



Universidad
Zaragoza

Trabajo De Fin De Grado

Grado En Geología, Facultad De Ciencias

UNIVERSIDAD DE ZARAGOZA

Curso 2023 – 2024

ANÁLISIS DE FACIES Y CORRELACIÓN DE LAS SUCESIONES DEL APTIENSE INFERIOR EN MADOTZ Y ARTXUETA (SIERRA DE ARALAR, NAVARRA)

Ximena Pérez Escamilla

Director: Dr Marcos Aurell Cardona

Índice

1. ABSTRACT	2
2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS	3
3. SITUACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO	3
4. METODOLOGIA	5
4.1 Trabajo de campo	5
4.2 Trabajo de gabinete y laboratorio	5
5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	6
5.1 Perfil del pico Artxueta	6
5.2 Perfil de Madotz	9
6. Análisis de Facies	11
6.1 Descripción de facies	11
6.2 Interpretación y reconstrucción paleoambiental	15
7. DISCUSIÓN	17
7.1 Correlación de perfiles	17
7.2 Implicaciones: Evolución de facies	19
8. CONCLUSIONES	21
9. BIBLIOGRAFÍA	22

1. ABSTRACT

The present study consists on the analysis of two stratigraphic sections exposed in the Aralar Mountains (Navarre, NE Spain, Basque-Cantabrian Basin). These sections are the Artxueta Peak section and the Madotz section, 64 m and 30 m long respectively, separated by 7.5 km.

The studied sections represent the shallow part of a carbonate platform originated during the opening of the Bay of Biscay during the Lower Aptian. This platform can be followed laterally towards the West, in a succession of increased depth facies. The described sediments correspond to three distinct formations: Fm. Sarastarri, Fm. Lareo, and Fm. Artxueta, the first two of early Aptian age, and the latter corresponding to the basal late Aptian.

The aim of this work is to increase the detail on which these sections were correlated in previous work, through facies analysis and characterization that allowed a palaeoenvironmental reconstruction. The resulting facies indicate a general deepening tendency, interrupted by several shallowing upwards cycles.

The facies range from a restricted inner platform to an external proximal platform setting, characterized mainly by the fossil associations they present. The most common fossil group throughout the sections is orbitolinids, which can be found in their varied conical – discoidal morphologies. Rudist and *Chondrodonta* associations, many on living position, are frequent on an open lagoon, low energy shallow water environment. The presence of colonial corals indicates marginal bioherm constructions.

The abundance of *Chondrodonta* associations is interpreted to be a sign of an unbalanced environment, as these opportunistic bivalves were able to out-compete the rest of the benthonic groups during high stress periods. These periods were interpreted as a cold snap corresponding to the OAE1b, of basal late Aptian age.

Previous work also defines a sedimentary hiatus, increasingly extensive towards the East, that spans from the upper part of the Sarastarri Formation to the middle part of the Artxueta Formation in the Madotz section. The present work presents evidence that backs this description.

Keywords: Shallow Carbonate Platform, Late Aptian Cold Snap, N Spain, Aralar

2. PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo es realizar un análisis estratigráfico y sedimentológico de las facies carbonatadas marinas someras en las unidades del Aptiense de la Sierra de Aralar. Con ello, se pretende ampliar el conocimiento estratigráfico del extremo oriental de la Cordillera Vasco-Cantábrica (norte de la Península Ibérica). La recopilación de los datos se hizo mediante el levantamiento capa a capa dos perfiles que habían sido estudiados anteriormente de manera general. Con ello, se pretende afinar la correlación entre ambos perfiles propuesta en trabajos previos, con objeto de entender de forma más precisa la distribución de facies y paleoambientes de la plataforma Aptiense en la zona de margen Golfo de Vizcaya (*Fig 1*).

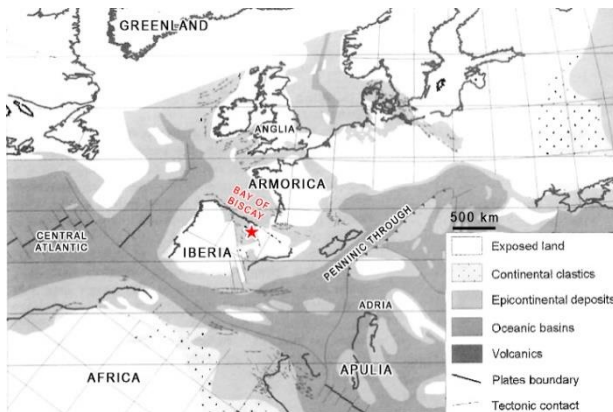


Figura 1: Mapa paleogeográfico del Aptiense con la zona de estudio indicada. Editado de Masse, 2000.

Las secuencias de sedimentación marina profunda correspondientes a esta época han sido estudiadas ampliamente en zonas del Norte de España, como en el flysch de Zumaia (Guipúzcoa) y el flysch del Valle de Tena (Huesca). El presente trabajo parte de los trabajos realizados por Millán et al. (2011, 2014), en los que describe la estratigrafía de las sucesiones de la plataforma marina somera del Aptiense expuestas en la Sierra de Aralar.

El Trabajo de Fin de Grado pretende realizar un análisis de facies en detalle, para lo que se han seleccionado dos series del margen Sur de la Sierra de Aralar descritas de forma general en Millán et al. (2014), con el fin de determinar y analizar la evolución de la plataforma en el sector comprendido entre el pico Artxueta y la localidad de Madotz (*Fig. 2*). La existencia de una importante laguna estratigráfica en torno al límite Aptiense inferior a superior reconocible en ambas series implica variaciones laterales de facies significativas, y confiere una relevancia particular a este TFG (*Fig. 3*).

3. SITUACIÓN Y CONTEXTO GEOLÓGICO

El Macizo de Aralar se encuentra en la parte más oriental de la Cordillera Cantábrica, al NE de la Península Ibérica. Las sucesiones carbonatadas aflorantes en esta zona representan la evolución de la plataforma siliciclástica-carbonatada que se abría hacia el Atlántico durante el Cretácico Inferior (Millán et al., 2011), a una paleolatitud subtropical de entre 25° y 30° N. El inicio del Aptiense se caracteriza por una transgresión marina a nivel global, normalmente interpretada como el resultado de una transgresión marina generalizada (Masse, 2000).

Se han estudiado dos secciones, situadas a 7.6 km de distancia horizontal. La primera se encuentra en el Pico Artxueta, y la segunda se encuentra al Este del pueblo de Madotz. Ambas secciones se encuentran actualmente situadas en el anticlinal más al Sur de la Sierra de Aralar (*Fig. 2*), que abarca materiales de edad comprendida desde el Jurásico Superior hasta el Albiense medio (Millán et al., 2014).

Duvernois et al. (1972) realizó la división estratigráfica de la Sierra de Aralar, y Lertxundi (1997) renombró algunas de las unidades, resultando en la nomenclatura actual para la estratigrafía de la zona.

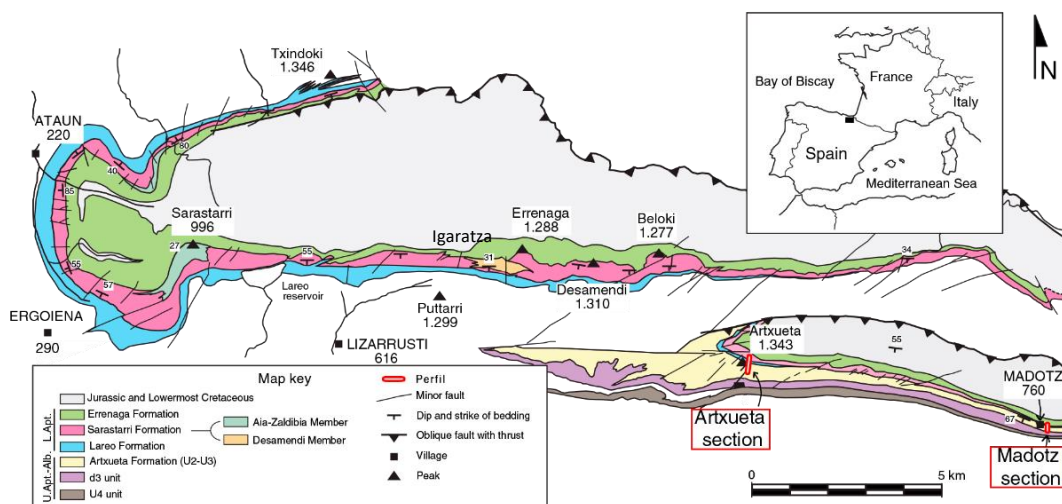


Figura 2: Mapa geológico simplificado de la Sierra de Aralar, mostrando la situación de los perfiles de Artxueta y Madotz. Modificado de Millán et al., 2014.

La primera de las formaciones presente en los perfiles estudiados es la Fm. Sarastarri (Fig. 3). Presenta una potencia de hasta 350 m en el domo de Ataun (Lertxundi, 1997), disminuyendo hacia el Este hasta quedarse en 38 m aflorantes en la sección de Madotz (Millán et al., 2011). Se compone de facies de plataforma carbonatada somera datada del Aptiense inferior. A techo presenta una superficie de erosión causada por exposición subaérea y posteriormente ahogamiento de la plataforma (Millán et al., 2007).

Por encima de la Fm. Sarastarri se encuentra la Formación Lareo, descrita por primera vez por Lertxundi (1997) y Lertxundi y García-Mondéjar (1997), datada de finales del Aptiense inferior. Muestra una disminución lateral de potencia aún más marcada que la Fm. Sarastarri, al superar los 300 m en el domo de Ataun (García-Mondéjar, 2009) y desaparecer en la sección de Madotz. Su litología consiste en lutitas, limolitas y margas, con menores cantidades de areniscas, pero su contenido en carbonato va variando lateralmente, presentando incluso asociaciones fósiles de bivalvos dispuestas en

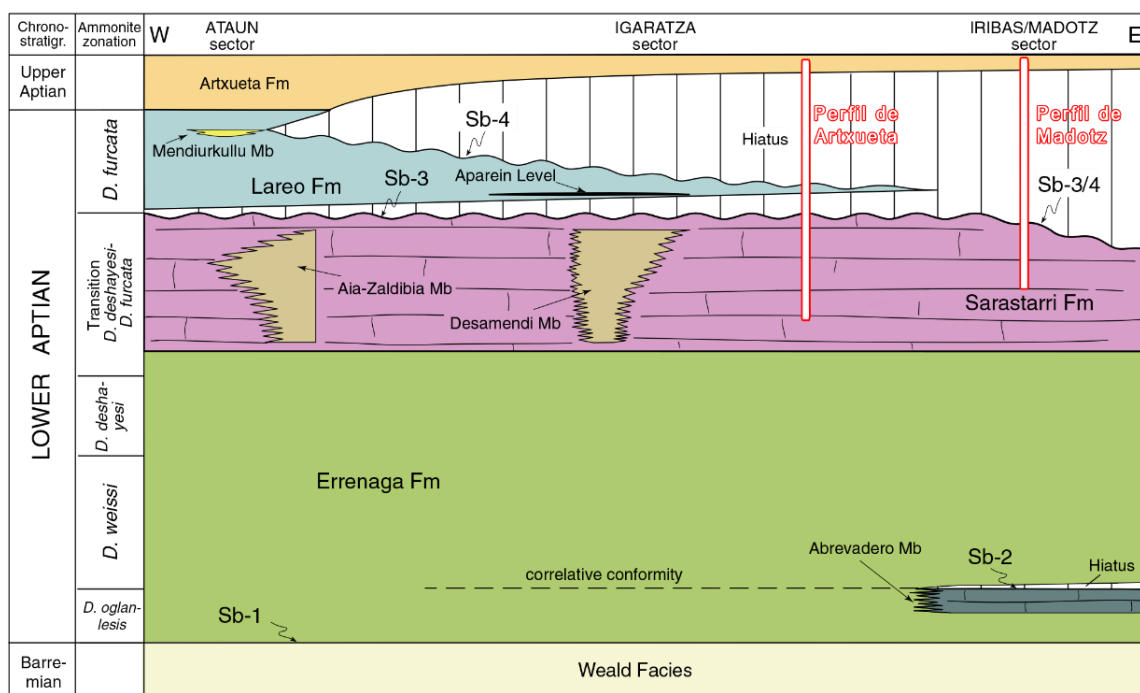


Figura 3: Tabla cronoestratigráfica del Aptiense Inferior de la plataforma carbonatada en la Sierra de Aralar. Las secciones estudiadas en este trabajo están indicadas aproximadamente. Modificado de Millán et al., 2011.

posición de vida (Lertxundi, 1997; García-Mondéjar, 2009). Esta formación presenta en campo un color ocre distintivo (*Fig. 4*).

La última de las formaciones aflorantes en la zona de estudio es la Formación Artxueta, cuyas facies principales son calizas micríticas de rudistas y calcarenitas bioclásticas. El límite entre esta formación y la Fm. Lareo coincide con el límite entre el Aptiense inferior y el Aptiense superior. Su base es una superficie erosiva continua que puede seguirse a lo largo de kilómetros. Esta erosión es la causante de que la Fm. Lareo no se encuentre en Madotz, quedando la Fm. Artxueta directamente sobre la Fm. Sarastarri (García-Mondéjar et al., 2009; *Fig. 3*).

4. METODOLOGIA

4.1 Trabajo de campo

Al trabajo realizado en el campo se le dedicó 6 jornadas. Consistió en el estudio detallado del afloramiento de la serie estratigráfica a lo largo de la pista que sube del santuario de San Miguel de Excelsis al pico Artxueta (42°57'8" N, 1°57'46" W) y del afloramiento de la serie correlativa cerca del pueblo de Madotz (42°56'14" N, 1°52'19" W). Durante la primera jornada se delimitó el espacio de trabajo, y durante las demás se levantaron columnas estratigráficas de ambos afloramientos. La columna de Artxueta consta de un total de 64 m, y la columna de Madotz de 30 m.

También se recogieron muestras de mano para analizar posteriormente. Se tomaron 36 muestras del perfil de Artxueta con un espaciado aproximado de 2 m entre ellas. En el perfil de Madotz se recogieron 12 muestras con un espaciado aproximado de 3 m entre ellas. Las características de los afloramientos dificultan la realización de observaciones de las facies, debido a la abundante vegetación y presencia de líquenes en las rocas.

Durante el trabajo de campo se prestó especial atención al contenido fósil, en particular a las asociaciones que se encuentran en posición de vida como rudistas y *Chondrodonta sp.*, cuyos restos fósiles resaltan en la roca, y son por ello de fácil identificación. Estas asociaciones fueron medidas y anotadas en las columnas correspondientes. La textura de la roca y los restos fósiles de menor tamaño fueron descritos haciendo uso de una lupa de mano.

4.2 Trabajo de gabinete y laboratorio

Se realizó un total de 45 secciones pulidas de las muestras recogidas en el campo en los dos perfiles, además de 10 láminas delgadas de las muestras del perfil de Artxueta. Las láminas delgadas fueron realizadas por el Servicio de Preparación de Rocas y Materiales Duros de la Universidad de Zaragoza.

El grueso del trabajo consistió en el estudio y análisis de las secciones pulidas, que fueron escaneadas y digitalizadas a alta resolución (2400 ppp). Las imágenes resultantes fueron analizadas con la ayuda de programas de edición de imagen, con el objetivo de describir los aspectos texturales y el contenido fósil no apreciables en el campo. Estas caracterizaciones permitieron posteriormente agruparlas en facies.

Las láminas delgadas se emplearon para completar la descripción de las muestras realizada a partir de las secciones pulidas, especialmente para analizar el contenido en sedimento detrítico en la matriz de las rocas. Fueron analizadas haciendo uso de un microscopio petrográfico.

Una vez se hubo realizado la descripción de las facies se procedió a completar la información recogida en el campo y elaborar las columnas de ambos perfiles, con indicadores de abundancia de los

diferentes grupos fósiles (Fig. 4, Fig. 5.). Las columnas y los gráficos se hicieron mediante los programas *Adobe Illustrator* y *Adobe Photoshop*.

5. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

5.1 Perfil del pico Artxueta



Figura 4: Formaciones Sarastarri, Lareo y Artxueta en el pico Artxueta. La situación del perfil se muestra en la Figura 2.

Se inicia la columna en la pista a mitad de camino hacia la cima del pico. Empezando desde la base, en el campo se diferenciaron 16 tramos litológicos (Fig 4). Las observaciones de campo fueron precisadas y ampliadas posteriormente mediante el análisis de las muestras pulidas, ya que capacidad de observación en campo fue limitada debido a la amplia presencia de vegetación, líquenes y las inclemencias del tiempo. Los tramos expuestos a continuación fueron los descritos de visu como primera aproximación al afloramiento:

- Tramo 0: Intervalo de alrededor de 1 m constituido por una acumulación de orbitolinas, mayormente de alrededor de 0,5 cm de diámetro. El tramo presenta muy poca cementación, de forma que las orbitolinas se desprenden de la matriz margosa y se encuentran sueltas e individualizadas.
- Tramo 1: Compuesto por unos 2,5 m de calizas nodulosas, en estratos o lentejones de alrededor de 10 cm de potencia, con poca continuidad y espesor variable. Se observan orbitolinas de hasta 1 cm de diámetro, con una media de 0,5 cm. Se encuentran distribuidas en tramos de packstone incluidos en el resto de caliza wackestone, más concentradas hacia la base. Presentan una morfología más bien cónica.
- Tramo 2: Intervalo de alrededor de 3 m formado por varias partes diferenciadas. Comienza en la base con un paquete de calizas de alrededor de 80 cm de potencia, con orbitolinas de hasta 1 cm de diámetro diseminadas, en mucha menor cantidad que en los estratos anteriores. Hay una amplia presencia de fragmentos de gasterópodos y bivalvos indeterminados durante los siguientes 80 cm. Continúan varios estratos de alrededor de 10 cm de potencia, con aparentemente la misma litología y contenido fósil, salvo por un incremento en la proporción de orbitolinas hacia techo.

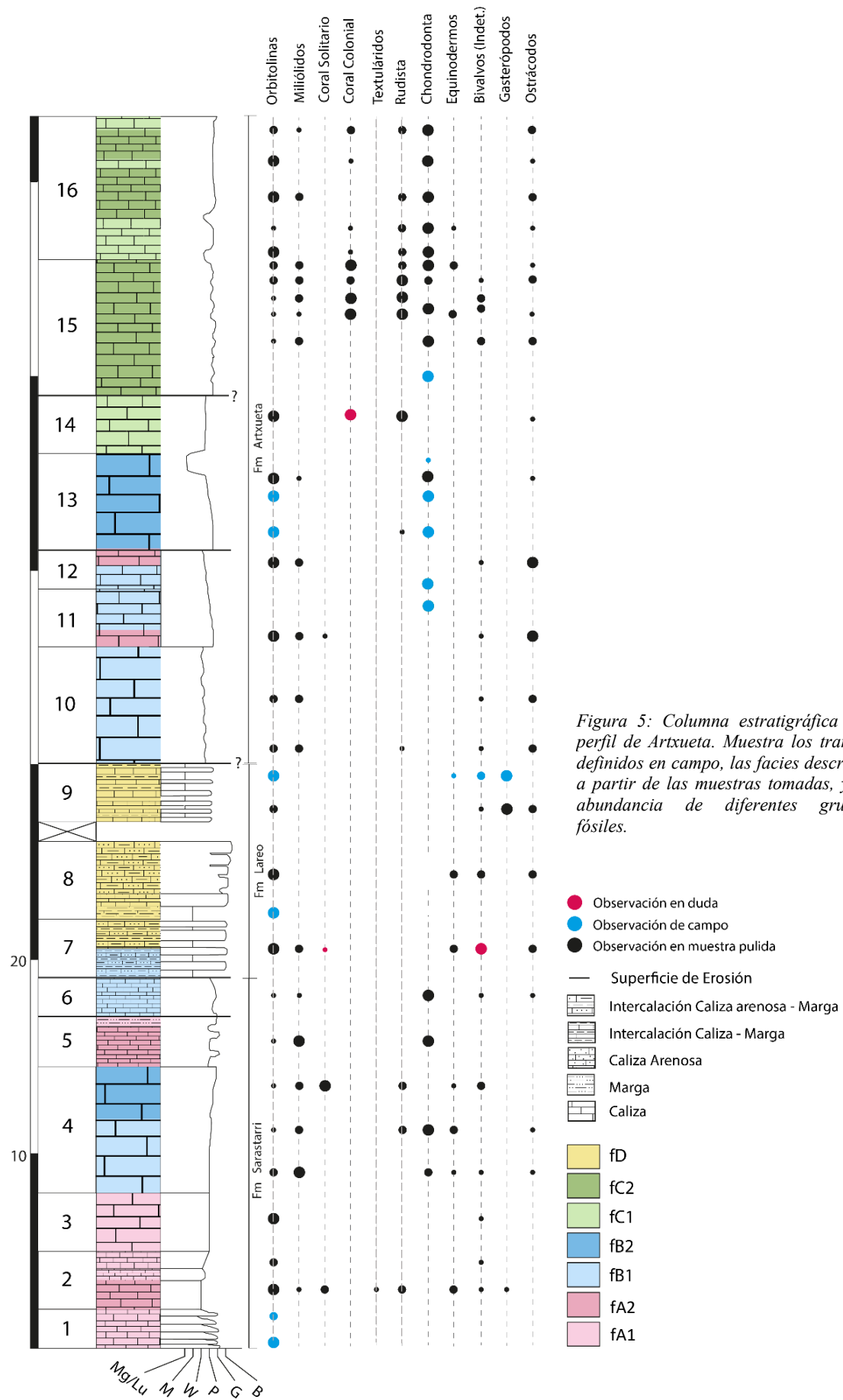


Figura 5: Columna estratigráfica del perfil de Artxueta. Muestra los tramos definidos en campo, las facies descritas a partir de las muestras tomadas, y la abundancia de diferentes grupos fósiles.

- Tramo 3: Abarca 3 m de calizas packstone masivas. Pueden intuirse unos estratos de entre 80 y 120 cm, con base y techo muy irregulares. Hay gran cantidad de orbitolinas de morfología planar y más de 1 cm de diámetro, y bivalvos más enteros que en los tramos inferiores aun desarticulados. Hacia el techo del tramo los bivalvos se encuentran articulados, posiblemente en posición de vida, y disminuye el número y tamaño de las orbitolinas
- Tramo 4: Intervalo de unos 7 m de calizas packstone masivas. El afloramiento casi no varía con respecto al techo del tramo 3, pero en este tramo se empiezan a encontrar acumulaciones de *Chondrodonta* sp., decimétricas y más o menos dispersas. Estas asociaciones alcanzan el metro lateralmente y entre 10 y 30 cm de potencia. Se distribuyen aproximadamente a cada metro en la serie. Hacia el techo del intervalo se observan también restos de equinodermos, en forma de espiculas de alrededor de 0,5 cm. La matriz pasa a ser “arenosa” hacia el techo, con textura de grano grueso.
- Tramo 5: Abarca unos 2 m de caliza arenosa en estratos de base y techo irregulares de aproximadamente 30 cm de potencia. Aumenta el contenido en *Chondrodonta* sp., que se encuentra en acumulaciones más próximas entre sí. Hacia techo se encuentran también acumulaciones de rudistas, aparentemente en posición de vida. El contenido fósil es escaso, y hay ç arena de grano grueso a techo, posiblemente limitado por una superficie de erosión.
- Tramo 6: 2 m de caliza arenosa de grano grueso, con tramos centimétricos de microconglomerados. A base del tramo se encuentran acumulaciones menos abundantes que en los tramos anteriores de rudistas y otros bivalvos. A techo se observan gasterópodos y bivalvos fragmentados. Existe otra superficie limite a techo, que puede interpretarse como otra superficie de erosión.
- Tramo 7: Abarca unos 3 m de intercalación de estratos de hasta 20 cm de margas y calizas arenosas con un alto contenido en orbitolinas que va incrementando hacia techo, muchas de ellas sueltas de la matriz. Los restos de bivalvos se encuentran fragmentados y aislados. Se considera este tramo el inicio de la Fm. Lareo.
- Tramo 8: Intervalo de unos 4 m. Comienza con alrededor de 0,5 m de margas con un contenido en orbitolinas elevado. Pasa después a una intercalación de estratos de margas y calizas arenosas de base y techo irregulares, con mucha menor proporción de margas que el tramo anterior, dado que estas alcanzan solo los 10 cm y se encuentran más espaciadas. Las calizas presentan ripples de oscilación y acumulaciones de fósiles de bivalvos fragmentados.
- Tramo 9: Consiste en unos 3 m de potencia de intercalación de margas y calizas, aumentando el espesor de los estratos de marga a techo. La textura de la roca es difícil de distinguir debido a la alteración por dolomitización. La cantidad de orbitolinas descende con respecto al tramo anterior. Se observa una gran cantidad de fósiles de gasterópodos y equinodermos diseminados a techo, así como galerías de invertebrados dispersas.
- Tramo 10: Abarca unos 6 m de caliza alterada por dolomitización. La textura recristalizada y oquedades dificultan la identificación del contenido fósil, especialmente en la base del tramo donde la alteración es más pervasiva. El tramo es estratocreciente, variando de estratos de menos de 30 cm de potencia en la base hasta más de 60 cm a techo. La base del tramo es irregular y representa un contraste de litología con respecto al tramo anterior, por lo que se considera una superficie de erosión. Este tramo se interpreta como la base de la Fm. Artxueta.

- Tramo 11: Intervalo de unos 3 m de potencia de caliza bien estratificada. Se observan amplias acumulaciones de *Chondrodonta* sp. en posición de vida de potencia decimétrica y que superan el metro de extensión lateral hacia el techo del tramo.
- Tramo 12: Abarca unos 2 m de calizas grises masivas. Se observan pequeñas acumulaciones de bivalvos indeterminados, con poca fragmentación y poca continuidad lateral.
- Tramo 13: Consiste de 5 m de calizas con una gran concentración de acumulaciones de *Chondrodonta* sp. en posición de vida, asociados en bancos de más de 50 cm de espesor. La cantidad disminuye a techo. Se observan también orbitolinas de diversas morfologías, especialmente en los tramos no dominados por *Chondrodonta*.
- Tramo 14: Formado por unos 2 m de caliza mayormente packstone de rudistas, con asociaciones en posición de vida de alrededor de 30 cm de espesor con amplia continuidad lateral.
- Tramo 15: Intervalo de unos 6 m de calizas packstone y localmente wackestone de *Chondrodonta* sp. y rudistas, en forma de asociaciones en posición de vida intercaladas con dominancia de un género y otro respectivamente, de varios metros de extensión lateral. Se encuentran además escasos restos de corales coloniales.
- Tramo 16: Abarca unos 7 m de calizas wackestone masivas, con acumulaciones de rudistas, *Chondrodonta* y otros bivalvos en posición de vida de pocos centímetros de potencia, algunas de ellas mezclando los géneros y con algo desarticulación y fragmentación. Estas acumulaciones tienen poca continuidad lateral.

5.2 Perfil de Madotz



Figura 6: Imagen de satélite de la zona en la que se ha realizado el perfil de Madotz, al Este del pueblo (Google Earth Pro)

Se inicia la columna unos 200 m al Este del pueblo de Madotz. En el campo se diferenciaron 6 tramos. Las observaciones de campo fueron precisadas y ampliadas posteriormente mediante el análisis de las muestras pulidas, ya que capacidad de observación en campo fue limitada debido a la amplia presencia de vegetación y líquenes. Los tramos expuestos a continuación fueron los descritos de visu como primera aproximación al afloramiento:

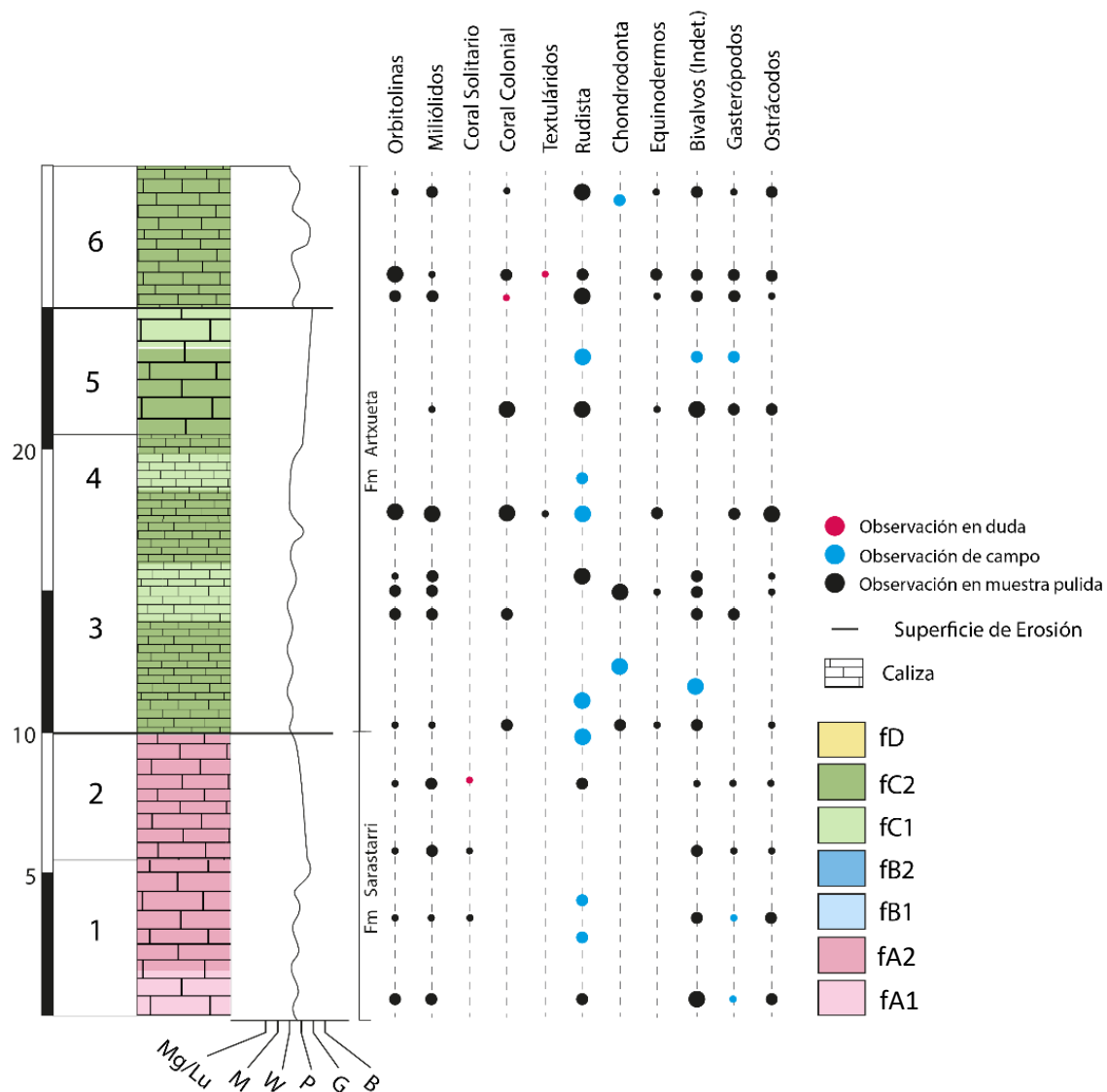


Figura 7: Columna estratigráfica del perfil de Madotz. Muestra los tramos definidos en campo, las facies descritas a partir de las muestras tomadas, y la abundancia de diferentes grupos fósiles.

- Tramo 1: Abarca alrededor de 6 m de caliza con estratos de cerca de 1 m, con base y techo
- Tramo 2: Intervalo de unos 4 m de caliza masiva, sin estratificación aparente. Alto contenido en barro micrítico, poco contenido fósil en la base del tramo. A techo, aumenta la frecuencia de las acumulaciones de rudista, además de encontrarse gasterópodos de gran tamaño y corales aislados.
- Tramo 3: Constituido por 7,5 m de caliza bien estratificada, en estratos más o menos regulares de hasta 60 cm de potencia. Frecuentes acumulaciones de rudistas en posición de vida, de varios decímetros de potencia, con poca continuidad lateral. La morfología más común en estas acumulaciones es de individuos redondeados de pequeño tamaño. Se encuentran también asociaciones de *Chondrodonta* en posición de vida aisladas, de hasta 20 cm de potencia y generalmente menor continuidad lateral que las de los rudistas.

- Tramo 4: Formado por unos 3 m de caliza masiva, con acumulaciones de rudistas más pequeñas, Presenta una alta tasa de fragmentación de los restos fósiles, especialmente a techo del tramo. En general, el contenido fósil es bajo.
- Tramo 5: Intervalo de 5 m de caliza masiva. En campo tiene apariencia de un macizo sólido y continuo. Presencia de asociaciones de rudistas en posición de vida de varios decímetros de potencia, con una morfología dominante de mayor tamaño que en los tramos anteriores.
- Tramo 6: Abarca unos 5 m de caliza con estratos de 50 cm de media. Se observan acumulaciones de rudistas y otros bivalvos desarticulados y fragmentados, así como asociaciones de rudistas y *Chondrodonta* en posición de vida, de hasta 20 cm de potencia con poca continuidad lateral y varios metros de separación entre ellas.

6. Análisis de Facies

6.1 Descripción de facies

A partir del análisis de muestras pulidas y de láminas delgadas se han definido 4 asociaciones de facies en función del tipo de componente dominante, que incluyen a su vez distintos tipos de facies. Se resumen los aspectos más representativos de las 7 facies identificadas, haciendo especial hincapié en las asociaciones fósiles reconocidas. La distribución vertical de facies queda mostrada en la *Figura 5* y *Figura 7*. Los aspectos más relevantes de estas facies se ilustran mediante las *Figuras 8, 9, 10 y 11*.

fA – Facies de Orbitolinas

fA1	Intercalación de caliza arenosa de textura wackestone (Dunham, 1962) y localmente packstone, de orbitolinas y fragmentos de pequeño tamaño de bivalvos aislados, de color pardo y con gran presencia de sedimentos siliciclásticos en la matriz. Las orbitolinas son de 0,5cm de diámetro de media, con morfología subcónica dominante.
fA2	Caliza de textura mudstone - wackestone de orbitolinas, con fragmentos y valvas desarticuladas de bivalvos (mayormente rudistas y <i>Chondrodonta</i>) y equinodermos. Se encuentran también restos de gasterópodos, miliólidos escasos y textuláridos, y galerías de invertebrados rellenas de sedimento. Localmente boundstone de asociaciones de <i>Chondrodonta</i> sp y/o rudistas en posición de vida de pocos decímetros de potencia y poca continuidad lateral. Localmente aumenta el contenido en sedimento siliciclástico de la matriz.

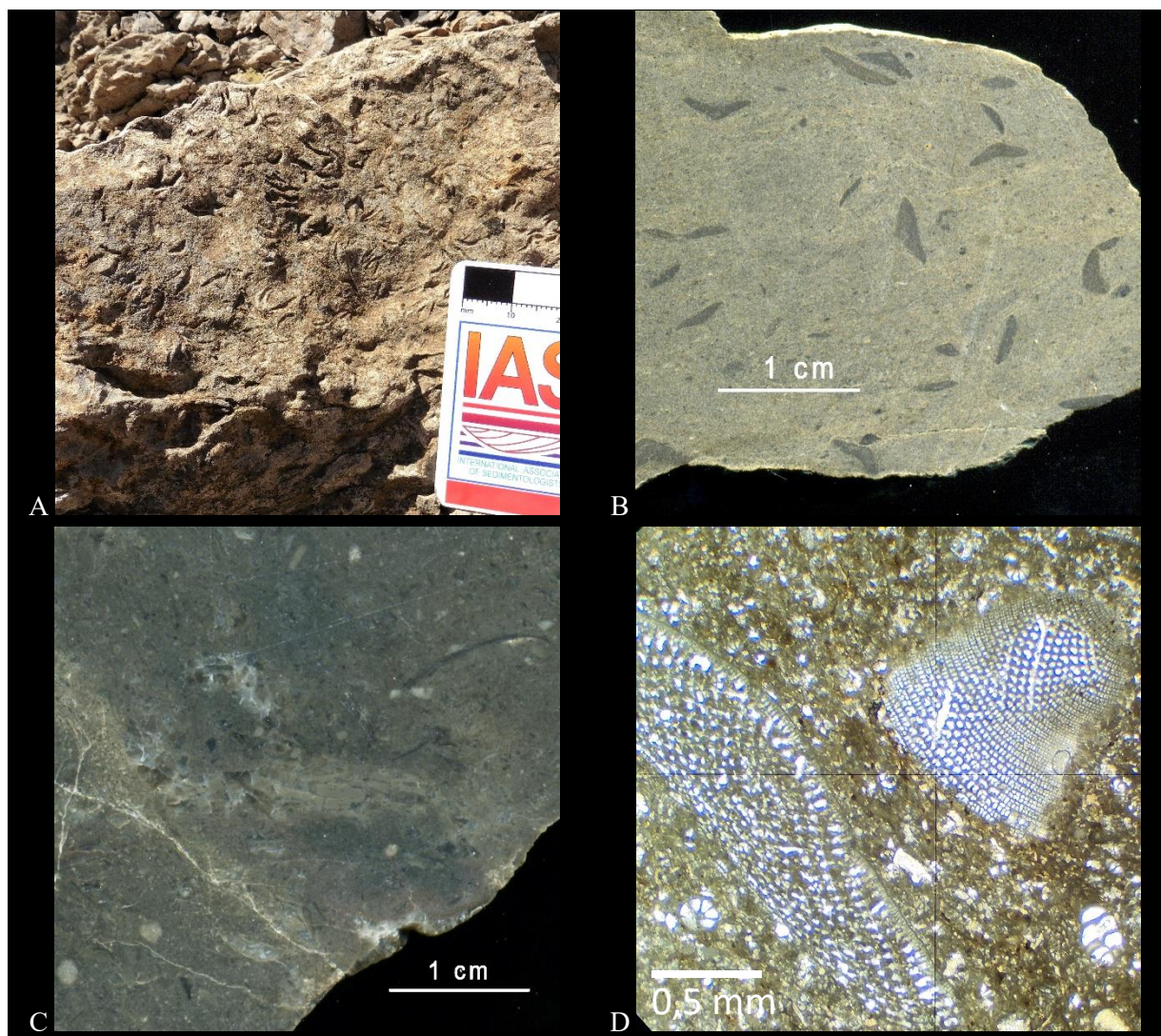


Figura 8: Imágenes de campo y de las muestras tomadas para la descripción de facies en el perfil de Artxueta. (A) Gasterópodos y orbitolinas en sección pulida pertenecientes a fA1; (B) Sección pulida de caliza arenosa con orbitolinas de morfología subdiscoidal a subcónica, perteneciente a fA1; (C) Sección pulida mostrando un coral solitario en matriz wackstone, perteneciente a fA2; (D) Orbitolinas de morfologías discoidal (izquierda) y cónica (derecha) en lámina delgada, perteneciente a fA2.

fb – Facies rudistas + *Chondrodonta* dominantes

fb1	Caliza de textura packstone de fragmentos de bivalvos y peloides. Localmente boundstone de asociaciones de <i>Chondrodonta</i> sp y/o rudistas en posición de vida de pocos decímetros de potencia y poca continuidad lateral, y grainstone de acumulaciones de fragmentos de <i>Chondrodonta</i> y rudista, orbitolinas, artejos de crinoides y otros restos de equinodermos con mayor contenido en sedimento siliciclástico localmente. Las orbitolinas de morfologías variadas, se encuentran redondeadas debido a su retrabajamiento y erosión por corrientes.
fb2	Caliza de textura wackstone - packstone de corales solitarios, peloides y rudistas articulados, localmente boundstone de asociaciones de <i>Chondrodonta</i> y/o rudistas en posición de vida de varios decímetros de potencia y varios metros de continuidad lateral. Presencia de fragmentos de bivalvos indeterminados, equinodermos, miliólidos escasos y orbitolinas. Se encuentran galerías de invertebrados rellenas por sedimento alóctono.

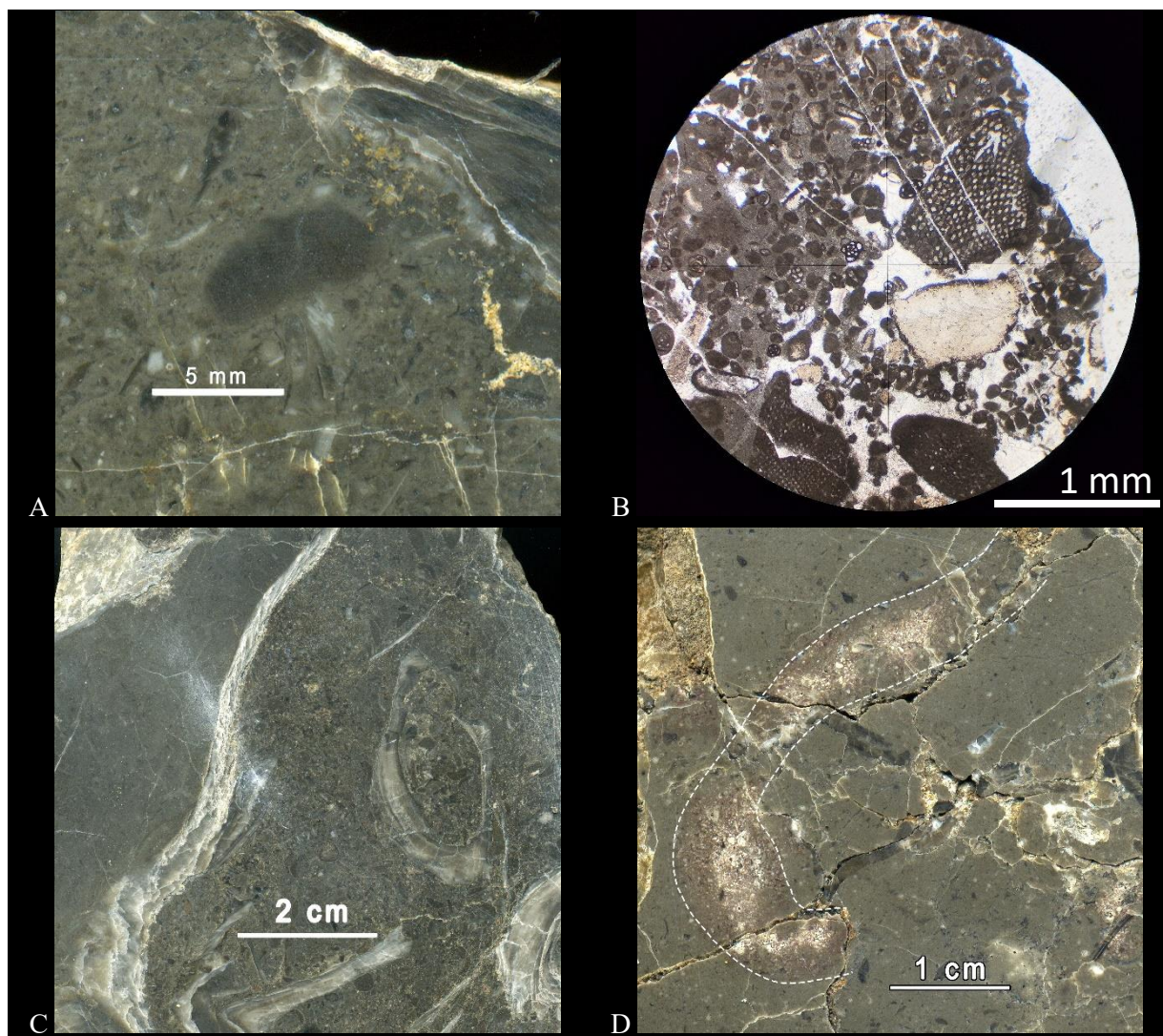


Figura 9: Imágenes de las secciones pulidas de las muestras tomadas en Artxueta y Madotz, y de láminas delgadas de Artxueta. (A) Orbitolina redondeada por la erosión en sección pulida, perteneciente a fB1; (B) Lámina delgada que muestra la matriz con peloides, perteneciente a fB1; (C) Fragmento de Chondrodonta (izq.) y rudista (der.) en sección pulida perteneciente a fB2. Permite apreciar la diferencia textural de las conchas; (D) Galería de un invertebrado rellena de sedimento alóctono, perteneciente a fB2.

fC – Facies con corales coloniales

fC1	Caliza de textura packstone de fragmentos y conchas desarticuladas de bivalvos (rudista y Chondrodonta) y orbitolinas, con fragmentos de equinodermos y gasterópodos, miliólidos escasos y fragmentos de coral colonial aislados. Las orbitolinas son de morfologías variadas, algunas redondeadas por erosión.
fC2	Caliza de textura wackestone - packstone de corales coloniales con miliólidos, orbitolinas, equinodermos y fragmentos de bivalvos. Localmente intercalación de boundstone de asociaciones de Chondrodonta y rudistas en posición de vida, algunas de ellas erosionadas por la acción de serpulidos.

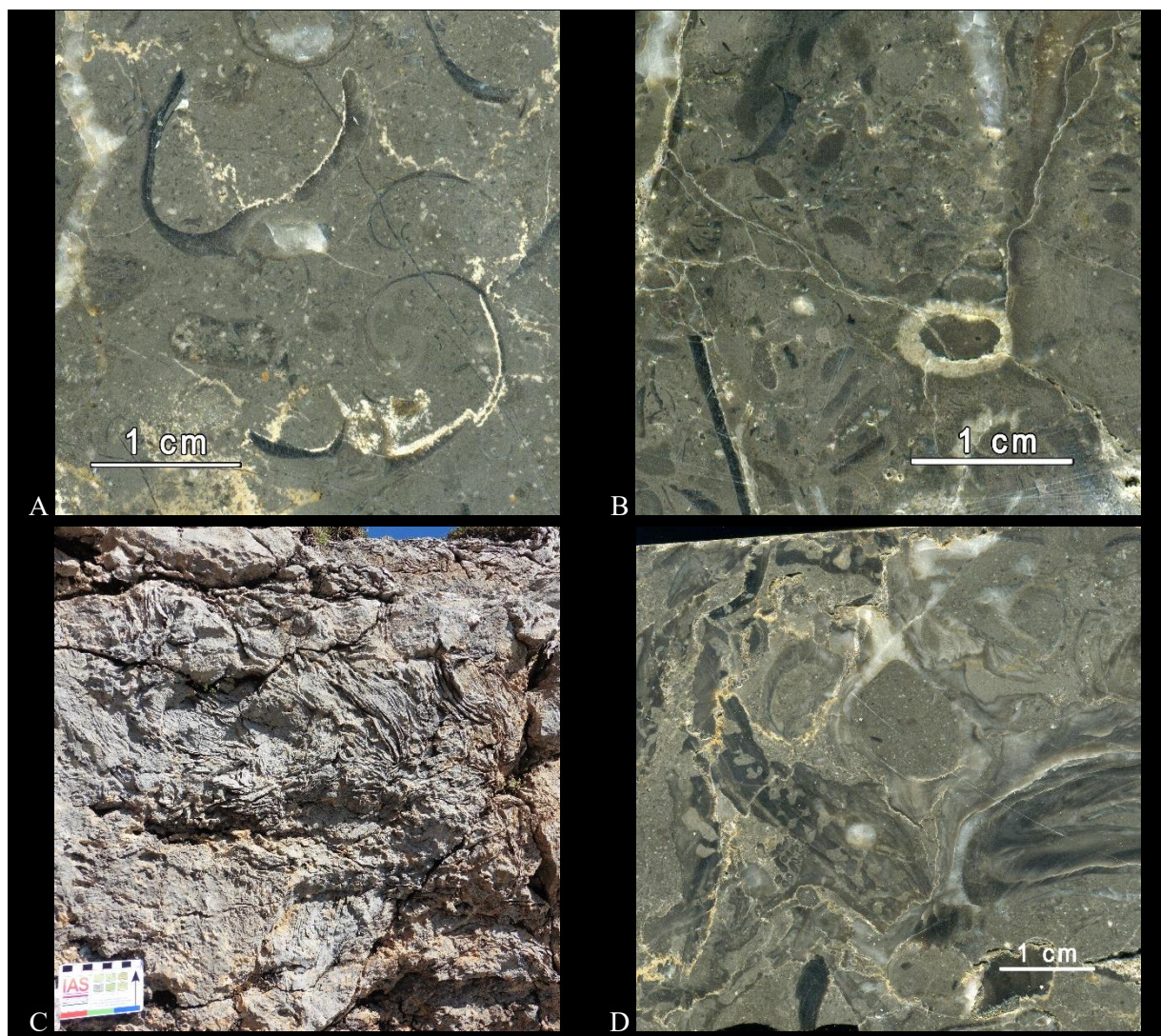


Figura 10: Imágenes de las secciones pulidas de las muestras tomadas en Artxueta y Madotz. (A) Asociación de rudista desarticulados y fragmentados y coral colonial, sección pulida de fC1; (B) Fragmento de coral, fragmentos de bivalvos y gasterópodo, perteneciente a mF6. Destacar el tamaño de las orbitolinas; (C) Asociación de Chondrodonta en posición de vida perteneciente a fC2, restituida a la vertical; (D) Acumulación de rudista y Chondrodonta atacada por serpulidos, perteneciente a fC2.

fd – Facies margosas / calcareníticas

fd	Caliza arenosa de textura packstone de gasterópodos y orbitolinas de color ocre, con fragmentos de bivalvos indeterminados, ostrácodos y fragmentos aislados de corales solitarios. La matriz presenta un alto contenido en sedimento detrítico. La morfología dominante de las orbitolinas es discoidal y de gran tamaño (1 cm). Localmente la litología se compone de margas de color marrón oscuro y ocre en las que aumenta la cantidad de orbitolinas.
-----------	---

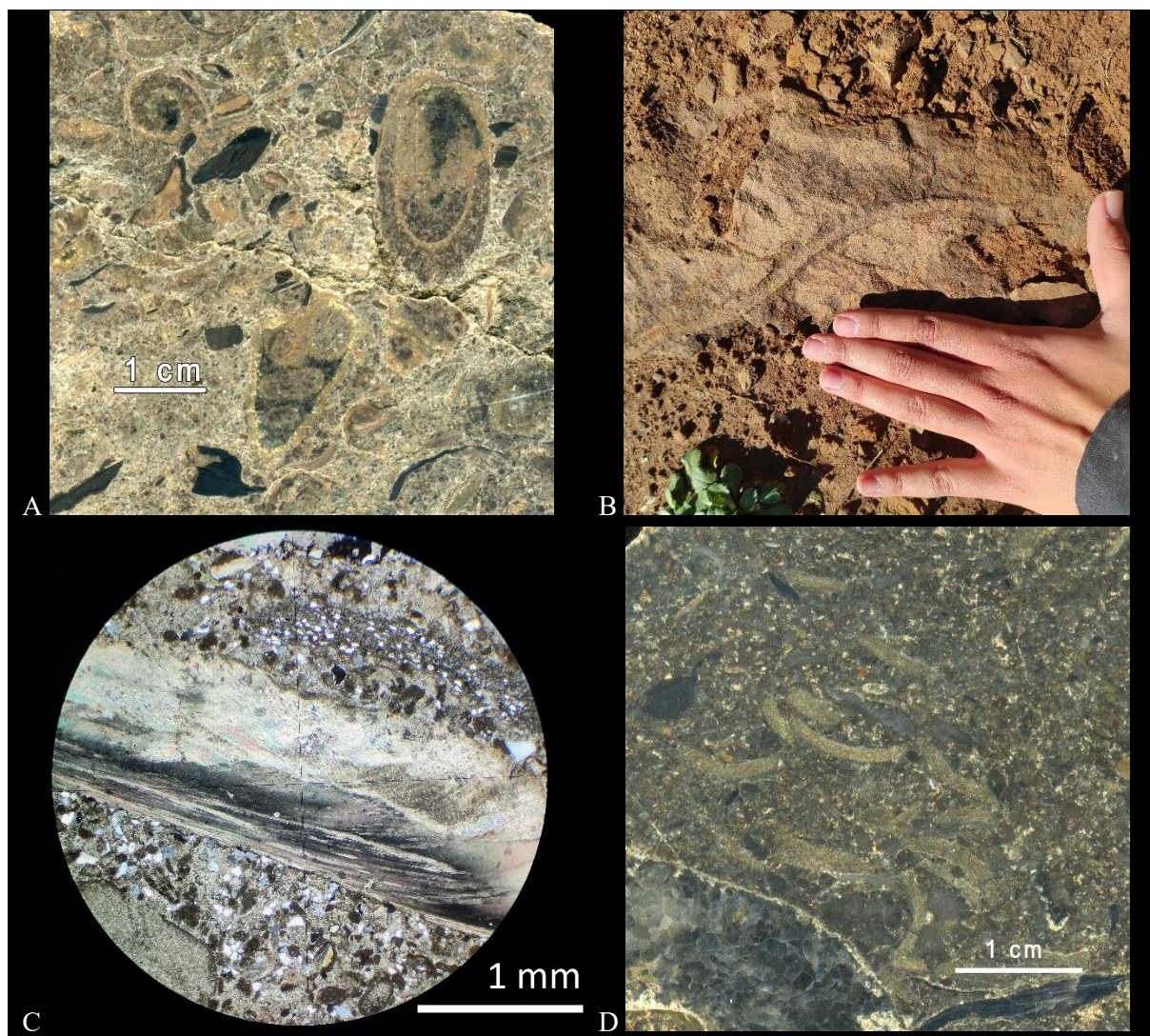


Figura 11: Imágenes de campo y de las muestras tomadas para la descripción de facies en el perfil de Artxueta. (A) Gasterópodos y orbitolinas en sección pulida pertenecientes a fD; (B) Foto de campo de una galería perteneciente al Tramo 9 y fD; (C) Textura laminar de Chondrodonta y orbitolinoide indeterminado con la pared aglutinante formada por cantos de cuarzo (arriba); (D) Orbitolinas de morfología discoidal-subdiscoidal de gran tamaño.

6.2 Interpretación y reconstrucción paleoambiental

A partir de las facies definidas para los perfiles estudiados puede hacerse una reconstrucción paleoambiental, siguiendo los esquemas propuestos por trabajos anteriores (García-Mondéjar et al., 2009; Millán et al., 2011; Millán et al., 2014). Cada una de las facies tiene una textura y una asociación fósil característica de un ambiente sedimentario concreto dentro de las plataformas carbonatadas someras (Fig. 12). El tránsito entre las facies definidas es gradual. La sucesión estratigráfica de estas facies queda reflejada para ambos perfiles en la Figura 5 y Figura 7 respectivamente.

La facies A1 corresponde a un ambiente de sedimentación de alta energía y aguas someras, con agitación permanente y alto contenido siliciclástico en la matriz. Se trataría de un ambiente de agitación frecuente por oleaje, por encima del nivel de oleaje de buen tiempo dentro de un ambiente de

lagoon. Las orbitolinas presentes en esta zona son de morfología predominantemente cónica o subcónica (Fig 8, A, B) (Hottinger, 1997).

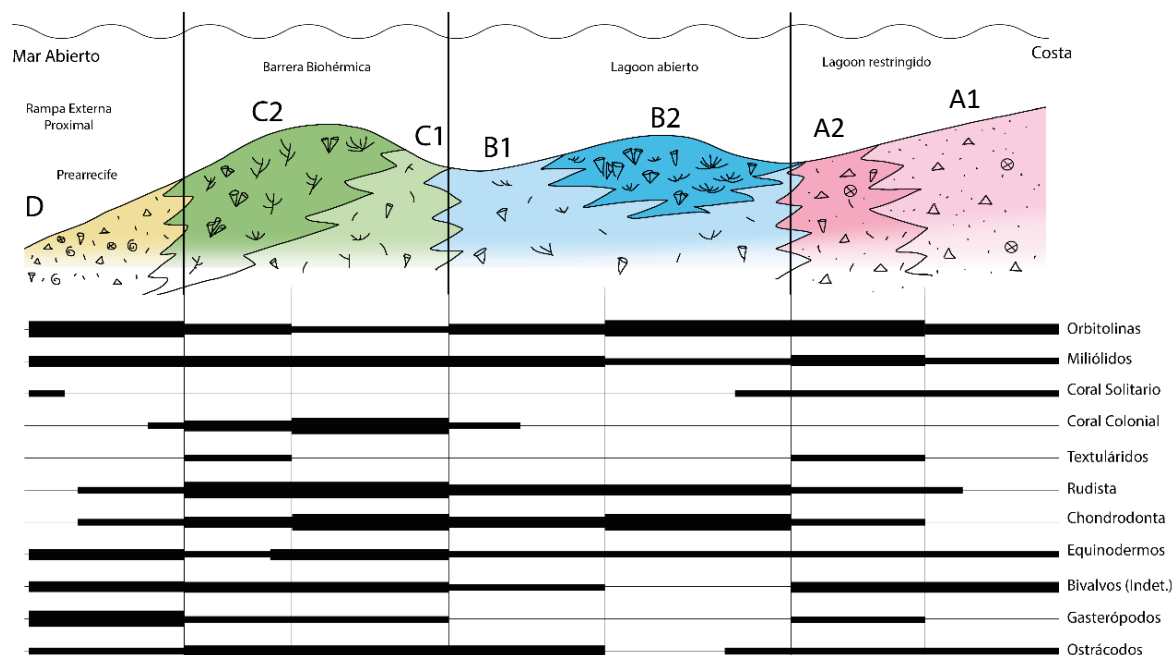


Figura 12: Modelo de biofacies del sistema de rampa carbonatada de Artxueta-Madotz e indicación de su situación geográfica. Se indica la abundancia de diferentes grupos fósiles a lo largo de la rampa.

En una zona más abierta del lagoon, con sedimentación de energía más baja, se encontrarían las facies A2 y B2. En este ambiente proliferarían bivalvos cementadores como los son rudistas y *Chondrodonta* (Fig 9, C), miliólidos y orbitolinas, en este caso con morfologías variadas (Fig 8, D). La baja energía del medio permite también la bioturbación generada por la actividad de invertebrados (Fig 9, D) y la proliferación de corales solitarios aislados (Fig. 8, C).

Las facies B1 y C1 representan de nuevo un ambiente de alta energía, en este caso situado en la cara interna de la barrera biohémica de la plataforma. Se componen principalmente de fragmentos de la barrera marginal y de las asociaciones de bivalvos cementadores del lagoon, además de un alto contenido en peloides que sugiere agitación, bien por oleaje o por corrientes (Fig 9, B; Fig 10, A). Abundan también las orbitolinas, algunas de ellas redondeadas por la erosión que sufrieron durante el transporte (Fig 9, A) y de morfología variante entre subcónica y subdiscoidal (Fig 10, B).

La barrera biohémica marginal de la plataforma quedaría representada por la facies C2. Abundan los corales coloniales, masivos y ramosos, tanto fragmentados como en posición de vida, además de asociaciones en posición de vida de bivalvos incrustantes (Fig. 10, C), algunas de ellas con amplias evidencias de bioerosión (Fig. 10, D).

Por último, la facies D representa un ambiente deposicional de plataforma externa proximal. Esta facies está dominada por gasterópodos (Fig. 11, A), equinodermos y orbitolinas, de gran tamaño y con morfología dominante discoidal-subdiscoidal (Fig. 11, D). Se encuentran fragmentos de bivalvos incrustantes (Fig. 11, C, D), y excepcionalmente asociaciones en posición de vida, de poca potencia y poca extensión lateral. En este ambiente abunda el contenido detrítico en la matriz, mayormente de grano fino. Se encuentran también evidencias de bioturbación generada por invertebrados (Fig. 11, B).

En este trabajo se propone la consideración de los bivalvos incrustantes que se presentan en grandes asociaciones a lo largo de las secciones estudiadas como *Chondrodonta* en lugar de ostras, como se ha

hecho en publicaciones anteriores (Millán et al., 2014, entre otros). La propuesta se basa en recientes publicaciones sobre la taxonomía y paleoecología de *Chondrodonta* (Posenato et al., 2018; Del Viscio et al., 2021) en las que son considerados indicadores paleoclimáticos del *cold snap* asociado al OAE1a (*Oceanic Anoxic Event*) en plataformas carbonatadas de Italia. Además, García-Mondéjar et al., 2009

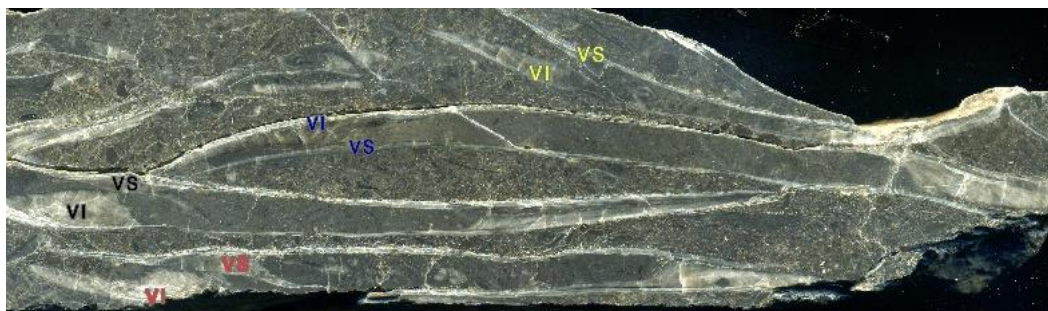


Figura 13: Muestra pulida perteneciente al Tramo 13 del perfil de Artxueta. Este tramo es inferior a la primera aparición de *Chondrodonta* en el perfil de Artxueta según Millán et al., 2014. Interpretación de los restos fósiles según los esquemas realizados por Posenato et al., 2018; VS: Valva Superior, VI: Valva Inferior

sí describieron la presencia de estos bivalvos a techo de la Fm. Sarastarri en la sección de Madotz, por lo que es coherente que se encuentren también en la sección contemporánea en Artxueta.

Los *Chondrodonta* son bivalvos cementadores alargados con una sistemática incierta, debido a la falta de estudios. Se consideran oportunistas típicos de ambientes de baja energía en la plataforma somera, como lo son los lagoons. Frecuentemente se encuentran asociados a acumulaciones de rudistas hasta su extinción en el Campaniense. (Posenato et al., 2018).

Al igual que los rudistas, los *Chondrodonta* crecen en asociaciones en forma de racimo que pueden ser de varios decímetros de potencia y extensión, al llegar a alcanzar las valvas alargadas un gran tamaño. Proliferan especialmente en ambientes inestables e impredecibles con cambios rápidos y bruscos de los recursos tróficos (Posenato et al., 2018).

Los niveles de especial abundancia de *Chondrodonta* están asociados al OAE1a a nivel mundial, para los que se interpreta un contexto paleoecológico de transición entre un ambiente estable a un ambiente fuertemente estresado. Eventos como este crean una “ventana” en la que *Chondrodonta* puede proliferar, a un ritmo mucho más elevado que los organismos bentónicos menos tolerantes al estrés ambiental (Del Viscio et al., 2021).

7. DISCUSIÓN

7.1 Correlación de perfiles

La correlación entre los dos perfiles estudiados no es obvia, debido a la existencia de importantes lagunas estratigráficas (Fig. 3). La presencia de estas lagunas se ha relacionado con un control tectónico en la sedimentación en la plataforma carbonatada de Aralar durante el Aptiense, junto con las oscilaciones eustáticas que se han relacionado con una etapa de enfriamiento global con formación de casquetes polares (*cold snap*, Millán et al., 2014). Se estima que las etapas de mayor regresión y transgresión marinas fueron causadas en mayor medida por movimientos tectónicos regionales y eustatismo que llevaron a la somerización e inundación rápidas de la plataforma (Millán et al., 2007). Esta plataforma carbonatada estaba abierta hacia el Oeste, de modo que su zona marginal quedaría localizada al Este, representa por los afloramientos de la Sierra de Aralar objeto de estudio. Quedaría emergida durante ciertos periodos, con cambios importantes en la sedimentación tras los periodos de la exposición subaérea (Millán et al., 2005).

Se propone la correlación entre perfiles mostrada en la *Figura 14*, incluyendo la posición del *cold snap* correspondiente al OAE1b al Aptiense superior en la secuencia sedimentaria. Este es un evento multiepisódico que queda registrado a nivel mundial en varios intervalos, de menor duración y entidad que los eventos anóxicos 1a y 2 (Arthur et al., 1990).

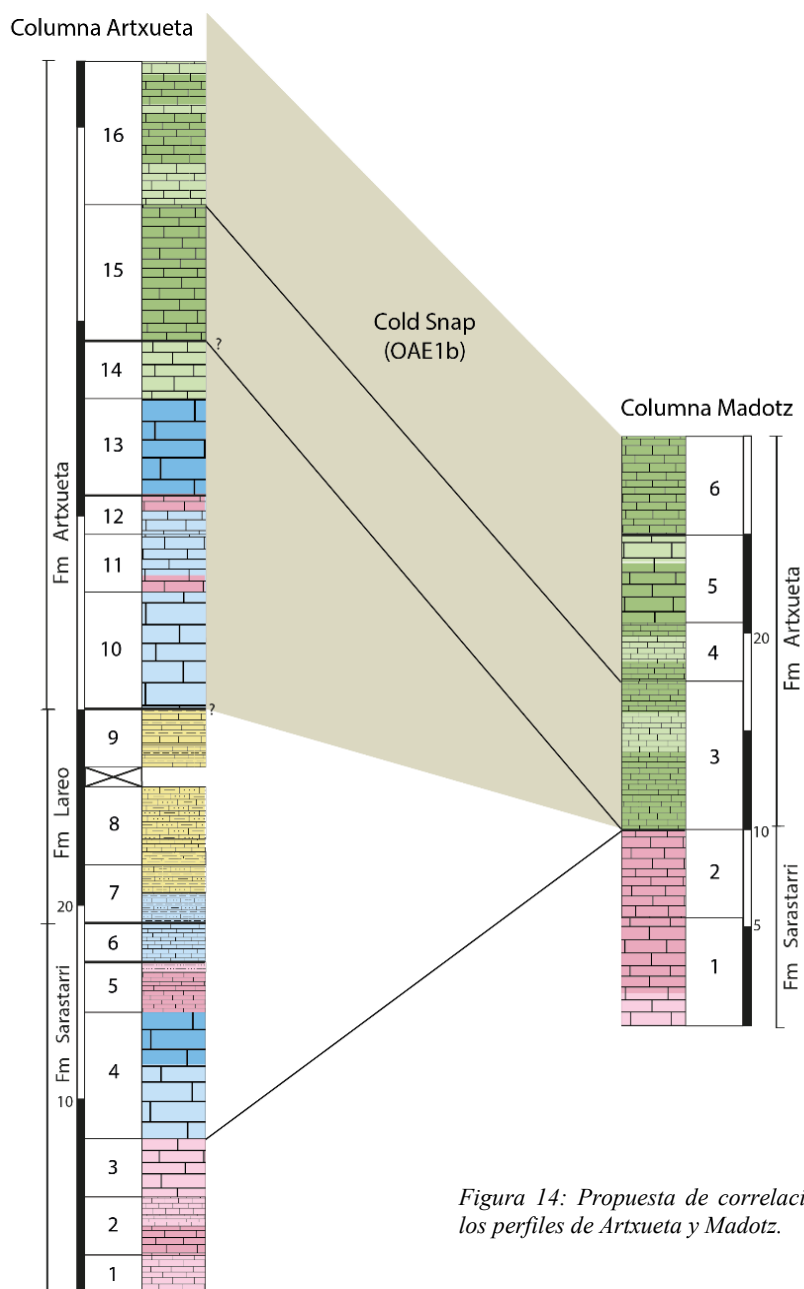


Figura 14: Propuesta de correlación entre los perfiles de Artxueta y Madotz.

La correlación entre ambos perfiles se ha interpretado mediante trabajos anteriormente publicados sobre la zona de estudio (Millán et al., 2011; Millán et al., 2014), que establecieron la correlación regional a partir de las relaciones isotópicas de $\delta^{13}\text{C}_{\text{carb}}$ (‰ VPDB), de datos bioestratigráficos (orbitolinas) y la evolución de facies.

En la sección de Artxueta, Millán et al. (2014) sugieren que el OAE1b se encuentra durante aproximadamente la mitad inferior de la Fm. Artxueta. En la columna realizada en este trabajo, esa

extensión supera la totalidad de la porción de Fm. Artxueta estudiada, representado en la *Figura 14* como el sombreado correspondiente al OAE1b superando verticalmente la columna.

En el perfil de Madotz este intervalo queda acortado por un hiato en la sedimentación (*Figs. 3 y 15*), y se representa en la columna por la extensión completa de la Fm. Artxueta. En el campo, la Fm. Sarastarri y la Fm. Artxueta se diferencian únicamente por el tipo de su estratificación, al ser la primera una unidad de caliza masiva y la segunda estar bien estratificada (*Fig. 6*). Se consideró además la abundancia de *Chondrodonta* como indicador del OAE1b (Millán et al., 2014) por encima de la discontinuidad entre ambas formaciones para realizar la correlación entre la parte superior de los dos perfiles analizados. La amplia presencia de estos bivalvos permite asemejar la sedimentación del Aptiense en la secuencia sedimentaria de Aralar con otras cuencas que reflejan también periodos de *cold snap*, reafirmando así que el periodo *greenhouse* del Cretácico Inferior se vio interrumpido en numerosas ocasiones por periodos fríos (Millán et al., 2011; Millán et al., 2014; Del Viscio et al., 2021; entre otros).

Algunos autores (Millán et al., 2005; García-Mondéjar et al., 2009) sugieren un periodo de exposición subaérea de la plataforma datado de finales del Aptiense inferior, coincidente con el hiato que genera la falta de la Fm Lareo y la base de la Fm Artxueta en Madotz (García-Mondéjar et al., 2009), que podría también explicar los momentos de inestabilidad que generarían el desequilibrio en las asociaciones faunísticas resultantes en una dominancia de *Chondrodonta* en momentos puntuales a lo largo de ambos perfiles fuera de los OAE1a y OAE 1b.

7.2 Implicaciones: Evolución de facies

La correlación de perfiles propuesta en la *Figura 15* se ha realizado siguiendo el esquema de Millán et al., (2011) (*Fig.3*). Se propone un esquema cronoestratigráfico que muestra la relación lateral de facies entre los perfiles de Artxueta y Madotz, además del hiato en la sedimentación considerado por Millán et al. (2009). Este esquema muestra una representación coherente de la relación lateral y vertical entre las facies, así como de las superficies de erosión y los hiatos sedimentarios asociados a la laguna estratigráfica del límite Aptiense inferior a superior.

7.2.1 Fm. Sarastarri

La Fm. Sarastarri se asienta sobre la Fm. Errenaga, de naturaleza calcarenítica propia de un ambiente de plataforma externa media-distal (Lertxundi y García-Mondéjar, 1997; Lertxundi, 1997). Tomando el techo de la Fm. Errenaga y la Fm. Sarastarri se puede definir una secuencia sedimentaria (Millán et al., 2009), que supone un ciclo de profundización de la plataforma.

La sedimentación de la Fm. Sarastarri supone un ambiente de plataforma somera de baja energía en general. La morfología de la plataforma de Aralar supone que la zona Oeste fuera una zona de mayor profundidad que la Este, en la que se encuentran los perfiles estudiados. En zonas como el domo de Ataun la presencia de bivalvos incrustantes es muy inferior (Lertxundi y García-Mondéjar, 1997).

El techo de la formación representa un momento de somerización rápida, en la que se alcanza la emersión de la plataforma (García-Mondéjar, 2009), representada por una superficie de erosión y potentes acumulaciones de rudistas y *Chondrodonta*. Esta erosión es más potente hacia el Este, donde llegan a encontrarse evidencias de paleokarst y se estima la falta de decenas de metros de secuencia estratigráfica (Millán et al., 2009). En los perfiles estudiados, esta diferencia en la erosión permite que se conserven facies de mayor profundidad en el perfil de Artxueta, ya que el perfil de Artxueta se

encuentra unos 7,5 km al Oeste del perfil de Madotz, y en él se conservan una mayor variedad de facies que en la sección de Madotz.

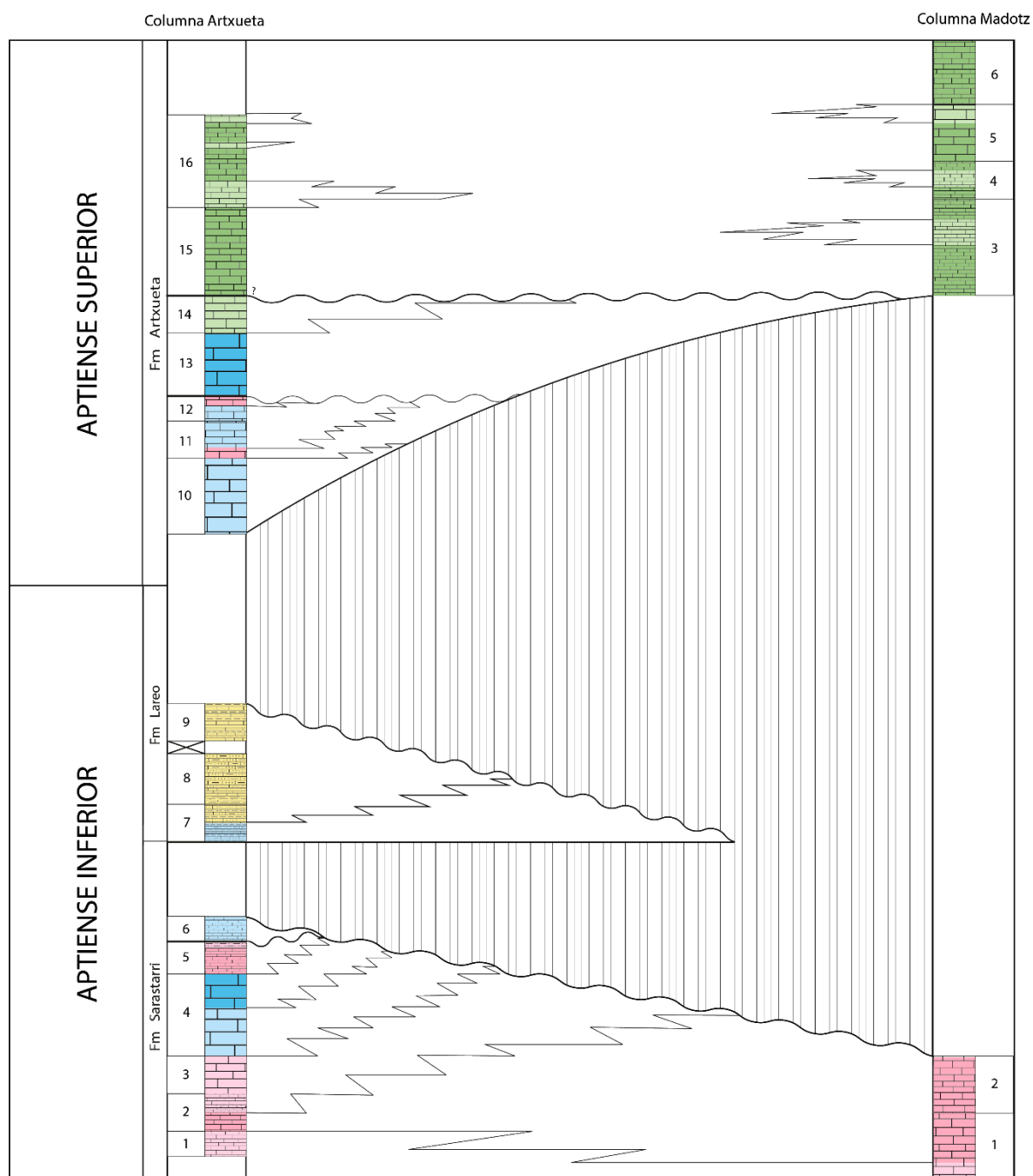


Figura 15: Esquema cronoestratigráfico de los perfiles de Artxueta y Madotz. La representación no se ha hecho a escala, sino que se trata de una propuesta aproximada, siguiendo el esquema de Millán et al., 2011.

7.2.2 Fm. Lareo

La base de la Formación Lareo supone una discontinuidad con respecto a la Formación Sarastarri sobre la que se asienta. Presenta una diferencia en potencia de cientos de metros, desde más de 300 m en la zona del domo de Ataun a no aparecer en la secuencia en Madotz.

García-Mondéjar et al., 2009 indican que la prospección en campo de la Fm. Lareo muestra un onlap en dirección Este sobre la discontinuidad basal. La zona de Ataun, unos 11 km al Oeste del pico Artxueta, es la zona de mayor potencia de la formación, así como la zona de mayor profundidad de depósito. Supone un momento en el que la plataforma pasa de ser enteramente carbonatada a mixta (carbonatada y siliciclástica), durante un periodo de pico transgresivo (García-Mondéjar et al., 2009).

La Fm. Lareo sólo aflora en el perfil de Artxueta. Se caracteriza por una litología margosa y calcarenítica, con abundancia de gasterópodos, equinodermos y orbitolinas de gran tamaño con morfología discoidal. Esta asociación es característica de la plataforma externa proximal, en medios de alta energía y baja luminosidad (Millán et al., 2014; Hottinger, 1997).

El techo de la Fm. Lareo en la sección de Igaratza (Fig. 2) presenta facies correspondientes a un periodo transgresivo, descritas por García-Mondéjar et al., 2009 como facies de orbitolinas. Se propone, por la posición de Igaratza con respecto al pico Artxueta y por la naturaleza de las facies que caracterizan la Fm. Lareo en esta sección, que el segmento de Fm. Lareo aflorante en Artxueta se encuentra cerca de la base de la formación.

7.2.3 Fm. Artxueta

La Fm Artxueta es la última de las formaciones aflorantes en los perfiles estudiados, de edad Aptiense superior. Pasa lateralmente hacia el Este a la Fm San Gregorio, de mayor profundidad de sedimentación. Supone una unidad de calizas típicamente Urgonianas (García-Mondéjar et al., 2009).

El segmento estudiado de esta formación coincide con el *cold snap* correspondiente al OAE1b (Millán et al., 2014), que coincide con un aumento de *Chondrodonta*, presente tanto en fragmentos como en asociaciones en posición de vida. Estos bivalvos son más resistentes a los cambios ambientales rápidos que otros animales, como rudistas o corales coloniales, por lo que cambios en la temperatura como los generados por los diferentes pulsos del OAE1b pudieron desequilibrar las asociaciones bióticas y propiciar la proliferación de *Chondrodonta* de manera dominante. Este intervalo presenta características similares en otras cuencas del Thetys y cercanas (Millán et al., 2014; Posenato et al., 2018; Del Viscio et al., 2021).

La base de la Fm. Artxueta es una superficie erosiva a lo largo de toda su extensión (Lertxundi, 1997; García-Mondéjar et al., 2009). Su depósito está controlado por los diferentes pulsos tectónicos y los cambios climáticos asociados a los sucesivos *cold snaps*. Hacia el Este se asienta sobre un hiato estratigráfico cada vez de mayor entidad (Fig. 15).

Se propone un onlap hacia el Este, causado por la profundización paulatina de la plataforma. El ambiente deposicional dominante en los dos perfiles estudiados corresponde a un ambiente de rampa media-interna.

8. CONCLUSIONS

Facies analysis and correlation between the Aptian sections from the Artxueta peak and Madotz (Aralar Mountans, Basque-Cantabrian Basin, North Iberian Peninsula) allow to study the effects that climate and synsedimentary tectonics have in shallow water carbonate platforms.

The described facies follow a proximal-distal distribution in relation to the coastline throughout the shallow water platform zone. Their lateral change is progressive, from facies that indicate a deeper depositional environment towards the West, to a shallower situation towards the East. The studied

sections contain mostly sedimentary materials that show an internal to middle platform depositional environment, belonging to a lagoon and the corresponding marginal domains. The sections include three formations, two of which of Early Aptian age, and the last one of Late Aptian age.

The first one of them is the Sarastarri Formation, limited on its uppermost part by an erosive surface interpreted to be caused by a tectonic shallowing phase, resulting in an aerial exposition period. Prior to this movement, the platform followed a general deepening sequence, evidenced by the superposition of proximal external platform facies over restricted internal platform facies, preserved only on the westernmost section (Artxueta section).

The Lareo Formation follows the erosive surface that makes the top of the Sarastarri Formation. This formation registers a transgressive peak and a sudden platform drowning. Only the lowest part of the Lareo Formation encompassing the earliest part of the transgressive period is preserved in the western section, while it has been completely eroded in the eastern section. The dominant facies indicate a proximal external platform depositional environment, with the highest siliciclastic sediment rates registered in both sections. The upper part of this formation registers a new erosive surface that makes the erosional vacuum much larger towards the East.

The last of the formations in the studied section is the Artxueta Formation, of Late Aptian age. The sediments that compose it show a deepening tendency, as they span from open lagoon facies to marginal bioherm facies. An onlap with evolution towards the East during an early transgressive phase has been interpreted as the cause of the lowest part of the Artxueta Formation not being present in the Madotz section. This correlation interpretation is coherent with others presented in previous work, meaning that the Madotz section registers a sedimentary hiatus that starts at the uppermost part of the Sarastarri Formation, and continues until the middle part of the Artxueta Formation.

Environmental instability periods due to sudden drops in temperature can be estimated by the faunistic association present, like the proliferation of certain opportunistic, more resistant organisms such as *Chondrodonta* over other benthonic forms it is usually associated with. The studied sections in particular reflect part of the OAE1b and previous instability episodes, during which an ideal “window” for *Chondrodonta* proliferation existed.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Arthur, M. A., Jenkyns, H. C., Brumsack, H. -J., & Schlanger, S. O. (1990). Stratigraphy, Geochemistry, and Paleoceanography of Organic Carbon-Rich Cretaceous Sequences. In R. N. Ginsburg, & B. Beaudoin, *Cretaceous Resources, Events and Rhythms. Background and Plans for Research* (Vol. 308, pp. 75-119). Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
- Del Viscio, G., Frijia, G., Posenato, R., Singh, P., Lehrmann, D. J., Payne, J. L., Al-Ramadan, K., Struck, U., Jochum, K. P., Morsilli, M. (2021). Proliferation of *Chondrodonta* as a Proxy of Environmental Instability at the Onset of OAE1a: Insights From Shallow-Water Limestones of the Apulia Carbonate Platform. *Sedimentology*, 68, 3191-3227.
- Dunham, R. J. (1962). Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Textures. In W. E. Ham, *Classification of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir 1* (pp. 108-121).

- Duvernois, C. H., Floquet, M., & Humberl, B. (1972). *La Sierra d'Aralar (Pyrénées Basques Espagnoles): Stratigraphie, Structure*. Dijon: Inst. Sci. Terre Univ. Dijon, p. 264.
- García-Mondéjar, J., Owen, H. G., Raisossadat, N., Millán, M. I., & Fernández-Mendiola, P. A. (2009). The Early Aptian of Aralar (northern Spain): Stratigraphy, Sedimentology, Ammonite Biozonation, and OAE1. *Cretaceous Research*, 30, 434-464.
- Hottinger, L. (1997). Shallow Benthic Foraminiferal Assemblages as Signal for Depth of Their Deposition and Their Limitations. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 168(4), 491-505.
- Lertxundi, D. (1997). El Aptiense del Sur de la Sierra de Aralar. *Trabajo de investigación de Programa de Doctorado. Universidad País Vasco, Leioa*, p 19.
- Lertxundi, D., & García-Mondéjar, J. (1997). El Surco de Aia-Zaldibia (Aptiense Inferior, Aralar, Gipuzkoa). *Geogaceta*, 22, 105-108.
- Masse, J.-P. (2000). Early Aptian (112-114 Ma). In J. Decourt, M. Gaetani, B. Vrielynck, E. Barrier, B. Bijou-Duval, M. F. Brunet, J. P. Cadet, S. Crasquin, M. Sandulescu. *Atlas Peri-Tethys Paleogeographical Maps* (pp. 119-127). Paris: Gauthier-Villars.
- Millán, M. I., Agirrezabala, P. A., Fernández-Mendiola, P. A., & García Mondéjar, J. (2005). El Surco Calcarenítico Intraplataforma de Desmendi: Origen y Evolución (Aptiense Inferior, Aralar-Navarra). *Geotemas*, 8, 73-76.
- Millán, M. I., Fernández-Mendiola, P. A., & García-Mondéjar, J. (2007). Pulsos de Inundación Marina en la Terminación de una Plataforma Carbonatada (Aptiense Inferior de Aralar, Cuenca Vasco-Cantábrica). *Geogaceta*, 41, 127-130.
- Millán, M. I., Weissert, H. J., & López-Horgue, M. A. (2014). Expression of the Late Aptian Cold Snaps and the OAE1b in a Highly Subsiding Carbonate Platform (Aralar, Northern Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 411, 167-179.
- Millán, M. I., Weissert, H. J., Fernández-Mendiola, P. A., & García-Mondéjar, J. (2009). Impact of Early Aptian Carbon Cycle Perturbations on Evolution of a Marine Shelf System in the Basque-Cantabrian Basin (Aralar, N Spain). *Earth and Planetary Science Letters*, 287, 392-401.
- Millán, M. I., Weissert, H. J., Owen, H., Fernández-Mendiola, P., & García-Mondéjar, J. (2011). The Madotz Urganian Platform (Aralar, northern Spain): Paleoeological changes in response to Early Aptian Global Environmental Events. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 312, 167-180.
- Posenato, R., Morsilli, M., Guerzoni, S., & Bassi, D. (2018). Paleoeology of Chondrodonta (Bivalvia) from the Lower Aptian (Cretaceous) Apulia Carbonate Platform (Gargano Promontory, Southern Italy). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 508, 188-201.