



Departamento de  
Ciencias de la Tierra  
Universidad Zaragoza



Facultad de Ciencias  
Universidad Zaragoza

# Caracterización y origen de estructuras tipo *hummocky* en sedimentos fangosos (Kimmeridgiense, Ricla)

---

*Trabajo de Fin de Grado. Grado en Geología*  
Septiembre, 2015

**María Duaso Pinilla**

Tutora: Dra. Beatriz Bádenas Lago

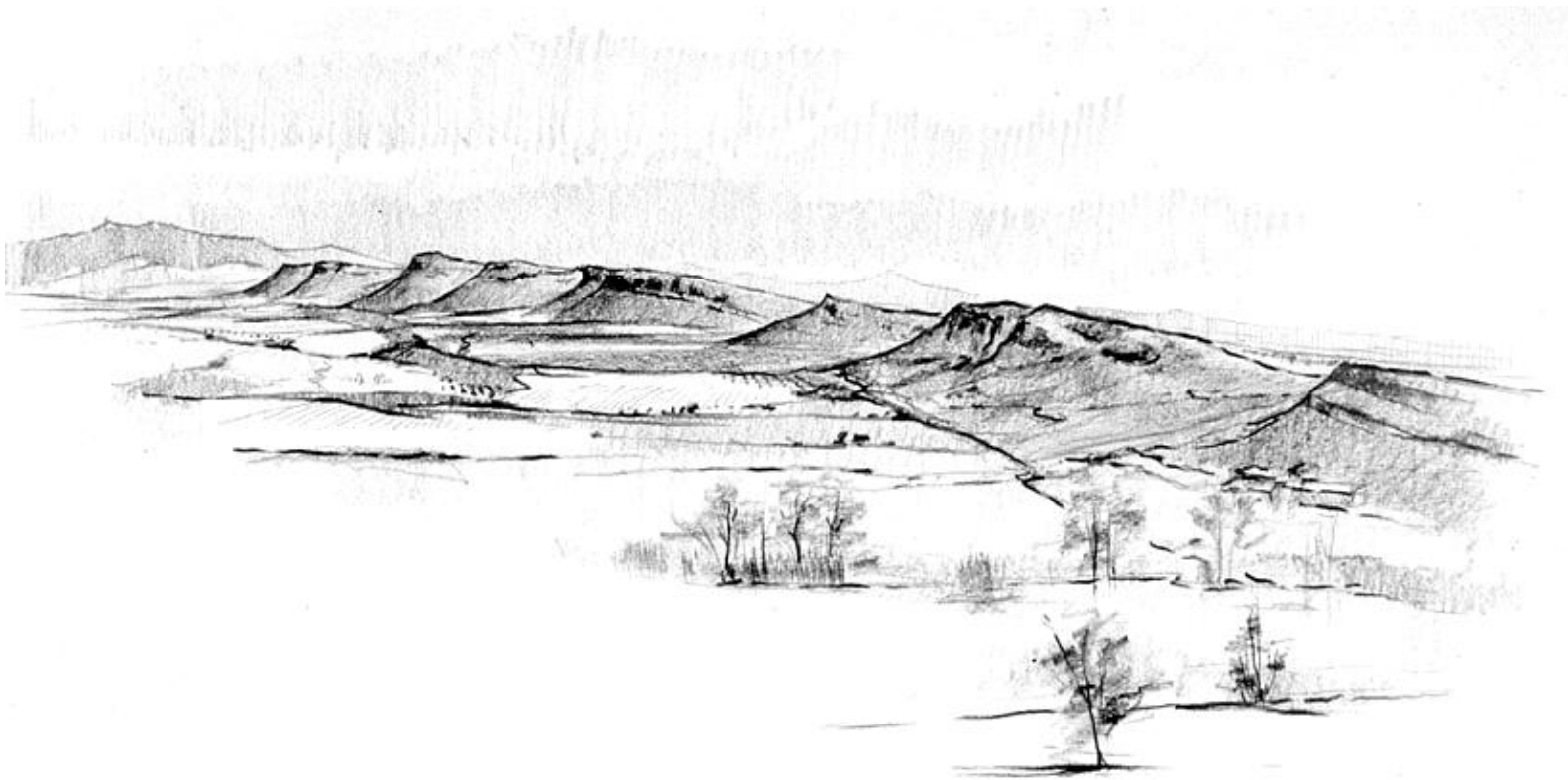


Imagen de portada tomada de <http://paco-pellicer.blogspot.com.es/>

*Agradecimientos:*

*Al Servicio de Preparación de Rocas y Materiales Duros de  
la Universidad de Zaragoza*

*A Tío Carlos, por su paciencia y su gran labor de  
maquetación e impresión.*

*A mis padres y mi hermana por su interés, que ya conocen  
de memoria el camino a Ricla.*

*A Beatriz, por su tiempo, esmero y dedicación.*

## ÍNDICE

1. Abstract.....	pg. 1
2. Planteamiento.....	pg. 1
3. Objetivos.....	pg. 2
4. Metodología.....	pg. 2
4.1. Revisión bibliográfica.....	pg. 2
4.2. Trabajo de campo.....	pg. 3
4.3. Trabajo de laboratorio y gabinete.....	pg. 3
4.4. Elaboración de datos y síntesis.....	pg. 4
5. Contexto geográfico y geológico.....	pg. 4
5.1. Situación geográfica y geológica.....	pg. 4
5.2. Contexto sedimentológico de los depósitos estudiados.....	pg. 6
6. Descripción de los depósitos.....	pg. 9
6.1. Afloramiento <i>Ricla pueblo</i> .....	pg. 9
6.1.1. Extensión y geometría de los depósitos.....	pg. 9
6.1.2. Fábrica y estructuras sedimentarias visibles en microfacies.....	pg. 14
6.2. Afloramientos <i>Ricla estación</i> y <i>Ricla cementerio</i> .....	pg. 16
6.2.1. <i>Ricla estación</i> .....	pg. 16
6.2.2. <i>Ricla cementerio</i> .....	pg. 18
7. Interpretación y discusión.....	pg. 19
7.1. Origen y naturaleza de los fangos carbonatados.....	pg. 19
7.2. Origen de las estructuras tractivas (HCS y estratificación cruzada de bajo ángulo).....	pg. 20
8. Conclusions.....	pg. 23
9. Bibliografía.....	pg. 24
10. Anexos.....	pg. 26
Anexo 1. Esquemas elaborados a partir de los fotomosaicos del afloramiento <i>Ricla pueblo</i> .....	pg.26
Anexo 2. Esquema elaborado a partir del fotomosaico del afloramiento <i>Ricla estación</i> .....	pg. 27

---

## 1. ABSTRACT

Hummocky cross stratification (HCS) is a type of cross stratification characterized by wavy sets with erosive base. These sets present low-angle cross laminae that present thickness fluctuations: they become thinner in hummocks (convex areas) and thicker in swales (concave areas). Despite these structures are commonly formed in sand- or lime-sized sediments, they has been recognized in some lime mudstone beds of the Loriguilla Fm. outcropping near Ricla (Zaragoza province, Spain), which represent the distal mid ramp deposits of the Kimmeridgian (Upper Jurassic) carbonate ramp developed in the Iberian Basin.

This work has been focused on the analysis of these lime mudstone beds with HCS at three different outcrops near Ricla, in order to: 1) characterize the lateral and vertical extension of the HCS beds; 2) look for sedimentological evidences indicating how HCS could be formed in muddy sediments, and 3) interpret and discuss about the processes that could generate these structures. Main data come from: the elaboration of photo-mosaic, a technique used to draw the geometry and the lateral and vertical extension of each bed trying to obtain a global vision throughout all the outcrop; field observations to extract the main lithological and textural characteristics of each specific bed; and the petrographical analysis of thin sections to analyze texture and sedimentary structures at microscopic scale.

The analysis of the outcrops has allowed to characterize the existence of lime mudstones bed packages including beds with HCS and low-angle cross stratification, which are separated by lime mudstone bed packages dominated by plano-parallel continuous beds. Beds with HCS and low-angle cross stratification are dm- thick and more than 60 m in lateral extension, and are mainly formed by lime mudstones richer in sandy laminae compared to plano-parallel beds. Each HCS bed is formed by a set of wavy continuous levels and discontinuous lenticular levels, with more prominent wavy geometry toward the distal zones of the outcrops. They represent isotropic HCS. Each bed with low-angle cross stratification is formed by levels arranged in shingling configuration, which are also inclined toward the distal zones of the outcrops. These could represent large-scale anisotropic HCS. The existence of trough or inclined alternating sandy and muddy laminae within these deposits reflect lime muds were flocculated when the sedimentary structures were formed.

Taking into account that the generation of HCS requires combined unidirectional and oscillatory flows, the studied deposits could be generated by storms, tsunamis or internal waves. The lack of evident HCS beds on more proximal outcrops and the prominent wavy surfaces at the distal parts reflect that the generation process was concentrated in localized areas of the distal mid ramp. These evidences exclude the impact of superficial waves (storms and tsunamis) as the generation process, and support the interpretation that the deposits were formed by the oscillatory and unidirectional (backwash) flows generated by internal waves breaking in localized areas of the seafloor.

## 2. PLANTEAMIENTO

Los afloramientos kimmeridgienses (Jurásico Superior) de Ricla (provincia de Zaragoza) exponen a lo largo de unos 6 km de extensión los depósitos de la zona media de una plataforma carbonatada de tipo rampa desde sus dominios relativamente más proximales a distales, es decir, del submambiente situado por debajo del nivel de base de oleaje de buen tiempo (nbBT) y por encima del nivel de base de oleaje de tormentas (nbT). Las facies más distales aflorantes son calizas fangosas de textura *mudstone*, pertenecientes

a la Fm. Ritmita calcárea de Loriguilla. Estas calizas intercalan niveles granosostenidos arenoso y/o oolíticos de potencia milimétrica a decimétrica con estructuras sedimentarias como *ripples* y estratificación cruzada, que han sido interpretados como depósitos de tormenta y, algunos de ellos, como depósitos producidos por el impacto de olas internas (Bádenas y Aurell, 2001; Bádenas *et al.*, 2012).

En las calizas fangosas se observan también ondulaciones concentradas en determinados paquetes de capas que se asemejan a estratificación cruzada *hummocky* (*hummocky cross stratification*: HCS; Bádenas, 1999). El presente trabajo se centra en el análisis de estas posibles estructuras HCS en las calizas fangosas. Teniendo en cuenta el tipo de flujos involucrados en la generación de HCS (flujos combinados unidireccionales y oscilatorios), el subambiente de depósito de las calizas (en la zona de rampa media entre el nbBT y el nbT), y el origen propuesto por otros autores a los depósitos granosostenidos que éstas intercalan, el origen de las mencionadas estructuras podría adscribirse a tormentas, olas internas o tsunamis. El análisis sedimentológico detallado de estos depósitos permitirá aportar datos a favor de uno u otro proceso sedimentario.

### 3. OBJETIVOS

El presente trabajo se centra en la descripción e interpretación de las estructuras sedimentarias de tipo HCS presentes en las calizas fangosas de la Fm. Loriguilla en Ricla, en tres afloramientos próximos a esta localidad. Los objetivos concretos del trabajo son:

- Caracterizar los depósitos fangosos carbonatados con estructuras sedimentarias de tipo HCS, tanto a escala de observación capa a capa en afloramiento como a escala de microscopio en los intervalos seleccionados para los tres afloramientos estudiados, poniendo especial énfasis en el análisis de la extensión vertical y lateral de dichos depósitos.

- Identificar evidencias tanto a escala de afloramiento como de microfacies que expliquen la presencia de estructuras tractivas en dichos fangos carbonatados.

- Interpretar y discutir sobre qué proceso o procesos sedimentarios pudieron originar las estructuras tractivas reconocidas, en coherencia con el contexto sedimentológico establecido en estudios previos.

Se trata, por lo tanto, un trabajo enfocado a una de las disciplinas básicas de la Estratigrafía como es la Sedimentología, que trata del estudio del transporte y depósito de sedimentos a partir del análisis de su composición, estructuras internas y procesos hidrodinámicos de formación de los mismos (e.g., Arche, 2010).

### 4. METODOLOGÍA

El presente estudio se ha llevado a cabo siguiendo la metodología que se detalla a continuación, que ha abarcado la revisión bibliográfica de trabajos generales y específicos relacionados con el tema tratado, diferentes sesiones de trabajo de campo, laboratorio y gabinete, mediante las cuales se llevó a cabo la recopilación de datos, y finalmente la elaboración y síntesis de los mismos.

#### 4.1. Revisión bibliográfica

La revisión bibliográfica se ha realizado de forma previa y simultánea al desarrollo de las demás labores. A partir de los documentos bibliográficos seleccionados, se ha extraído la información geológica general de la zona de estudio, haciendo incidencia en la

información sobre el contexto estratigráfico-sedimentológico de los depósitos estudiados, así como en los aspectos sedimentológicos específicos de las estructuras sedimentarias que han sido caracterizadas y de la problemática que plantea el origen de los mismos.

#### **4.2. Trabajo de campo**

El trabajo de campo realizado consistió en la localización y el análisis de detalle de los paquetes de capas de calizas fangosas con estructuras de tipo HCS en tres afloramientos seleccionados. El estudio se basó principalmente en el análisis de un afloramiento de referencia al que se le ha asignado la denominación de *Ricla pueblo*. Los datos obtenidos de su estudio se complementaron con los obtenidos en depósitos similares presentes en otros dos afloramientos no conectados físicamente entre sí, denominados *Ricla estación* y *Ricla cementerio*.

El análisis del afloramiento de referencia *Ricla pueblo* incluyó los siguientes aspectos:

- La toma de fotografías continuas de los depósitos a lo largo de toda la extensión del afloramiento para caracterizar sobre las mismas y en el campo, su geometría, extensión lateral y variaciones de potencia, así como su litología, textura, componentes y estructuras sedimentarias, en cada uno de los estratos individuales que conforman los depósitos. Para ello se tomaron un total de 77 fotografías de los depósitos para la elaboración de fotomosaicos, que junto al perfil estratigráfico de referencia, sintetizan toda la información obtenida.

- La toma de 18 muestras de mano de las calizas para el estudio de su textura y estructuras sedimentarias en el laboratorio.

En cuanto a los otros dos afloramientos, el estudio no se realizó con el mismo nivel de detalle debido a impedimentos relacionados con su inaccesibilidad (*Ricla estación*), o su continuidad lateral limitada (*Ricla cementerio*). Estos hechos han condicionado que el estudio de los mismos se haya restringido al análisis de los depósitos en fotomosaicos y el estudio de campo.

El material que se ha utilizado durante las sesiones de campo ha sido el habitual en el levantamiento de series estratigráficas, que incluye martillo de geólogo, brújula, metro, lupa de mano, cámara fotográfica, rotulador permanente y bolsas de plástico para siglar y transportar las muestras recogidas, y cuaderno y material de escritura para hacer las anotaciones oportunas.

#### **4.3. Trabajo de laboratorio y gabinete**

Parte del trabajo de recogida de datos también se realizó a lo largo de diferentes sesiones de laboratorio y gabinete. Estas labores incluyeron:

- El ensamblaje de las diferentes fotografías seriadas tomadas en campo para la preparación de los fotomosaicos, que fueron utilizados como documentos base para el estudio en campo de las características sedimentológicas de los depósitos. Para el procesado y ensamblado de las fotografías se utilizaron dos programas informáticos de tratamiento fotográfico: el programa *Hugin 2.0* y el programa *Adobe Photoshop CS6 extended*. A partir de estos se obtuvieron 16 fotomosaicos parciales para la obtención de 3 fotomosaicos síntesis de los depósitos en el afloramiento de referencia *Ricla pueblo*, y 3 fotomosaicos en los afloramientos *Ricla estación* y *Ricla cementerio*.

- El estudio petrográfico de las 18 muestras de roca dura, de las que se seleccionaron 12 muestras para su estudio en lámina delgada. La realización de secciones pulidas de las muestras fue desestimada, debido a que el color negrozco en corte fresco de las calizas no permite realizar una caracterización detallada y no aporta más información que la obtenida en campo. La elaboración de las láminas delgadas se realizó a cargo del personal del Servicio de Preparación de Rocas y Materiales Duros de la Universidad de Zaragoza. Las muestras en lámina delgada se estudiaron mediante microscopio petrográfico y se clasificaron siguiendo la clasificación textural de Dunham (1962). También se realizó el análisis detallado de los componentes y estructuras sedimentarias que aparecen en cada una de las láminas. Se tomaron fotografías de las muestras en lámina delgada mediante el uso de escáner y cámara fotográfica adaptada al microscopio petrográfico.

#### **4.4. Elaboración de datos y síntesis**

Una vez recopilados todos los datos obtenidos en campo, gabinete y laboratorio, fue posible la caracterización tanto en la vertical como en la horizontal de los depósitos. En consonancia con los objetivos de trabajo y tras la correspondiente revisión bibliográfica, se procedió a realizar la síntesis de los datos y la interpretación de los procesos sedimentarios que los originaron, integrando esta información en el modelo sedimentario propuesto previamente para los materiales estudiados.

Para la redacción y la maquetación de la presente memoria se utilizó el programa de escritura *Microsoft Office Word 2007*. Algunas de las figuras que se presentan en el texto se configuraron mediante los programas de dibujo y de tratamiento fotográfico *Adobe Illustrator CS6* y *Adobe Photoshop CS6 extended*, respectivamente.

### **5. CONTEXTO GEOGRÁFICO Y GEOLÓGICO**

#### **5.1. Situación geográfica y geológica**

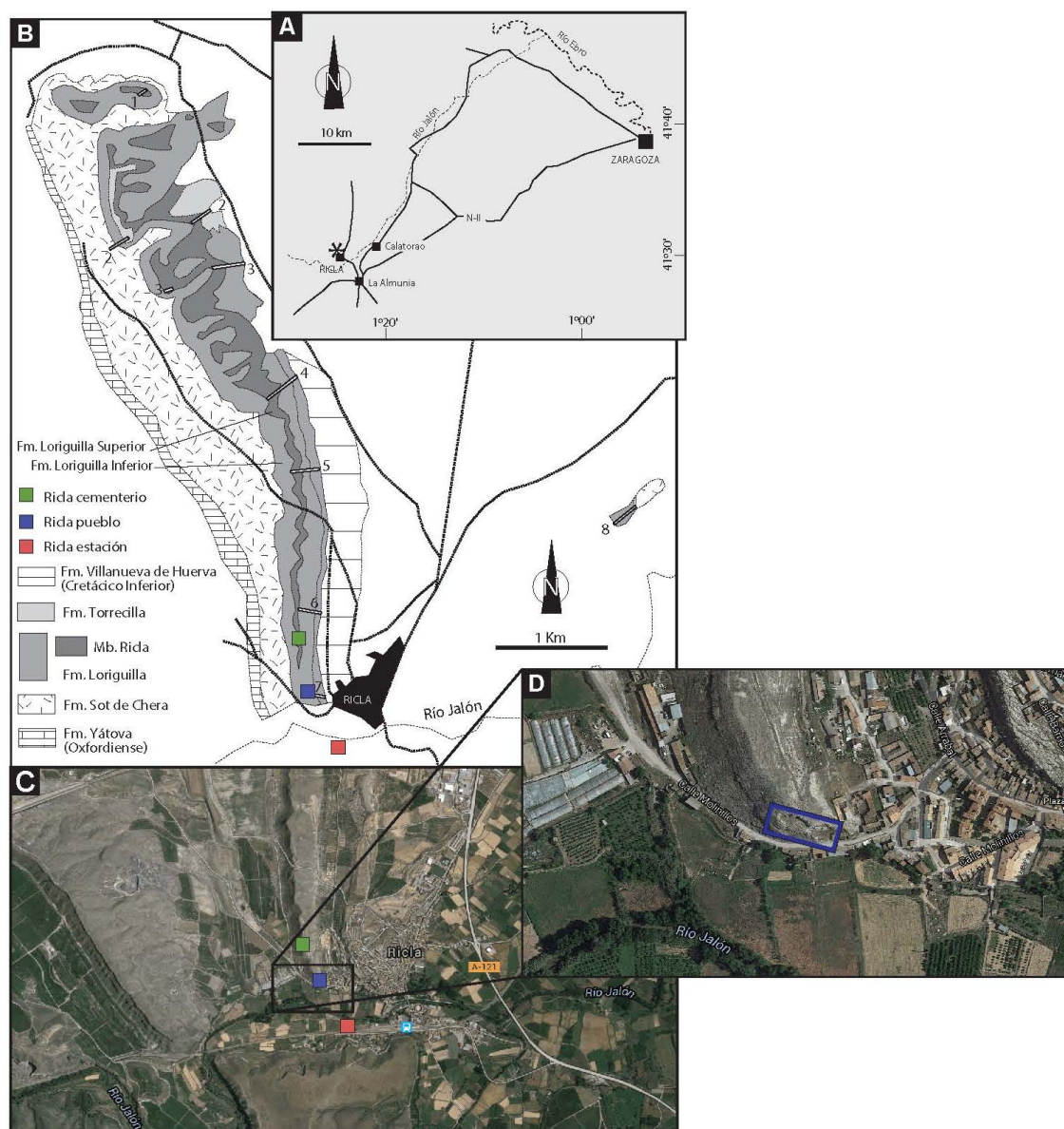
La zona en la que se localizan los afloramientos estudiados en el presente trabajo se encuentra situada a las afueras de la localidad de Ricla, perteneciente a la Comunidad Autónoma de Aragón, en concreto a la comarca de Valdejalón, en la provincia de Zaragoza (Fig. 1A). Ricla dista de Zaragoza 58,6 km, siguiendo la autovía A-2 hacia el suroeste, en dirección Madrid.

El término municipal de Ricla se encuadra entre dos grandes unidades fisiográficas y estructurales, como son el borde oriental de la Rama Aragonesa de la Cordillera Ibérica y la Depresión del Ebro. Afloran en este contexto materiales mesozoicos, neógenos y cuaternarios. Los sedimentos neógenos, en facies continentales, fosilizan el sistema de cabalgamientos que delimitan la Cordillera Ibérica y la Cuenca Terciaria del Ebro y son discordantes sobre los paleorelieves de rocas jurásicas de origen marino y del Cretácico Inferior de origen continental, que quedan ampliamente representados en el núcleo del Sinclínorio de Litago-Ricla. En cuanto a los depósitos cuaternarios, tienen un marcado carácter fluvio-aluvial en relación con el "somontano" del valle del Río Jalón, de dirección noreste-suroeste, que cruza la localidad de Ricla (Lendinez, *et al.*, 1995).

La serie jurásica en la que se enmarcan los depósitos estudiados forma parte del flanco oriental del Sinclínorio de Litago-Ricla. La sucesión estratigráfica jurásica comprende, de más antigua a más moderna, las siguientes unidades litoestratigráficas: Fm. Dolomías y carniolas de Cortes de Tajuña, Fm. Alternancia de calizas y dolomías de Cuevas Labradas, Fm. Margas del Cerro del Pez, Fm. Caliza bioclástica de Barahona y Fm. Alternancia de



Margas y calizas de Turmiel, del Jurásico Inferior; Fm. Chelva, del Jurásico Medio; y Fm. Calizas con esponjas de Yátova, Fm. Margas de Sot de Chera, Fm. Ritmita calcárea de Loriguilla y Fm. Calizas con corales de Torrecilla de Cameros, del Jurásico Superior (Lendinez *et al.*, 1995).



Las unidades del Jurásico Superior afloran al norte de la localidad de Ricla en una serie monoclin de orientación norte-sur y suave buzamiento, en torno a 15° hacia el este, constituyendo un afloramiento prácticamente continuo de en torno a 6 km de extensión (Fig. 1B). Los depósitos en los que se ha centrado este trabajo pertenecen a la Fm. Ritmita calcárea de Loriguilla, de edad Kimmeridgiense, definida formalmente por Gómez y Goy (1979) en el sector levantino de la Cordillera Ibérica. En la zona de Ricla, la Fm. Loriguilla presenta 120 m de espesor y posee características particulares respecto a los sectores más orientales de la cordillera, ya que en particular en este sector, es posible reconocer su

cambio lateral de facies a las calizas arrecifales de la Fm. Torrecilla, situadas al norte del afloramiento (Bádenas *et al.*, 1998). La Fm. Loriguilla en Ricla incluye (Fig. 1A): un tramo inferior de 70 m de potencia, de alternancia de margas y calizas bioclásticas y arenosas (Fm. Loriguilla “inferior”); un tramo medio de areniscas y calizas oolíticas con estratificación cruzada de 27 m de potencia, que se acuña hacia el sur hasta los 7 m de potencia (Mb. Ricla); y un tramo superior (Fm. Loriguilla “superior”) formado por 64 m de calizas de textura *mudstone* y margas, en la que se intercalan niveles granosostenidos arenoso y/o oolíticos, y que es equivalente lateral a las calizas arrecifales de la Fm. Torrecilla.

Los depósitos estudiados en el presente trabajo pertenecen en concreto al tramo superior de la Fm. Loriguilla, equivalente lateral de la Fm. Torrecilla, y se sitúan geográficamente al sur del afloramiento de Ricla, en el entorno de esta localidad (Fig. 1B y C). El afloramiento de referencia *Ricla pueblo* se sitúa al este de Ricla, en las coordenadas 41°30'15,3"N 1°24'37,6"W (Fig. 1D); *Ricla cementerio*, se sitúa al norte de *Ricla pueblo*, en las coordenadas 41°30'20,4"N 1°24'43,1"W, y *Ricla estación*, se localiza en una pequeña cantera, al sur de la línea de ferrocarril que cruza Ricla, en las coordenadas 41°30'0,002"N 1°24'31,2"W. Así pues los tres afloramientos se orientan según una línea aproximada norte-sur, siendo el afloramiento *Ricla cementerio* el más septentrional. A 140 m de este hacia el sur, se sitúa el afloramiento de referencia *Ricla pueblo*, y finalmente más al sur se sitúa el afloramiento *Ricla estación*, que dista 480 m de *Ricla pueblo*.

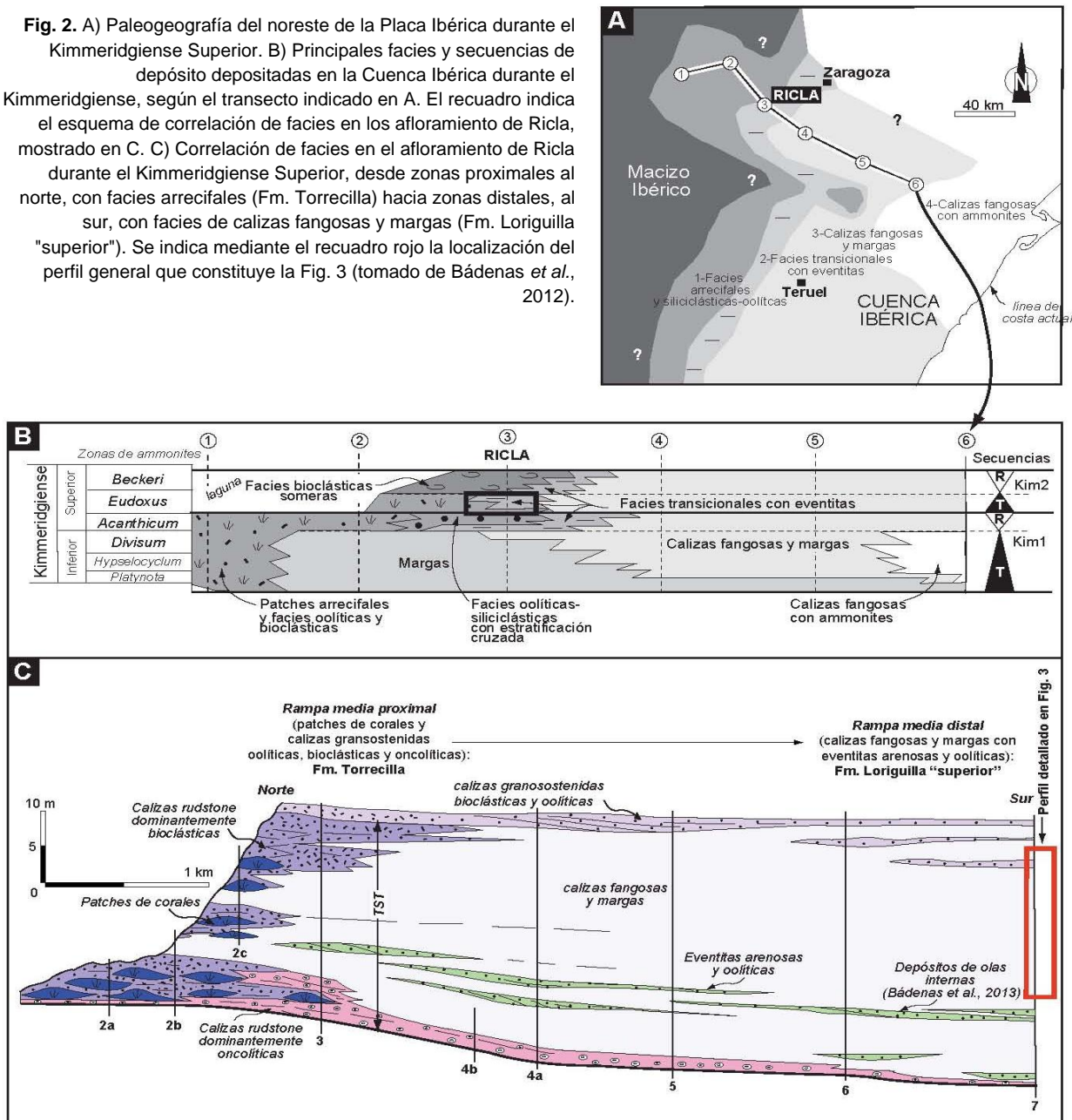
## 5.2. Contexto sedimentológico de los depósitos estudiados

Como se ha comentado en los anteriores apartados, los depósitos estudiados en este trabajo constituyen paquetes de calizas con estructuras similares a HCS, que pertenecen al tramo superior de la Fm. Loriguilla, equivalente lateral a las calizas arrecifales de la Fm. Torrecilla. Las figuras 2 y 3 muestran el contexto sedimentológico detallado de estos depósitos. Las formaciones Torrecilla y Loriguilla representan sedimentos relativamente proximales a distales, respectivamente, depositados en la rampa carbonatada desarrollada en la Cuenca Ibérica, al noreste de la Placa Ibérica, que quedaba abierta hacia el Océano Tethys al este durante el Kimmeridgiense superior (biozona *Eudoxus*) (Fig. 2A, B). La Fm. Torrecilla corresponde a bioconstrucciones coralinas y microbianas, y sedimentos inter-arrecifales bioclásticos y oolíticos, con aportes siliciclásticos episódicos, depositados en zonas de rampa interna y media proximal. Estas facies pasan lateralmente hacia la zona de rampa media distal a los sedimentos fangosos carbonatados representados por el tramo superior de la Fm. Loriguilla (Fig. 2B, C). Las calizas y margas de esta unidad intercalan niveles granosostenidos arenoso y/o oolíticos de potencia milimétrica a decimétrica con estructuras sedimentarias debidas a flujos tractivos, como *ripples* y estratificación cruzada (ver *eventitas* en Fig. 2C). Estos depósitos representan la decantación de fangos y el aporte de sedimento siliciclástico y carbonatado somero (ooides, bioclastos), resedimentados por tormentas (Bádenas y Aurell, 2001; Bádenas *et al.*, 2005) en la zona distal del sector de rampa media, es decir entre el nbBT y el nbT. Algunos de los depósitos granosostenidos han sido interpretados más recientemente como depósitos de tormenta retrabajados por el impacto de olas internas (*internalitas*; Bádenas *et al.*, 2012).

En concreto, los depósitos estudiados en el afloramiento de referencia de *Ricla pueblo* se localizan en la parte media del tramo superior de la Fm. Loriguilla, a 21 m de su base, y 8 m por encima de los depósitos interpretados como *internalitas* (Figs. 2C y 3). Se sitúa en un intervalo de la unidad formado por calizas *mudstone* y margas, con bioturbación y escasos niveles intercalados de potencia milimétrica de areniscas de grano fino y medio

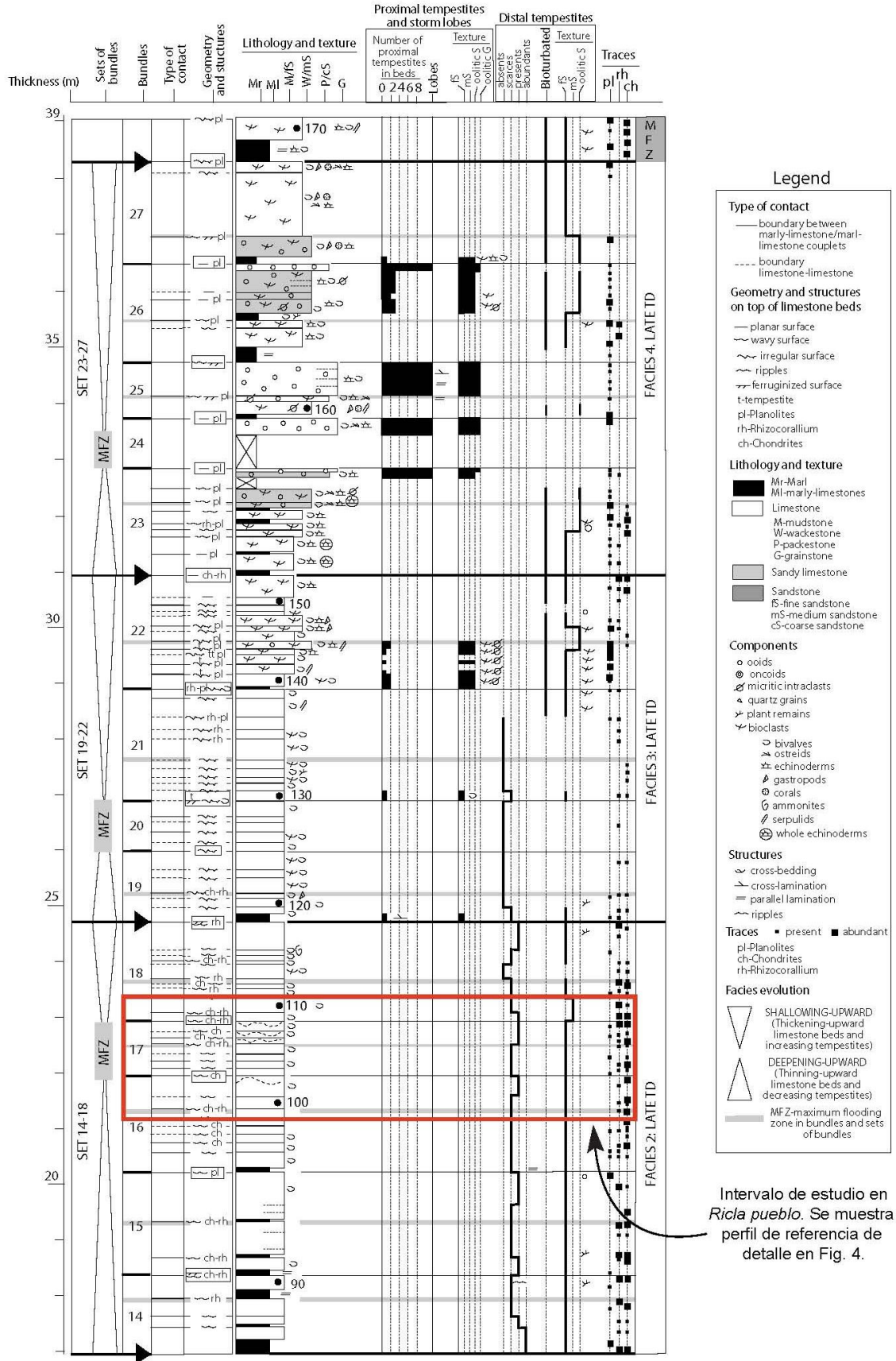
(Bádenas, 1999; Bádenas *et al.*, 2005). Según Bádenas *et al.* (2005) representarían el depósito de fangos y tempestitas distales durante una fase de ascenso relativo del nivel del mar (parte transgresiva de la secuencia de depósito Kimmeridgiense 2; ver intervalo T en secuencia Kim2 en Fig. 2B).

**Fig. 2.** A) Paleogeografía del noreste de la Placa Ibérica durante el Kimmeridgiense Superior. B) Principales facies y secuencias de depósito depositadas en la Cuenca Ibérica durante el Kimmeridgiense, según el transecto indicado en A. El recuadro indica el esquema de correlación de facies en los afloramientos de Ricla, mostrado en C. C) Correlación de facies en el afloramiento de Ricla durante el Kimmeridgiense Superior, desde zonas proximales al norte, con facies arrecifales (Fm. Torrecilla) hacia zonas distales, al sur, con facies de calizas fangosas y margas (Fm. Loriguilla "superior"). Se indica mediante el recuadro rojo la localización del perfil general que constituye la Fig. 3 (tomado de Bádenas *et al.*, 2012).



Los depósitos estudiados en el afloramiento *Ricla cementerio* se sitúan en posiciones relativamente más proximales respecto a los de *Ricla pueblo* (más al norte; Fig. 1B, C y Fig. 2A) y estratigráficamente a pocos metros del techo de las internalitas (Fig. 2C), si bien no se ha podido establecer su relación estratigráfica exacta por correlación física respecto a los de *Ricla pueblo*. Los depósitos caracterizados en *Ricla estación* se sitúan en una posición relativamente más distal respecto a los de *Ricla pueblo* (más al sur; Fig. 1B) también en la parte media del tramo superior de la Fm. Loriguilla, si bien debido a su inaccesibilidad no se ha podido situar su posición estratigráfica concreta.





**Fig. 3.** Columna de detalle de la parte media-superior de Fm. Loriguilla "superior" expuesta en el afloramiento de *Rícla pueblo* (ver localización en Fig. 2c). En rojo queda recuadrado el intervalo seleccionado para el presente estudio (tomado de Bádenas *et al.*, 2005).

## 6. DESCRIPCIÓN DE LOS DEPÓSITOS

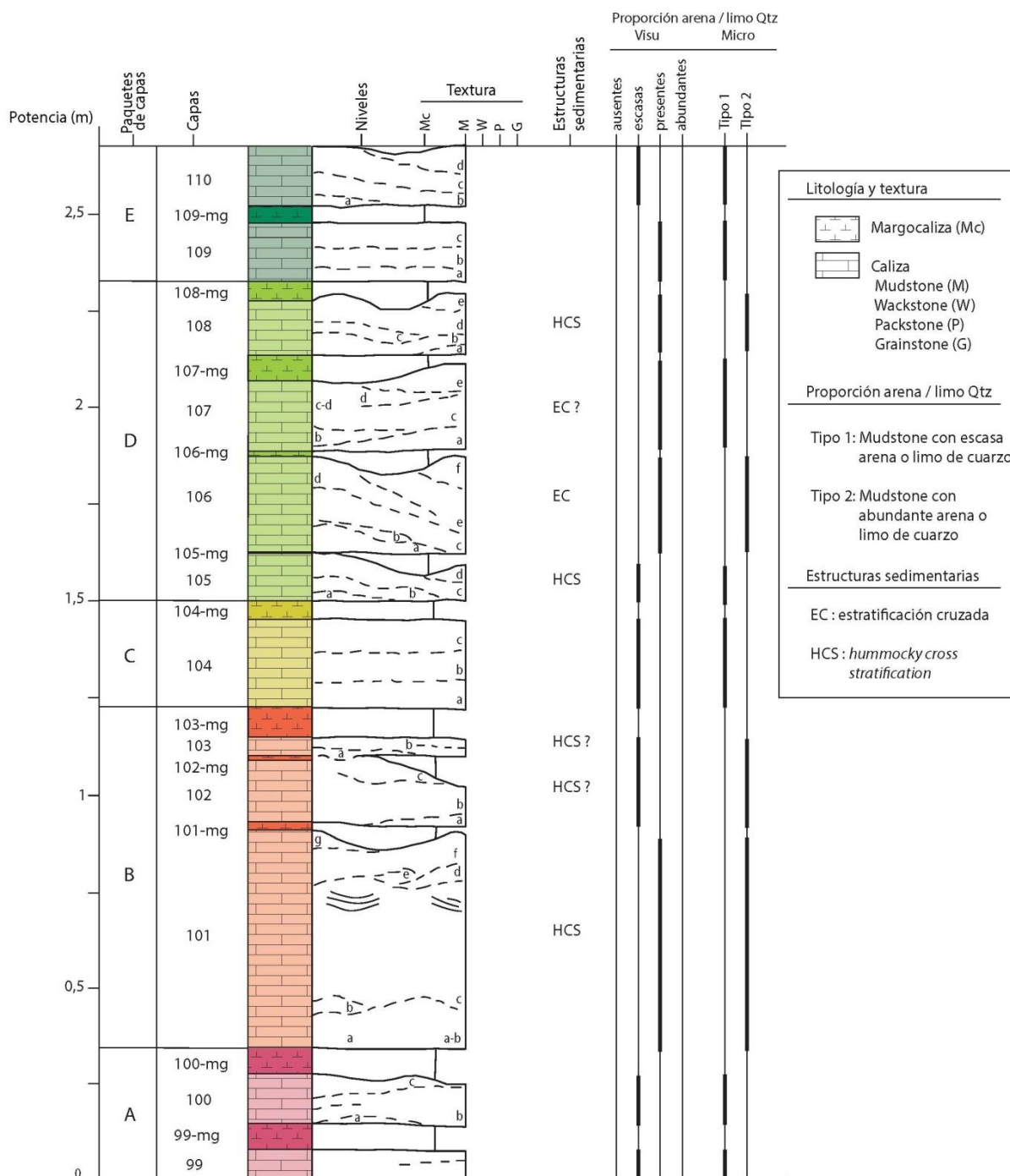
### 6.1. Afloramiento *Ricla pueblo*

El afloramiento *Ricla pueblo* constituye el afloramiento de referencia del presente estudio. Presenta una orientación norte-sur, es decir proximal-distal, y una extensión de aproximadamente 60 m, a lo largo de los cuales se pueden seguir físicamente las diferentes capas (Fig. 1D). Tanto hacia el norte como hacia el sur, estas aparecen cubiertas. El intervalo estudiado corresponde a capas de caliza de textura *mudstone* que contienen ocasionales niveles de arena de cuarzo de potencia milimétrica, con finas intercalaciones de margocalizas. La potencia total del mismo varía a lo largo del afloramiento entre los 2 y los 2,75 m de espesor. En este intervalo concreto, las capas de caliza presentan ondulaciones que se asemejan a HCS. Este intervalo fue reconocido anteriormente por Bádenas *et al.* (2005), por lo que se ha conservado la numeración que se le asignó en dicho trabajo a cada una de las capas. En concreto, el intervalo analizado comprende 12 capas de caliza, desde la capa número 99 hasta la 110 (Fig. 3). Las capas margocalcáreas, que suman un total de 11, se nombraron en función de la sigla correspondiente a la capa calcárea inmediatamente infrayacente, a la que se añadió la terminación “-mg” como factor diferenciador, por lo que comprenden desde la 99-mg hasta la 109-mg.

#### 6.1.1. Extensión y geometría de los depósitos

En función de la presencia o no de ondulaciones en las capas, similares a estructuras sedimentarias de tipo HCS, se ha dividido el intervalo estudiado en diferentes *paquetes de capas*, cuya distribución estratigráfica, geometría y extensión lateral se muestran en el perfil estratigráfico de detalle (Fig. 4) y los tres esquemas finales elaborados a partir de fotomosaicos parciales para todo el afloramiento (Anexo 1). Se han diferenciado 5 paquetes, denominados como *PA* a *PE*, de base a techo. Como se describe a continuación, los paquetes *PA*, *PC* y *PE* comprenden capas en las cuales la presencia de ondulaciones es nula o casi nula; en los paquetes *PB* y *PD*, se evidencia la presencia de estructuras similares a HCS o incluso estratificación cruzada de bajo ángulo (Fig. 4 y Anexo 1).

- El **paquete PA**, de 25 cm a 33 cm de potencia, está formado por cuatro capas, dos calcáreas y dos margocalcáreas (capas 99 a 100-mg). Las capas presentan una geometría bastante tabular, si bien muestran cierta variación lateral de espesor. Son continuas a lo largo del afloramiento, aunque en la parte media se encuentran cubiertas. En la capa 99, parece poder distinguirse una superficie de estratificación difusa hacia techo, que podría delimitar dos niveles dentro de la capa, pero su continuidad lateral en ningún caso supera unos pocos decímetros de longitud. La capa margocalcárea 99-mg muestra un incremento de espesor hacia el sector sur o distal, mientras que la capa 100 presenta un aumento progresivo hacia el norte. En detalle, esta capa puede subdividirse en 3 niveles (100a, 100b y 100c, de base a techo): el nivel 100a corresponde a lentículas plano-convexas independientes que aparecen y desaparecen a lo largo de toda la extensión del afloramiento; el nivel 100b es continuo a lo largo de todo el afloramiento; y el nivel 100c se acuña hacia techo, hacia la parte sur o distal del afloramiento. El techo de este nivel, presenta ondulaciones también hacia el sector sur. Por último, la capa 100-mg, es una capa continua que varía ligeramente de potencia hacia la zona distal amoldándose a las irregularidades del techo de la capa 100, sector en el que su espesor se ve reducido con respecto a la zona norte.

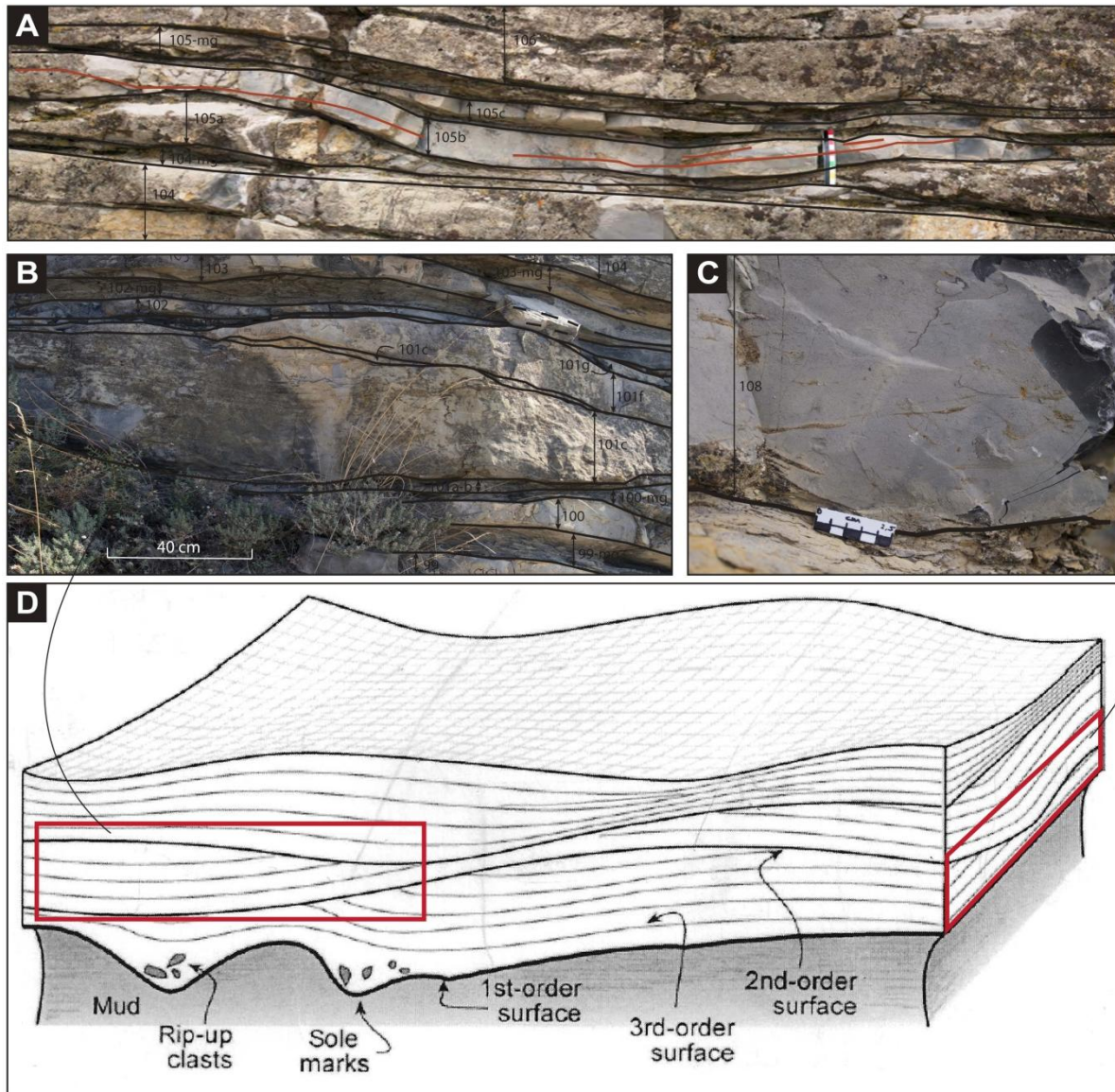


**Fig. 4.** Columna estratigráfica de detalle del intervalo de capas estudiado en el afloramiento de *Rícla pueblo*. La trama de colores asociada a la litología para las diferentes capas corresponde con la utilizada en los esquemas incluidos en el Anexo 1, para facilitar la identificación de las mismas.

- El **paquete PB**, de entre 47 cm y 76 cm de potencia, está compuesto por los niveles 101 a 103-mg, en el cual se incluyen 3 capas calcáreas y 3 margocalcáreas. La capa 101 destaca de entre todas las capas que componen el intervalo estudiado por su espesor. Su base es relativamente plana, y su techo ondulado, especialmente hacia la parte distal o sur del afloramiento. Dentro de la misma, se han reconocido 6 niveles (101a a 101g, de base a techo): los niveles 101a y 101b aparecen amalgamados en ciertos sectores a lo largo del afloramiento (nivel 101a-b) presentando además un aspecto lajoso; el nivel 101c, el más potente de la capa, es continuo y de base y techo muy irregulares, y hacia su techo presenta



láminas arenosas que alternan con láminas fangosas con morfología de surco que se acaban hacia techo del nivel (Fig. 5B); los niveles 101d y 101e son lentículas de escasa extensión lateral, que aparecen y desaparecen a lo largo del afloramiento; el nivel 101f es continuo y de base y techo ondulados; y el nivel 101g se presenta en forma de lentículas discontinuas de escasa extensión lateral y reducido espesor que aparecen a lo largo de todo el afloramiento asociadas normalmente con las zonas convexas del techo de la capa 101. La geometría de esta capa corresponde a estructuras de tipo HCS (Fig. 5B, D).



**Fig. 5.** A-C) Estructuras sedimentarias de tipo HCS reconocibles en el afloramiento de *Ricla pueblo* y D) su comparación con la estructura y superficies de diferente orden características de la HCS (tomado de Morsilli y Pomar, 2012). A) HCS reconocible en los niveles que conforman la capa 105. B) HCS reconocible en los niveles que conforman la capa 101 (nótese la morfología en surcos que definen las láminas arenosas y fangosas en el nivel 101c). C) HCS reconocible en la geometría de las láminas arenosas en la capa 108.

La capa 101-mg, varía en espesor a lo largo del afloramiento debido a las ondulaciones del techo de la capa 101. La capa 102 disminuye de espesor hacia la zona distal y tiene base y techo relativamente ondulados. Se compone de tres niveles (102a, 102b y 102c): los niveles 102a y 102c son lentículas de poca potencia y extensión lateral, entre las que se sitúa el nivel 102b, más potente, continuo y de base y techo irregulares. La capa

102-mg presenta variaciones del espesor debido a las ondulaciones del techo de la capa infrayacente 102 y reducción de espesor tanto hacia el sector proximal como hacia el distal. En cuanto a la capa 103, se trata de una capa tabular y de poco espesor, compuesta por dos niveles: el nivel 103a, formado por lentículas de poco espesor, y nivel 103b, continuo. Hacia el sector norte o proximal del afloramiento, las capas 102 y 103 se amalgaman, acuñándose de esta forma también la capa intermedia 102-mg. La última capa de este paquete, la capa 103-mg, es una capa tabular de espesor constante y superficies de base y techo relativamente plano-paralelas. La geometría ondulada de los niveles en las capas 102 y 103, delimitadas por niveles margocalcáreos continuos, podría indicar la presencia de HCS, aunque no de forma tan clara como en el caso de la capa 101.

- El **paquete PC**, de entre 18 cm y 30 cm de espesor, está comprendido por las capas 104 y 104-mg. La capa 104 es una capa muy continua de espesor constante en todo el afloramiento, que está dividida en tres niveles, 104a, 104b y 104c, continuos y de espesores muy similares. Sobre esta capa aparece la 104-mg, de geometría tabular y espesor constante en toda su extensión de afloramiento.

- El **paquete PD**, de entre 45 cm y 120 cm de potencia, está integrado por el conjunto de capas comprendido entre la capa 105 y la 108-mg. Todas ellas se caracterizan por presentar bases y techos irregulares ondulados. En la capa 105 se han identificado 4 niveles (105a a 105d; Fig. 4): el nivel 105a está formado por lentículas discontinuas a lo largo de todo el afloramiento; los niveles 105b y 105c son continuos y ondulados, que presentan terminación lateral en cuña hacia la zona sur o distal, y láminas arenosas con morfología sinusoidal con cierto ángulo de inclinación (105b; ver Fig. 5A); el nivel 105d tiene base ondulada adaptándose a la morfología del nivel infrayacente y techo más plano. La geometría de esta capa en su conjunto corresponde con geometrías características de HCS (Fig. 5A, D).

La capa margocalcárea 105-mg es continua y algo irregular ya que presenta una reducción de su espesor hacia la zona distal. La capa 106 destaca por las ondulaciones a techo de la misma, que se hacen más prominentes hacia la parte distal (sur). Está dividida en 6 niveles (106a a 106f): los niveles 106a y 106b son discontinuos y cuneiformes, ya que se acuñan hacia la base de la capa en la zona distal; el nivel 106c es continuo a lo largo del afloramiento, aunque pierde potencia hacia la parte distal; el 106d también muestra una pérdida progresiva de espesor hacia la parte distal hasta desaparecer dando una terminación lateral en cuña, de modo que el nivel suprayacente 106e llega a apoyarse directamente sobre el 106c; por último, los niveles 106e y 106f son niveles discontinuos que comienzan a distinguirse en la zona media del afloramiento, ganando espesor hacia la zona distal. La geometría en conjunto de los niveles de la capa 106 se correspondería con un set de estratificación cruzada de bajo ángulo, con sentido de inclinación hacia el sur (distal) y con ondulaciones a su techo (Fig. 6).

La capa 106-mg es continua y muy irregular con variaciones de potencia en toda su extensión, y espesor medio mayor en el sector distal. La capa 107 presenta 5 niveles ligeramente ondulados (niveles 107a a 107e): los niveles 107a y 107b presentan un espesor muy reducido, siendo el 107a continuo y el 107b discontinuo en forma de lentículas aisladas de mayor extensión lateral en la parte proximal (al norte); los niveles 107c y 107d están amalgamados en la zona más proximal (107c-d), siendo el nivel 107c discontinuo que se acuña hacia el distal, y el nivel 107d continuo. El nivel 107e, último nivel de la capa, es un nivel discontinuo que se presenta en forma de lentículas independientes a techo de la



misma. La geometría de los diferentes niveles de esta capa se asemeja a una estratificación cruzada de bajo ángulo con superficies onduladas, pero no tan clara como la presente en la capa 106. En el sector distal en cambio, se asemeja más a una HCS aunque de forma más local.



**Fig. 6.** Estratificación cruzada de bajo ángulo que conforman los niveles de la capa 106 del afloramiento de *Ricla pueblo*. Los niveles están inclinados hacia el sur (distal).

La capa 107-mg es una capa continua y de espesor constante. La capa 108 se adelgaza hacia el sector más distal del afloramiento, en el que se distinguen tres niveles, mientras que en el sector proximal se llegan a diferenciar hasta cinco (niveles 108a a 108e): el nivel 108a se presenta en forma de lentículas individualizadas en la base de la capa; el 108b es continuo y de base y techo ondulados; el nivel 108c es discontinuo, ya que en el sector proximal se acuña en relación con una prominente ondulación que presenta el techo del nivel infrayacente y hacia el distal mediante una progresiva pérdida de espesor; el nivel 108d es continuo y de base y techo irregulares; y el nivel 108e aparece en forma de pequeñas lentículas de 1 o 2 dm de extensión lateral que ocupan las concavidades del nivel infrayacente. Esta capa presenta una geometría que se corresponde con HCS, visible también por la geometría de las láminas arenosas internas (Fig. 5C). Por último, la capa que corona el paquete *PD* es la siglada como 108-mg y presenta variaciones de espesor en toda su extensión.

- El **paquete PE** comprende desde la capa 109 hasta la 110 y presenta una potencia total de entre 36 cm y 40 cm. Estas capas presentan espesores bastante constantes a lo largo del afloramiento y sin ondulaciones. La capa 109 está integrada por tres niveles (109a a 109c): el nivel 109a, que corresponde a lentículas discontinuas y los niveles continuos 109b y 109c. La capa margocalcárea 109-mg es tabular, de base y techo plano-parallel y potencia constante. Finalmente, la capa 110 consta de 4 niveles (110a al 110d): el nivel 110a está formado por lentículas discontinuas que terminan por desaparecer en la parte proximal; los niveles 110b y 110c son continuos y de espesor regular; y el nivel 110d, que comienza a aparecer a techo de la capa en la parte media del afloramiento y se extiende hasta la zona distal.

Como síntesis de la descripción de intervalo estudiado, se destacan las siguientes evidencias:

- Los paquetes *PA*, *PC* y *PE* presentan capas continuas de geometría más regular, subdivididas o no en escasos niveles. En el caso de que aparezcan niveles, estos, o presentan espesores constantes y superficies regulares y continuas en todo el afloramiento,

o bien presentan niveles discontinuos de poco espesor a base y/o techo de las capas, quedando mayoritariamente formadas por un nivel central más potente.

- Las capas calcáreas agrupadas en los paquetes *PB* y *PD* presentan claras morfologías semejantes a HCS y estratificación cruzada de bajo ángulo. Las capas con HCS visibles en ambos paquetes se caracterizan por tener bases y techos con superficies onduladas, en el interior de las cuales se diferencian tanto niveles discontinuos con geometrías lenticulares como continuos, que mayoritariamente presentan variaciones de espesor a lo largo de su extensión lateral. Las capas con estratificación cruzada de bajo ángulo en el *paquete PD* presentan niveles inclinados se van acuñando hacia la base de las capas hacia la parte distal del afloramiento (hacia el sur).

- Las ondulaciones que caracterizan a algunas de las capas comprendidas en el intervalo estudiado para este afloramiento, en general, se hacen más prominentes hacia el sector distal.

### 6.1.2. Fábrica y estructuras sedimentarias visibles en microfacies

El análisis petrográfico de lámina delgada de las calizas revela que estas se componen en su mayoría por micrita que presenta una coloración oscura, marrón-negrucza. También aparecen según la muestra, en mayor o menor grado de abundancia, diferentes láminas milimétricas de extraclastos de cuarzo alotriomorfos de tamaño arena, con un grado de redondez bajo y un grado de esfericidad medio a bajo. Ocasionalmente se reconocen fragmentos de bivalvos y de equinodermos. Se trata de una roca matriz-soportada que presenta un porcentaje de granos inferior al 10% de la roca total, por lo que según la clasificación de Dunham (1962) se trata de una caliza *mudstone*. Las diferentes láminas arenosas quedan en ocasiones truncadas por bioturbación, que corresponden a galerías subsféricas en sección de hasta 5 mm de diámetro rellenas por micrita de un tono ligeramente más claro en las que suelen concentrarse extraclastos de cuarzo. Estas trazas fósiles se han identificado en su mayoría como *Chondrites*. Bádenas *et al.*, (2005) describen también ocasionales trazas de *Rhizocorallium* y *Planolites*.

Las muestras analizadas se han clasificado en función de dos parámetros: la proporción de láminas arenosas y la geometría y disposición de los granos en dichas láminas.

En función de la proporción de láminas arenosas se han reconocido dos tipos de calizas *mudstone*:

- *Mudstone de tipo 1*: con escasa láminas (< 15 láminas por muestra; Fig. 7A, B, C).
- *Mudstone de tipo 2*: con abundantes láminas (> 15 láminas por muestra; Fig. 7D).

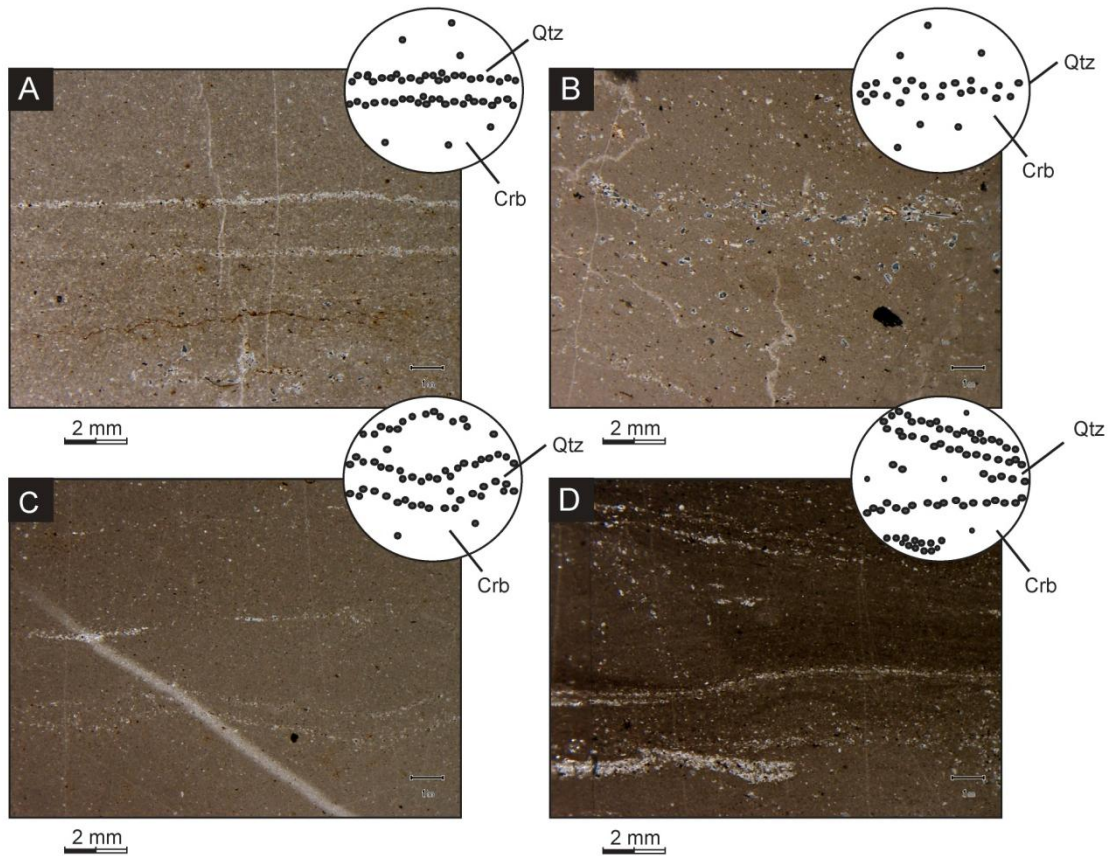
En función de la geometría de las láminas y la distribución de los granos que las conforman, se han diferenciado 4 tipos de laminaciones:

- *Laminación de tipo 1*: láminas plano-paralelas de granos de cuarzo granosostenidos y granodecrecientes (Fig. 7A).

- *Laminación de tipo 2*: láminas onduladas de granos de cuarzo granosostenidos y granodecrecientes. Se trata de estructuras de tipo *hummocky* de escala microscópica. En algunos casos las ondulaciones están en fase (Fig. 7C).

- *Laminación de tipo 3*: hiladas de granos de cuarzo no granosostenidos dispuestas aleatoriamente sin granoselección (Fig. 7B).

- *Laminación de tipo 4*: láminas de granos de cuarzo granosostenidos y granodecrecientes, que presentan cierto grado de inclinación, conformando laminación cruzada (Fig. 7D). Es interesante notar que entre las láminas arenosas se reconocen láminas fangosas también inclinadas.



**Fig. 7.** Tipos de calizas mudstone en función de la proporción de láminas arenosas y del tipo de laminación observables en lámina delgada (en todas las imágenes están tomadas con nicoles paralelos). A) *Mudstone de tipo 1 con laminación de tipo 1, plano-paralela.* B) *Mudstone de tipo 1 con laminación de tipo 3 (hiladas).* C) *Mudstone de tipo 1 con laminación de tipo 2 (ondulada).* D) *Mudstone de tipo 2 con laminación de tipo 4 (cruzada).*

Tras exponer las diferentes observaciones realizadas en el conjunto de las láminas delgadas, se procede a especificar qué aspectos caracterizan a cada una de ellas y por tanto a cada una de las capas estudiadas a las que corresponden (Fig. 4):

- En el *paquete PA* (capas 99 a 100-mg), las muestras de las capas 99 y 100, corresponden a *mudstone de Tipo 1*. El tamaño medio de los granos de cuarzo es de 200  $\mu\text{m}$ . Se identifica *laminación de tipo 1* (plano-paralela), 3 (hiladas) y 4 (cruzada).

- En el *paquete PB* (capas 101 a 103-mg), las muestras de las capas 101, 102 y 103 corresponden a *mudstones de Tipo 2* con abundantes láminas. El tamaño de los granos de cuarzo también destaca por ser mayor (máximo de 1 mm en la muestra 102, y medio de aproximadamente 220  $\mu\text{m}$ ). Se identifica *laminación de tipo 2* (ondulada) y 4 (cruzada). En algún caso también se observa la *laminación de tipo 3* (hiladas), aunque de forma muy local.

- En el *paquete PC* (capas 104 y 104-mg) y en la primera capa del *paquete PD* (capa 105), las muestras de las capas 104 y 105 muestran una disminución considerable de la proporción de partículas de arena y de laminaciones. Se trata por tanto de *mudstones de tipo 1*. El tamaño medio de los granos de cuarzo es de 200  $\mu\text{m}$ . Se identifican *laminación de tipo 1* (plano-paralela) y 2 (ondulada).

- En las restantes capas del *paquete PD* (capas 106 a 108) se da de nuevo un incremento del número de láminas y del tamaño de los granos de cuarzo, especialmente en las capas 106 y 108, que corresponden a *mudstones de tipo 2*, con granos de diámetro medio de 250  $\mu\text{m}$  y máximo 350  $\mu\text{m}$  con *laminación de tipo 2* (ondulada), 3 (hiladas) y 4 (cruzada). No obstante, la muestra de la capa 107 corresponde a un *mudstone de tipo 1*, con *laminación de tipo 1* (plano-paralela) y granos de cuarzo de diámetro medio más pequeño, de 200  $\mu\text{m}$ .

- En el *paquete PE* (capas 109 a 110), las muestras corresponden a *mudstones de tipo 1* con pocas laminaciones y partículas de arena de cuarzo de menor tamaño medio (150  $\mu\text{m}$ ). Se pueden observar *laminación de tipo 1* (plano-paralela) y 2 (ondulada) de forma muy localizada.

Así pues, parece existir una correlación entre las características de las capas de caliza en cuanto a su geometría y estructuras sedimentarias visibles en afloramiento, y sus rasgos en microfacies, especialmente en lo que se refiere a la proporción de láminas arenosas:

- Los paquetes de capas *PA*, *PC* y *PE*, con capas y niveles de geometría más regular, corresponden en todos los casos a *mudstones de tipo 1* con escasas láminas arenosas, que presentan *laminación de tipo 1* (plano-paralela), 2 (ondulada), 3 (hiladas) y 4 (cruzada).

- En los paquetes de capas *PB* y *PD*, con capas y niveles con geometría irregular y con HCS y estratificación cruzada de bajo ángulo, las calizas son en su mayoría *mudstones de tipo 2* con abundantes láminas de granos de cuarzo, en las que predominan la *laminación de tipo 2* (ondulada) y 4 (cruzada).

## **6.2. Afloramientos *Ricla estación* y *Ricla cementerio***

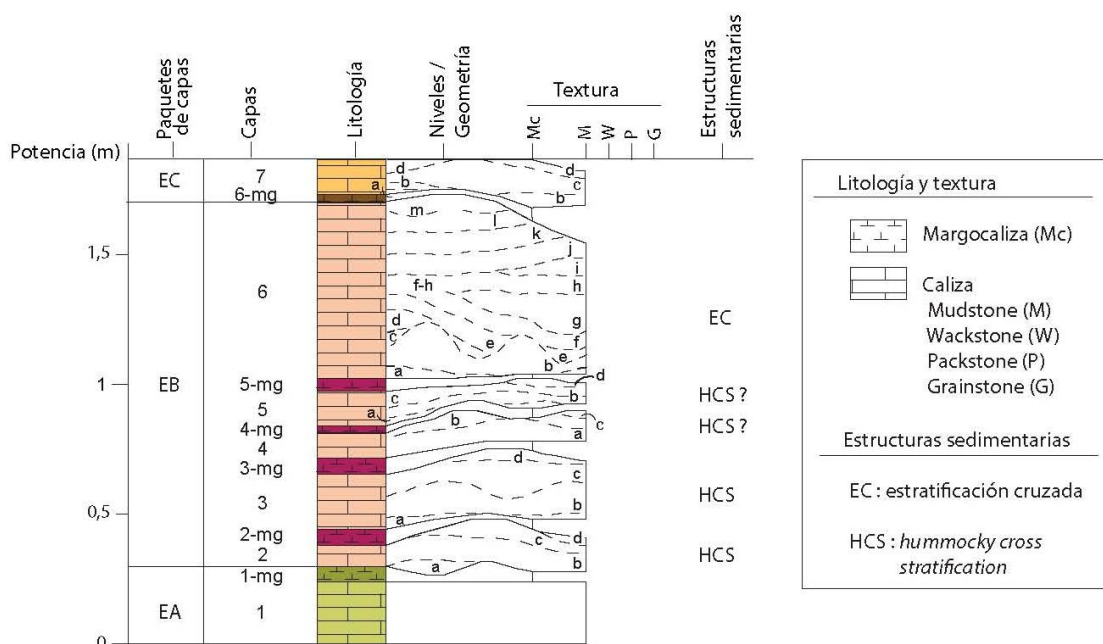
Como se ha comentado en los apartados 4 y 5, los depósitos estudiados en los afloramientos de *Ricla estación* y *Ricla cementerio* son relativamente distales y proximales, respectivamente a *Ricla pueblo*. Los caracterizados en *Ricla cementerio* se sitúan estratigráficamente por debajo de los de *Ricla pueblo*. En el caso de los de *Ricla estación* no existen criterios de correlación física que apoyen o descarten su equivalencia estratigráfica. Estos no han podido ser estudiados al mismo nivel de detalle que el afloramiento de *Ricla pueblo* debido a la inaccesibilidad de los mismos o a la limitada continuidad lateral del afloramiento.

### **6.2.1. *Ricla estación***

En este afloramiento se ha identificado un intervalo de casi 2 m de potencia que incluye capas calcáreas con estructuras sedimentarias de tipo HCS. Este intervalo comprende 7 capas calcáreas (capas 1 a 7, de base a techo), y 6 capas margocalcáreas (capas 1-mg a 6-mg). Siguiendo los mismos criterios que en el afloramiento de *Ricla pueblo*, estas capas se han agrupado en 3 paquetes (*EA*, *EB* y *EC*), cuyas características se muestran en el esquema basado en el fotomosaico de este afloramiento (Anexo 2) y en el perfil estratigráfico de la Fig. 8. Los paquetes *EA* y *EC* incluyen capas relativamente plano-paralelas y con niveles continuos, mientras que en el paquete central *EB*, se identifican capas con la presencia de ondulaciones similares a HCS. A continuación se describen las características principales de estos paquetes.

- El **paquete EA**, de 26 cm de espesor medio, comprende la capa de caliza 1 y de margocaliza 1-mg. La capa 1 tiene base relativamente plana y techo ligeramente ondulado y es continua en todo el afloramiento, y en ella no se diferencian niveles. La capa 1-mg es continua pero presenta variaciones de espesor debido a las irregularidades de las capas infra- y suprayacentes.

- El **paquete EB**, integra 4 capas calcáreas (2 a 6) y 4 margocalcáreas (2-mg a 5-mg), y presenta un espesor de 140 cm. La capa 2 es continua y de base y techo ondulados y está formada por 4 niveles (2a a 2d, de base a techo): el nivel 2a es un nivel lenticular plano-convexo que se observa únicamente en la zona norte del afloramiento; el nivel 2b es continuo, pero de base y techo ondulados; y los niveles 2c y 2d presentan su espesor máximo en el sur del afloramiento y progresivamente se acúan hacia el norte. En conjunto, la disposición de los diferentes niveles correspondería a HCS.



**Fig. 8.** Columna estratigráfica de detalle obtenida a partir de fotomosaico del intervalo de capas estudiado en el afloramiento de Ricla estación. La trama de colores asociada a la litología para las diferentes capas corresponde con la utilizada en el esquema que se muestra en el Anexo 2, para facilitar la identificación de las mismas.

La capa 2-mg suprayacente es continua y de mayor espesor en las zonas cóncavas del techo la capa inferior. La capa 3, continua y de superficies de estratificación onduladas, está subdividida en 4 niveles (3a a 3d): el nivel 3a corresponde a dos lenticulas aisladas entre sí de poco espesor; los niveles 3b y 3c son continuos, más potentes y con base y techo ondulados; y el nivel 3d son lenticulas que se acúan hacia techo de la capa. La geometría de esta capa corresponde con HCS.

Dispuesta sobre la capa 3, aparece la capa margocalcárea 3-mg que presenta un espesor más reducido en la parte media del afloramiento. La capa 4 tiene base relativamente plana y techo ondulado y está formada por tres niveles (4a a 4c): el nivel 4a ocupa la casi totalidad de la capa y presenta ondulaciones a techo; y los niveles 4b y 4c son lenticulas situadas preferentemente en las concavidades a techo del nivel 4a. Esta capa presenta geometría similar a HCS, pero no tan clara como las capas anteriores.

Sobre este último, aparece el nivel 4-mg, continuo y de reducido espesor. La capa calcárea 5 es continua de base y techo irregulares y espesor reducido, dividida en cuatro



niveles separados por superficies de estratificación muy irregulares (5a a 5d): los niveles intermedios 5b y 5c son continuos mientras que los niveles 5a y 5d, inferior y superior respectivamente, son lenticulas desconectadas. Al igual que la capa 4, esta capa podría corresponder con HCS, aunque no de forma clara.

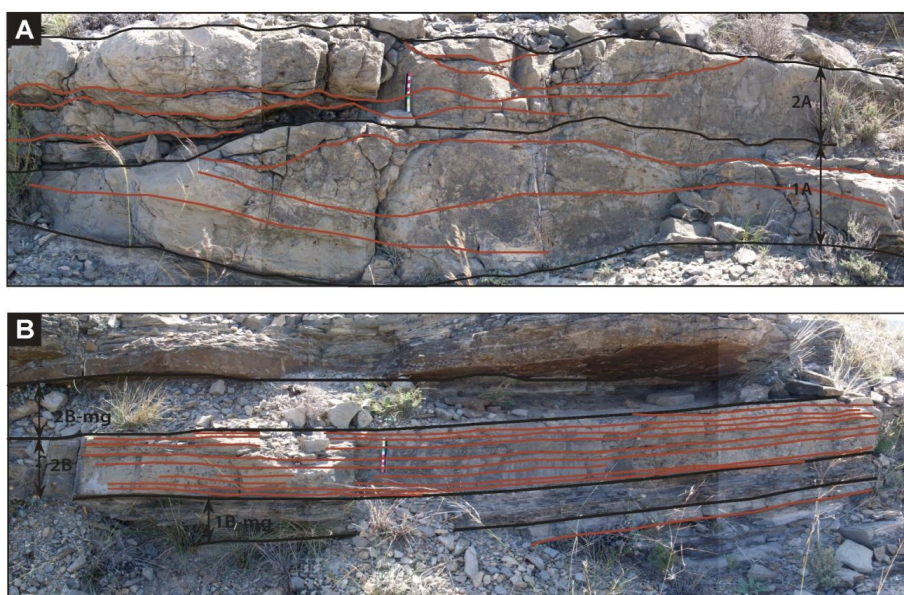
El nivel 5-mg es continuo, aunque presenta variaciones de espesor. La capa 6 es la más potente del intervalo estudiado y está formada por 13 niveles (6a a 6m, de base a techo): el nivel 6a son lenticulas discontinuas y de muy escaso espesor ausentes en la zona central del afloramiento; el nivel 6b es ondulado y con variaciones de espesor notables; los niveles 6c a 6f presentan inclinación de bajo ángulo hacia el sur y acuñaamiento hacia este sector, definiendo un set estratificación cruzada de bajo ángulo; los niveles 6g a 6i son niveles discontinuos que recubren el set de estratificación cruzada en el sector sur; los niveles 6j a 6l son continuos en todo el afloramiento, aunque siguen presentando variaciones de espesor; finalmente, aparece el nivel 6m discontinuo y lenticular.

- El último **paquete EC**, de 12 cm de potencia, está integrado por las capas 6-mg y 7 que son continuas y de base y techo más regulares que las anteriores. La capa calcárea 7, está integrada por cuatro niveles (7a a 7d): los niveles discontinuos lenticulares 7a y 7b; el nivel continuo 7c, de base y techo algo ondulados y fluctuaciones en su espesor hacia la parte sur; y el nivel 7d que se presenta en forma de lenticulas que se acuñan hacia techo de la capa.

En resumen, en estos depósitos se diferencia un paquete de capas (*paquete EB*), con geometrías similares a los presentes en *Ricla pueblo*, incluyendo HCS y estratificación cruzada de bajo ángulo, delimitado por los paquetes *EA* y *EC*, con capas y niveles más continuos y plano-parallelos.

### 6.2.2. Ricla cementerio

Para este afloramiento se han seleccionado dos zonas concretas en las cuales se han reconocido estructuras sedimentarias en las calizas *mudstone*, similares a las presentes en los afloramientos de *Ricla pueblo* y *Ricla estación*. Se han estudiado en fotomosaico la disposición y geometría de las capas y niveles que aparecen en estas zonas (Fig. 9).



**Fig. 9.** Fotomosaicos del afloramiento de *Ricla cementerio*. A) Estructura sedimentaria de tipo HCS visibles en las capas 2A y 2B. B) Estratificación cruzada de bajo ángulo visible en la capa calcárea 2B.

- En el primer depósito (Fig. 9A), se observan dos capas de base y techo ondulado (capas 1A y 2A), formadas ambas por niveles que se acuñan lateralmente y que presentan superficies limitantes onduladas. Estas son similares a los niveles con ondulaciones de tipo HCS visibles en *Ricla pueblo* y *Ricla estación*.

- El segundo depósito (Fig. 9B) corresponde a una capa calcárea (capa 2B) de textura *mudstone* que incluye un gran número de láminas de arena. Tanto las láminas arenosas como las láminas micríticas están inclinadas respecto a las superficies de base y techo de la capa, unos 2 grados aproximadamente, hacia la derecha de la imagen, es decir hacia el sector distal. Por lo tanto, se trataría de una estratificación cruzada de bajo ángulo, similar a la presente en *Ricla pueblo* y *Ricla estación*.

## 7. INTERPRETACIÓN Y DISCUSIÓN:

El estudio sedimentológico realizado en el presente trabajo ha puesto de manifiesto la existencia de estructuras tractivas, en concreto de HCS y estratificación cruzada de bajo ángulo en las calizas fangosas de textura *mudstone* de la parte superior de la Fm. Loriguilla, que tienen potencia decimétrica y una extensión de al menos 60 m (registrada en el afloramiento de *Ricla pueblo*). La interpretación del origen de estos depósitos implica, por lo tanto, abordar dos aspectos: por un lado, el origen y la naturaleza de los fangos carbonatados en el momento del desarrollo de la estructuras tractivas descritas; y por otro, los procesos que originaron dichas estructuras.

### 7.1. Origen y naturaleza de los fangos carbonatados

Según estudios previos de diversos autores (Aurell *et al.*, 1998; Bádenas y Aurell, 2001), el origen del fango carbonatado acumulado en las zonas distales de la rampa media y en la zona externa de la rampa kimmeridgiense en la Cuenca Ibérica podría atribuirse a: 1) producción bentónica de carbonato, aunque la pequeña proporción de granos esqueléticos presentes en estas facies, también observada para el caso de los depósitos estudiados, indicaría una baja tasa de este tipo de producción; 2) producción pelágica (fundamentalmente cocolitos), si bien los estudios en microscopio electrónico revelan la escasez de restos de estos organismos (Bádenas, 1999), por lo que al menos en la zona distal de la rampa media, la tasa de este tipo de producción sería baja; y 3) de origen somero y resedimentado hacia zonas distales, que es el factor más invocado. En este caso, el fango se originaría en zonas poco profundas (rampa interna a media proximal, con facies arrecifales y oolíticas: ver Fig. 2) en las que la tasa de producción de carbonato de origen bentónico era mayor. Este fango sería transportado por corrientes de densidad generadas por los flujos de resaca de las tormentas. Además de partículas carbonatadas, estas corrientes transportarían las partículas de naturaleza siliciclástica, granos de cuarzo de tamaño arena, como las observadas en los depósitos estudiados, fundamentalmente desde áreas fuente situadas paleogeográficamente al norte (Bádenas *et al.*, 2005).

El tamaño de partícula de los fangos no permitiría la formación de las estructuras tractivas observadas (HCS y estratificación cruzada de bajo ángulo) en condiciones normales, ya que la remoción del mismo pondría estas partículas en suspensión para posteriormente depositarse dando una lámina horizontal. Para que se generaran estas estructuras, necesariamente los fangos debieron estar floculados, proceso por el que las partículas de fango se aglutinan. Debido a la floculación del fango, las partículas carbonatadas habrían alcanzado tamaños de grano de mayor entidad y funcionado como

granos de tamaño arena o limo pudiéndose producir de esta forma las estructuras mencionadas. La floculación de fangos es un proceso bien descrito en ambientes estuarinos (e.g., Arche, 2010) y ha sido demostrada en experimentos de laboratorio por Schieber *et al.* (2007), para distintas concentraciones de sedimento y distinto grado de salinidad, lo que demuestra que es un proceso universal para múltiples ambientes de depósito. En dicho trabajo se demuestra también de forma experimental la génesis de *ripples* y laminación cruzada en los fangos. En el caso de los depósitos estudiados en el presente trabajo, además de las estructuras tractivas visibles en campo (HCS y estratificación cruzada planar), también se ha observado tanto a escala de campo como a escala de microscopio evidencias que apuntan a que los fangos debieron tener un comportamiento hidrodinámico similar a granos de limo o arena, es decir, que debieron estar floculados, como es la existencia de láminas micríticas inclinadas junto con las láminas arenosas en los surcos descritos en el nivel 101c del afloramiento *Ricla pueblo*, en la capa 2B con estratificación cruzada de bajo ángulo del afloramiento *Ricla cementerio* y en la laminación de tipo 2 y 4.

Si bien la floculación de fangos puede darse para distintas concentraciones de sedimento y distinto grado de salinidad (Schieber *et al.*, 2007), en el caso estudiado, el proceso de floculación podría estar inducido por cambios de salinidad, asociados al aporte de aguas dulces desde las desembocaduras de los ríos que acarrearían los granos de cuarzo de tamaño arena. Esta hipótesis viene apoyada por el hecho de que los paquetes de capas con HCS y estratificación cruzada de bajo ángulo corresponden a *mudstones de tipo 2* con abundantes láminas de granos de cuarzo, y de mayor tamaño, respecto a aquellas capas que no muestran estructuras tractivas.

## **7.2. Origen de la estructuras tractivas (HCS y estratificación cruzada de bajo ángulo)**

Las estructuras de tipo HCS fueron definidas como una “laminación de *ripples* de oscilación truncados” por Campbell (1966). Como tal, se describieron posteriormente por Harms *et al.* (1975). Se diferencian dos tipos. La HCS isótropa (ver Fig. 5D y Fig. 11A) consistente en una laminación de bajo ángulo y geometría curva a ondulada que presenta áreas cóncavas (*swales*) y convexas (*hummocks*), comúnmente integrada por granos de tamaño arena fina a limo, que se disponen sobre una base erosiva. Las láminas se adelgazan en los *hummocks* y se engrosan en los *swales* dando espesores que varían de unos pocos centímetros hasta 1,5 m de espesor, y son isótropas en las tres dimensiones. Por otro lado, la HCS anisótropa está integrada por sets de estratificación cruzada de bajo ángulo que presentan una dirección de inclinación preferente unimodal (ver Fig. 6 y Fig. 11A). Teniendo en cuenta estas definiciones, la HCS caracterizada en los tres afloramientos considerados podría tratarse más concretamente de una HCS isótropa, y en cuanto a la estratificación cruzada de bajo ángulo, podría corresponder con una HCS de tipo anisótropa a mayor escala, con dirección de inclinación preferente hacia el sur, hacia la zona distal.

En cuanto a las condiciones hidrodinámicas que se requieren para el depósito de estas estructuras, se propuso que su formación podría deberse a olas más allá de la zona de oleaje de buen tiempo enfatizando la necesidad de un primer proceso de transporte que haga llegar la arena a la zona de *offshore*. Este proceso se caracteriza por la predominancia de partículas en suspensión que al disminuir la energía de la corriente que las transporta se decantan, viéndose de esta forma afectadas por intensos flujos



oscilatorios que moldean las capas dando lugar a *hummocks* y *swales*. Es decir, en su origen predomina la oscilación (ver *ripples hummocky* en Fig. 11B) En cambio, la HCS anisótropa se concibe como el producto de la acción combinada de un flujo oscilatorio y de componente unidireccional efectiva que causa la migración de las formas del lecho (Morsilli y Pomar, 2012), usualmente cuando la componente unidireccional es todavía débil (ver *dunas 3D de bajo ángulo* en Fig. 11B), ya que si esta aumentara se generaría estratificación cruzada de alto ángulo (ver *dunas 3D de alto ángulo* en Fig. 11B).

Desde su definición, parece haber consenso en cuanto a que la HCS es una estructura diagnóstica de la zona de transición *shoreface-offshore* y que comúnmente se utiliza como criterio para reconocer eventos de tormentas, siendo estas características de la secuencia típica de las tempestades. Sin embargo, estas estructuras también se han reconocido en otros ambientes deposicionales, desde lacustres hasta sucesiones marinas profundas, al margen de su edad o composición litológica de los sedimentos. En relación con los procesos que dan lugar a la HCS y en el contexto sedimentológico en el que se ubica este estudio, además de las tormentas, las olas internas o los tsunamis constituyen mecanismos alternativos que podrían explicar su origen.

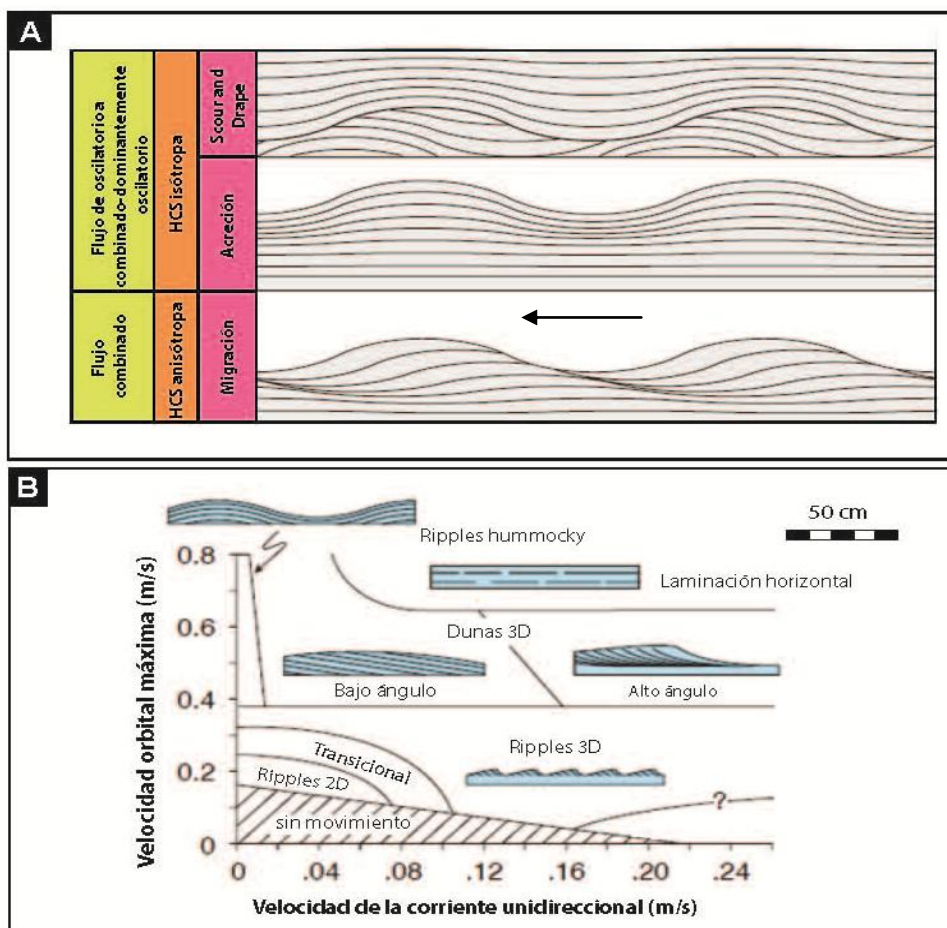


Fig. 11. A) Tipos de HCS. B) Figura esquemática que muestra los tipos de estructuras sedimentarias y su estratificación interna producidas por la acción de flujos combinados con una componente oscilatoria en función de la predominancia de uno y otro tipo de flujo (tomadas de Duke *et al.*, 1991).

- Durante las **tormentas**, el nivel de base de oleaje de tormenta (nbT) se sitúa a una mayor profundidad que el nbBT. La fricción del viento y la baja presión atmosférica producen la elevación del nivel marino en las zonas costeras y las olas en la superficie

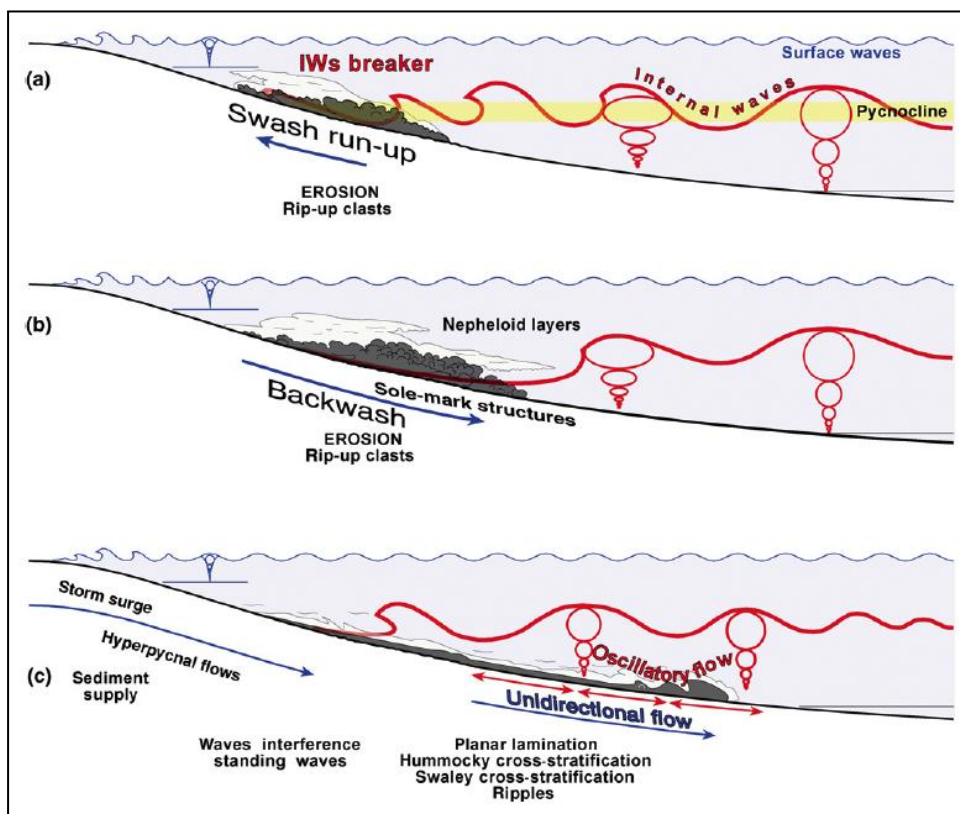
marina se propagan en la columna de agua desde el nbT hasta la zona de *foreshore*. Tras la relajación de la tormenta, se generan corrientes de resaca mar adentro que transportan sedimento de las zonas costeras hasta la zona de *offshore* generando una corriente densa que se mueve pendiente abajo por la acción de la gravedad transportando el sedimento hacia ambientes más profundos, incluso por debajo del nbT. Por encima del nbT, los sedimentos pueden ser retrabajados por las olas de tormenta originando HCS.

- Un **tsunami**, son grandes olas, que se forman a partir de cualquier perturbación de la columna de agua. Estas perturbaciones se pueden ver desencadenadas debidas a terremotos, erupciones volcánicas o grandes deslizamientos de tierra submarinos en el primero de los casos, o impactos meteoríticos y grandes deslizamientos de tierra costeros en el segundo. El movimiento orbital de las partículas de agua durante el paso de una ola de tsunami presenta una componente vertical mayor en la superficie del agua y que disminuye hasta cero con la profundidad. La amplitud máxima de las olas se da en zonas costeras más restringidas y cuando llegan a la costa inundando el continente. Las zonas en las que pueden observarse los efectos de la sedimentación debido al paso de un tsunami son especialmente las zonas costeras, donde sí que se han descrito estructuras HCS originadas por estas olas (Dawson y Stewart, 2007). En las zonas distales de *offshore*, los depósitos registrados se deben a corrientes de turbidez, y queda por resolver si los depósitos producidos por los flujos de resaca de estas olas mar adentro pueden ser semejantes a los depósitos originados durante la inundación en la zona costera, incluyendo la generación de HCS (Dawson y Stewart, 2007).

- Las **olas internas** son olas que se propagan a través de la pycnoclina, la interfase entre dos fluidos de diferente densidad que se da en océanos y lagos. Se trata de olas tan comunes o incluso más que las olas superficiales y varían en gran medida en cuanto a su magnitud, periodicidad, velocidad y profundidad. Se generan debido a perturbaciones en el equilibrio hidrostático, que pueden venir dadas por tormentas, fluctuaciones de la intensidad del viento, la interacción de las mareas con la topografía, tsunamis o flujos turbidíficos, además de otra serie de procesos que a día de hoy están escasamente documentados. Estas olas internas desplazan volúmenes de agua generando fuertes corrientes tanto en sentido ascendente como descendente, y turbulentas. Las que se propagan a lo largo de pycnoclinas de aguas poco profundas mayoritariamente se disipan en las regiones de plataforma continental. El impacto de las mismas es especialmente acusado en la zona de plataforma media, donde rompen de forma similar a las olas superficiales. La rotura de estas olas en la intersección entre la pycnoclina y la superficie del sustrato, provoca la generación eventos episódicos altamente turbulentos que remobilizan el sedimento del fondo en este tramo de la plataforma (Pomar *et al.*, 2012).

A escala de afloramiento, en *Ricla pueblo* (único afloramiento de entre los considerados con la extensión suficiente para poder apreciarse) se ha observado como el proceso generador de estos depósitos se atenuaba desde las zonas distales hacia zonas más someras. Esta afirmación se deduce de que en el afloramiento, en las capas en las que se han descrito HCS, se aprecian *hummocks* y *swales* más prominentes en el sector distal, para disminuir su amplitud hacia el proximal. En afloramientos más septentrionales con respecto a los considerados para este estudio, en concreto en el afloramiento cercano a las vías del tren AVE, el cual corta los afloramientos, las capas que afloran

presentan geometrías tabulares sin ondulaciones o evidencias de estructuras sedimentarias semejantes a HCS que indiquen el retrabajamiento de los sedimentos por la acción de flujos combinados (Bádenas, 1999). Debido a este hecho, se puede deducir que el proceso que modeló los sedimentos carbonatados se atenúa hasta desaparecer en la zona de rampa media, sin llegar a afectar a sedimentos más someros. Por ello, quedan descartadas las hipótesis de que los procesos generadores de las estructuras HCS descritas fueran episodios de tormenta o tsunamis, debido a que estos se caracterizan por oleaje superficial, es decir, en la interfase aire-agua, cuyos trenes de ondas se desarrollarían hasta la línea de costa por lo que en el caso de que cualquiera de ellos fuera el causante del modelado del lecho sedimentario, estas estructuras deberían poder identificarse hasta los ambientes costeros. Por lo tanto, se deduce que el único proceso capaz de generar los depósitos registrados son las olas internas.



**Fig. 12.** Procesos y productos asociados a la batida de las olas internas en sus etapas de *swash run-up* y *backwash*. Las estructuras HCS se generarían en la zona distal a la de rompiente, donde se combinan el flujos unidireccionales de *backwash* y el oscilatorio, (tomado de Morsilli y Pomar, 2012).

Morsilli y Pomar (2012) postulan que tras la ruptura de las olas internas, se produce un flujo de resaca (ver *backwash* en Fig. 12) que puede desplazarse pendiente abajo por la rampa largas distancias arrastrando partículas y erosionando el fondo. Esta corriente unidireccional combinada con el flujo oscilatorio dado por las olas internas transmitidas en la pycnoclina, serían los responsables del modelado del lecho dando la HCS en la zona distal a la de rompiente de las olas internas, que sería el caso de los depósitos estudiados en el presente trabajo.

El origen de la pycnoclina y de las olas internas que en ella se generaron en la rampa carbonatada en la que se enmarcan los depósitos estudiados podría deberse a dos factores condicionantes. Es posible que la estratificación de la masa de agua se viera influenciada por periodos estacionales de incremento en la descarga fluvial (aguas de

menor salinidad) procedente de las áreas emergidas de los Macizos Ibérico y del Ebro, acompañada de un incremento en el aporte detrítico; y 2) tormentas actuarían como agente en la resedimentación del material detrítico y del fango carbonatado desde las zonas someras, así como posible agente generador de las perturbaciones en la pycnoclina, es decir de las olas internas (Bádenas *et al.*, 2012). La mayor proporción de granos detríticos en los depósitos con HCS estudiados es coherente con esta hipótesis.

## 8. CONCLUSIONS

- Distal mid ramp facies of the Kimmeridgian ramp exposed in Ricla, show some beds with tractive structures (isotropic and anisotropic HCS) developed on lime mud deposits that contain a variable percentage of detrital content.

- Lime mud was resedimented from shallow water production areas by storm-induced flows, along with the quartz grains linked to riverine input coming from Iberian and Ebro Massifs. The lime mud was flocculated at the moment of deposition, so acting like grains of bigger size. Flocculation could be induced by salinity changes related with periods of higher riverine input, as indicates the high siliciclastic content in beds with HCS.

- HCS was formed by combined unidirectional and oscillatory flows and could be related with storms, tsunamis or internal waves. The lateral extension of beds with HCS evidence the attenuation of the flow toward the proximal zones of the mid ramp, so that; their origin had to be related to internal-waves, but not with storms or tsunamis. HCS probably formed in distal areas of the breaker zone of the internal waves.

- Internal waves were propagated along a pycnocline that probably was induced by different salinity content related with the riverine inputs. Perturbations at the pycnocline were probably excited by storms.

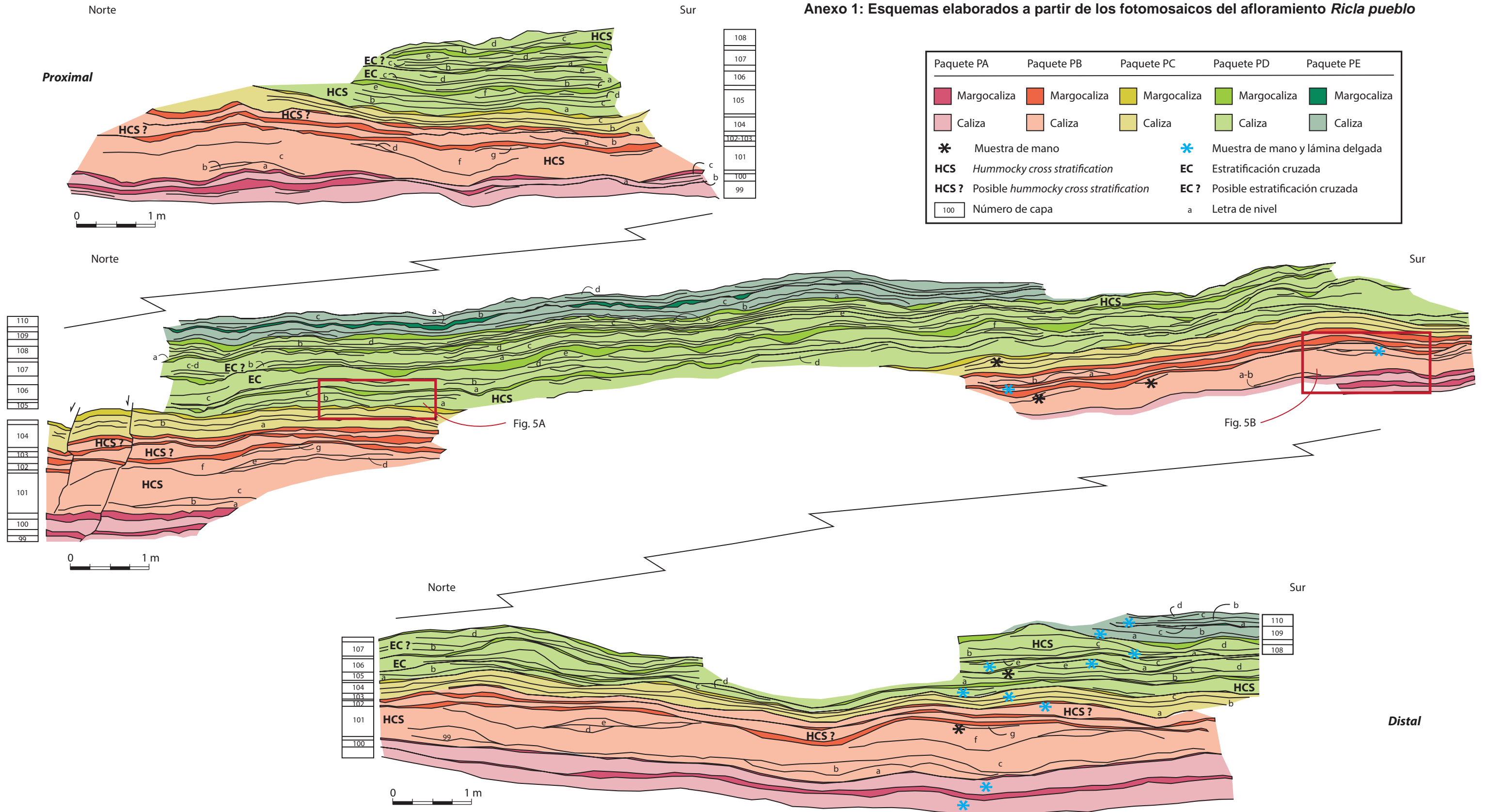
## 9. BIBLIOGRAFÍA

- Arche, A. (Editor). (2010): *Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. CSIC Textos Universitarios 46, Madrid. 233-240 pp.
- Aurell, M., Badenas, 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. *Geological Society, London, Special Publications*, 149(1), 137-161.
- Bádenas, B. (1999): *La sedimentación en las rampas carbonatadas del Kimmeridgiense en las cuencas del Este de la Placa Ibérica*. Tesis doctoral, Univ. de Zaragoza, 256 pp.
- Bádenas, B., y Aurell, M. (2001): Proximal–distal facies relationships and sedimentary processes in a storm dominated carbonate ramp (Kimmeridgian, northwest of the Iberian Ranges, Spain). *Sedimentary Geology*, 139 (3), 319-340.
- Bádenas, B., Aurell, M., y Gröcke, D.R. (2005): Facies analysis and correlation of high-order sequences in middle–outer ramp successions: variations in exported carbonate on basin-wide  $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$  (Kimmeridgian, NE Spain). *Sedimentology*, 52(6), 1253-1275.

- Bádenas, B., Aurell, M., Pérez-Urresti, I., y Delvene, G. (1998): Estratigrafía y evolución sedimentaria del Oxfordiense superior-Titónico inferior en Ricla (Zaragoza). *Geogaceta*, 24, 35-38.
- Bádenas, B., Pomar, L., Aurell, M., y Morsilli, M. (2012): A facies model for internalites (internal wave deposits) on a gently sloping carbonate ramp (Upper Jurassic, Ricla, NE Spain). *Sedimentary Geology*, 271, 44-57.
- Campbell, C.V., (1966): Truncated-wave ripple laminae. *J. Sediment. Petrol.*, 36, 825–828.
- Dawson, A.G., y Stewart, I. (2007): Tsunami deposits in the geological record. *Sedimentary Geology*, 200(3), 166-183.
- Duke, W.L., Arnott, R.W.C., y Cheel, R.J. (1991): Shelf sandstones and hummocky cross-stratification: new insights on a stormy debate. *Geology*, 19(6), 625-628.
- Dunham, R.J (1962): Classification of carbonate rocks according to depositional texture. En *Classification of carbonate Rocks* (W. E. Ham, ed). Mem. Am. Ass. Petrol. Geol., 1, pp: 108-121.
- Gómez, J.J., y Goy, A.G. (1979): Las unidades litoestratigráficas del Jurásico medio y superior, en facies carbonatadas del sector levantino de la Cordillera Ibérica. *Estudios Geológicos*, 35(1), 569.
- Harms, J.C., Southard, J.B., Spearing, D.R. y Walker, R.G. (1975): Depositional environments as interpreted from primary sedimentary structures and stratification sequences. *S.E.P.M. Short Course*, 2, 161.
- Lendinez, A., Gonzalo, R., Cabra, P., Pérez, A., y San Román, J. (1995): *Mapa Geológico de España 1:50.000, hoja nº 382 (Épila) y memoria*. IGME, Madrid. 163 p.
- Morsilli, M., y Pomar, L. (2012): Internal waves vs. surface storm waves: a review on the origin of hummocky cross-stratification. *Terra Nova*, 24(4), 273-282.
- Pomar, L., Morsilli, M., Hallock, P., y Bádenas, B. (2012): Internal waves, an under-explored source of turbulence events in the sedimentary record. *Earth-Science Reviews*, 111(1), 56-81.
- Schieber, J., Southard, J., y Thaisen, K. (2007): Accretion of mudstone beds from migrating floccule ripples. *Science*, 318(5857), 1760-1763.



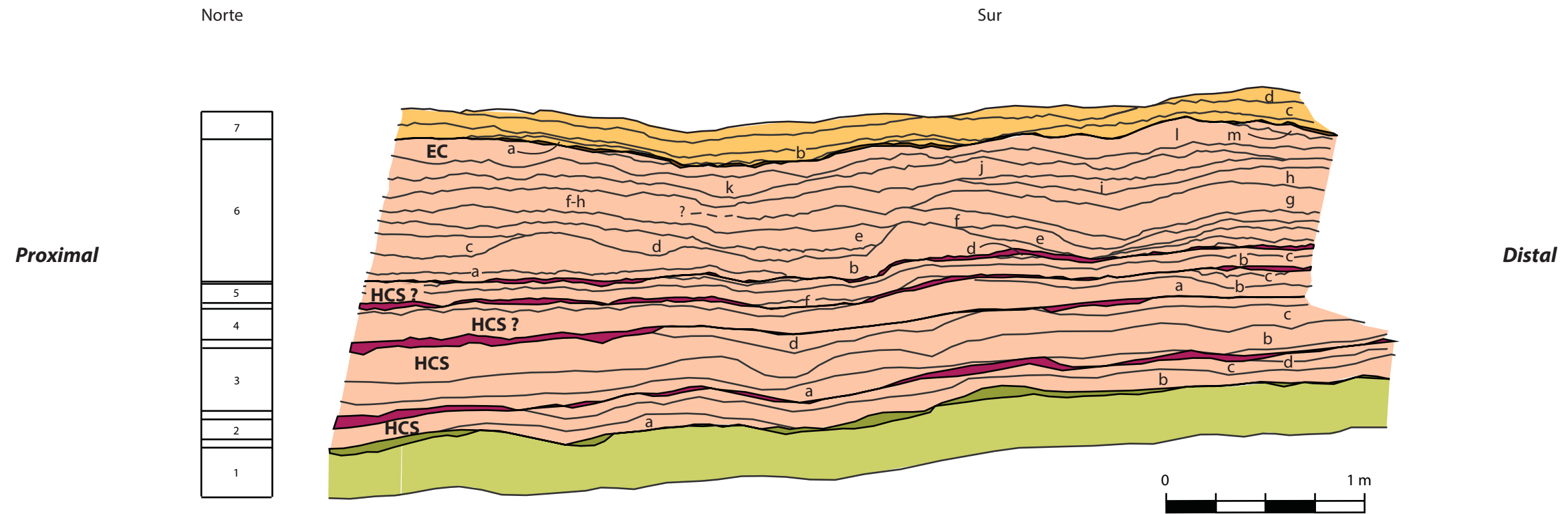
Anexo 1: Esquemas elaborados a partir de los fotomosaicos del afloramiento *Ricla pueblo*



- Algunos de los niveles que integran a ciertas capas no aparecen representados en los esquemas debido a cuestiones de escala. Sí aparecen en la Fig. 4

- El hecho de asignar colores diferentes para capas de litología común tiene como objetivo el poder identificar con mayor facilidad los *paquetes de capas* en los que se queda dividido el intervalo estudiado.

Anexo 2: Esquemas elaborados a partir del fotomosaico del afloramiento *Ricla estación*



Paquete de capas EC	Paquete de capas EB	Paquete de capas EA
Caliza	Caliza	Caliza
Margocaliza	Margocaliza	Margocaliza
<b>HCS</b> <i>Hummocky cross stratification</i>	<b>EC</b> Estratificación cruzada	
<b>HCS ?</b> Posible <i>hummocky cross stratification</i>	<b>EC ?</b> Posible estratificación cruzada	
Número de capa	a Letra de nivel	