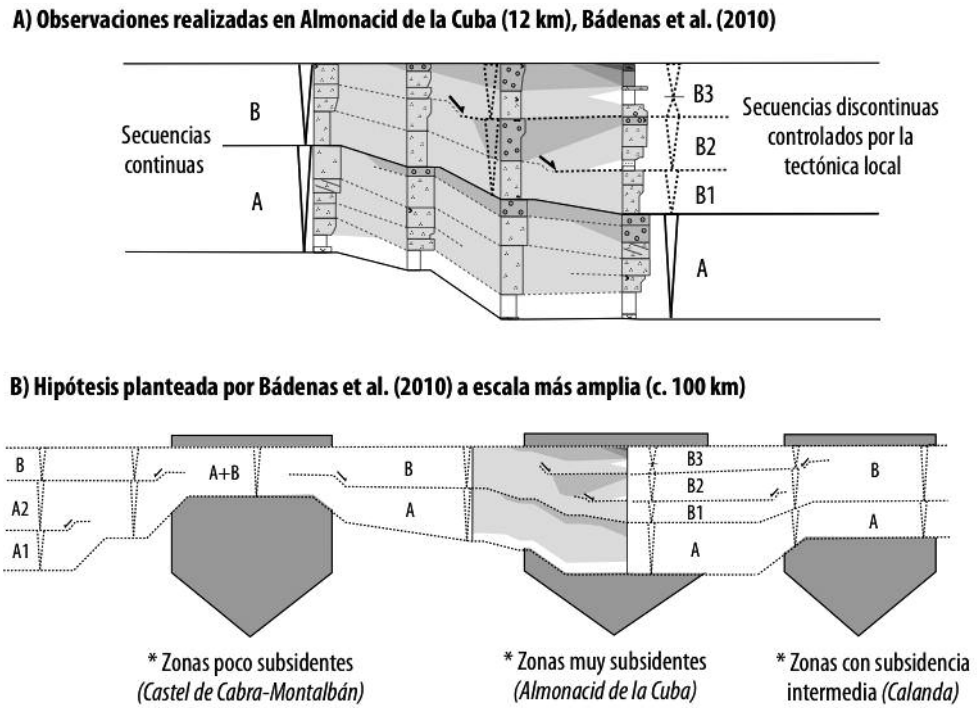

Fig. 10.- Modelo basado en las observaciones realizadas en Almonacid de la Cuba, en el que se plantea que el número de secuencias de alta frecuencia registrados en una plataforma es variable en función de las tasas de subsidencia. Modificado de Bádenas *et al.* (2010).

sión y amalgamiento de secuencias y límites de secuencias, particularmente en aquellos intervalos estratigráficos donde dominan las facies granosoportadas someras de alta energía.

Conclusiones

El registro sedimentario de la plataforma carbonatada somera desarrollada en la Cuenca Ibérica septentrional durante el Sinemuriense superior, muestra el apilamiento de secuencias de alta frecuencia, con una evolución vertical de facies generalmente somerizante. El espesor de estas secuencias es bastante constante a lo largo del sector de la plataforma analizado, y oscila en la mayor parte de los casos entre 1 y 3 m de espesor. No obstante, el número de secuencias registradas es variable, de modo que es mayor en los dominios más subsidentes (hasta 15 secuencias), frente a los de menor tasa de subsidencia (6 secuencias).

Las secuencias de alta frecuencia descritas en este trabajo están limitadas por superficies de discontinuidad, ligadas a incrementos episódicos del espacio de acomodación, que implican bruscas profundizaciones de la plataforma. Estas discontinuidades corresponden a superficies de estratificación bien marcadas que, en afloramientos continuos, se han podido trazar a lo largo de más de 10 km de distancia. Esta continuidad lateral, combinada con la similitud de la evolución de facies, espesor y límites de las secuencias definidas en afloramientos separados entre sí más de 50 km, sugiere la existencia de un factor alocíclico regional o global (más que a procesos autocíclicos), para explicar su origen.

Los límites de secuencia estarían en relación con la existencia de sucesivas etapas de incremento del espacio de acomodación a escala regional, que tendrían un registro variable en función de las tasas de subsidencia diferencial en los distintos sectores de la plataforma analizada. En las zonas con bajas tasas de subsidencia dominan las facies granosoportadas (oolíticas, peloidales, intraclásticas, bioclásticas) de alta energía y el registro de las discontinuidades ligadas a episodios de incremento del espacio de acomodación es menor. En estas condiciones, el número de secuencias identificadas es menor, ya que los límites de secuencia se encuentran amalgamados, con un registro condensado, o incluso pueden estar ausentes por erosión. El registro de las secuencias y límites de secuencia es más completo y continuo en los dominios más subsidentes de la plataforma, donde además se registra una proporción mayor de facies micríticas submareales abiertas, acumuladas por debajo del nivel de base del oleaje.

Las etapas de incremento del espacio de acomodación regionales pueden relacionarse tentativamente con oscilaciones del nivel del mar, inducidas por cambios climáticos. Teniendo en cuenta la duración media de las secuencias registradas en los dominios más subsidentes de la plataforma (en torno a 200 ka), estas oscilaciones podrían estar en relación con los ciclos orbitales de excentricidad de rango corto (en torno a 100 ka). Estos ciclos de oscilación del nivel del mar presentarían un registro irregular y discontinuo a lo largo de todos los dominios de la plataforma analizados.

Los resultados de este trabajo tienen implicaciones para los estudios de cicloestratigrafía en sucesiones de plataforma carbonatada somera. En particular, para obtener un registro más completo y continuo de las secuencias de alta frecuencia inducidas por factores alocíclicos en plataformas carbonatadas, es necesario estudiar dominios con ele-

vadas tasas de subsidencia y acumulación. En estas zonas existirá un registro significativo de facies submareales acumuladas por debajo del nivel de base del oleaje. Por el contrario, la presencia de intervalos estratigráficos dominados por facies granosoportadas de alta energía puede ser indicativo de que el registro sea incompleto, debido a procesos de erosión y amalgamación de secuencias.

Agradecimientos

Este trabajo es una contribución del Grupo Consolidado H54 *Reconstrucciones paleoambientales*, financiado por el Gobierno de Aragón y por el proyecto CGL2011-24546. Las sugerencias realizadas por Alberto Pérez-López y por un revisor anónimo han contribuido a mejorar la versión original del manuscrito.

Bibliografía

Aurell, M., Robles, S., Bádenas, B., Quesada, S., Rosales, I., Meléndez, G. y García-Ramos, J.C. (2003): Transgressive/Regressive Cycles and Jurassic palaeogeography of Northeast Iberia. *Sedimentary Geology*, 162: 239-271.

Aurell, M., Bádenas, B., Bosence, D.W.J. y Waltham, D.A. (1998): Carbonate production and offshore transport on a Late Jurassic carbonate ramp (Kimmeridgian, Iberian basin, NE Spain): evidence from outcrops and computer modelling. En: *Carbonate ramps* (V.P. Wright y T.P. Burchette, Eds.). *Geological Society of London, Spec. Public.*, 149: 137-161.

Bádenas, B., Aurell, M. y Bosence, B. (2010): Continuity and facies heterogeneities of shallow carbonate ramp cycles (Sinemurian, Lower Jurassic, north-east Spain). *Sedimentology,* 57: 1021-1048.

Bádenas, B., Salas, R. y Aurell, M. (2004): Three order of regional sea-level changes control facies and stacking patterns of shallow carbonates in the Maestrat Basin (Tithonian-Berriasian, NE Spain). *International Journal of Earth Sciencies*, 93: 144-162.

Bosence, D.W.J., Procter E., Aurell, M., Bel Kahla, A., Boudagher-Fadel, M., Casaglia, F., Cirilli, S., Mehdie, M., Nieto, L., Rey, J., Scherreiks, R., Soussi, M. y Waltham, D. (2009): A tectonic signal in high-frequency, peritidal carbonate cycles? A regional analysis of Liassic platforms from western Tethys. *Journal of Sedimentary Research,* 79: 389-415.

Boudagher-Fadel, M.K. y Bosence, D.W.J. (2007): Early Jurassic benthic foraminiferal diversification and biozones in shallow-marine carbonates of western Tethys. *Senckenbergiana lethaea*, 87: 1-39.

Burgess, P.M., Wright, V.P. y Emery, D. (2001): Numerical forward modeling of peritidal carbonate parasequence development: implication for outcrop interpretation. *Basin Research*, 13: 1-16.

Colombié, C. y Strasser, A. (2005): Facies, cycles and controls on the evolution of a keep-up carbonate platform (Kimmeridgian, Swiss Jura). *Sedimentology*, 52: 1207–1228.

Crevello, P. D. (1991): High frequency carbonate cycles and stacking patterns: interplay of orbital forcing and subsidence on a lower Jurassic rift platform, High Atlas, Morocco. En: *Sedimentary modelling: Computer simulations and methods for improved parameter definition* (E. K. Franseen, W. L. Watney, C. G. Kendall y W. Ross, Eds.), *Kansas Geological Survey Bulletin,* 233: 207-30.

De Benedictis, D., Bosence, D.W.J., y Waltham, D.A. (2007): Tectonic control of peritidal carbonate parasequence formation: an investigation using forward tectono-stratigraphic modelling. *Sedimentology*, 54: 587-605

Gómez, J.J. y Goy, A. (2005): Late Triassic and Early Jurassic palaeogeographic evolution and depositional cycles of the Western Tethys Iberian platform system (Eastern Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 222: 77-94.

Fischer, A.G., D´Argenio, B., Silva, I.P., Wiesert, H. y Ferreri, V. (2004): Cyclostratigraphic approach to Earth´s history: An introduction. En: *Cyclostratigraphy: Approaches and Case Histories* (B. D´Argenio, A.G. Fischer, I.P. Silva, H. Weissert y V. Ferreri, Eds.). *SEMP Special Publication,* 81: 5-16.

Ginsburg, R.N. (1971): Landward movement of carbonate mud: new model for regressive cycles in carbonates (abstract). *AAPG, Annual Meeting*, abstracts with programs, 55, 340.

Gradstein, F.M., Ogg, J. y Smith, A. (2004): *A Geological Time Scale 2004*, Cambridge University Press, 589 p.

Hardie, L.A. (1986): Stratigraphic models for carbonate tidal flat deposition, En: *Carbonate Depositional Environments, Modern and Ancient, 3, Tidal Flats,* (L.A. Hardie y E.A. Shinn, Eds.), Colorado School of Mines, Quarterly, 81: 59–73.

Pratt, B.R., James, N.P. y Cowan, C.A. (1992): Peritidal carbonates. En: *Facies Models: response to sea level change* (R.G. Walker y N.P. James, Eds.), Geological Association of Canada, 303–322.

Salas, R. y Casas, A. (1993): Mesozoic extensional tectonics, stratigraphy and crustal evolution during the Alpine cycle of the eastern Iberian basin. *Tectonophysics*, 228: 33–55.

Strasser, A., Pittet, B., Hillgartner, H. y Pasquier, J.-B. (1999): Depositional sequences in shallow carbonate dominated sedimentary systems: concepts for a high- resolution analysis. *Sedimentary Geology*, 128: 201–221.

Manuscrito recibido el 12-02-2015
Recibida la revisión el 12-03-2015
Aceptado el manuscrito revisado el 13-03-2015