

**Formación La Paja: descripción de la sección tipo.
Influencia de los tapices microbiales en su génesis**

*It is obvious that the results of work in the field and in
the laboratory should be interrelated*

Philip Henry Kuenen

Portadilla: microfotografía de *mudstone* calcáreo con materia orgánica que ilustra una concentración de algas *Dasycladaceas* (dma 5020; objetivo 50x).

Citación: Montoya Arenas, Diana M. 2019. "Formación La Paja: descripción de la sección tipo. Influencia de los tapices microbiales en su génesis". En *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena*, dirección científica y edición de Fernando Etayo-Serna. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia vol. XXIII. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

A b s t r a c t

A detailed study of the La Paja Formation type section was carried out in the outcrops of its eponymous stream, currently flooded by the Hidrosogamoso Dam reservoir.

A 288 m thick sequence was measured and divided, from bottom to top, into the following five segments: Stratigraphic segment I, composed of alternating strata of organic matter-rich calcareous mudstones (organic matter-rich bindstones) and limestone mudstones (recrystallized bindstones) originating in biomineralized microbial tapestries with microcrystalline calcite (microbialites) accompanied by organic matter and Dasycladaceae algae in aggregates, individual fragments and reproductive elements of the algae.

Stratigraphic segment II is lithologically similar to segment I; however, it is highlighted that calcite sheets and lenses interpreted in the present study as dried seaweed tapestries are present; remobilized nodular gypsum, gypsum crystals sheets with perpendicular growth to So, and domed bodies "gas domes" were also identified.

Segment III, mostly covered, is represented by organic matter-bearing clayey mudstone (bindstones with clays and organic matter). Segment IV, recognized as more competent and lithologically homogeneous than the lower intervals, is composed of limestones (mudstones), with marked flat parallel lamination and, as in segments I and II, recrystallized microbialites, which indicates similar conditions in the depositional environment that was more durable than in the lower segments.

In the upper segment V, the presence of clay is constant; clayey mudstones predominate (clayey and organic matter-rich bindstones), which towards the cuspidal section are more calcareous and alternate with sporadic layers of limestone mudstones (recrystallized bindstones).

Three degrees of recrystallization were recognized under the microscope for the mudstone limestones of the La Paja Formation: in the low degree, the laminar forms of the microbial tapestries are conserved; in the medium degree of recrystallization, the laminar textures have almost disappeared; and in the high degree of recrystallization, the texture has been homogenized. In calcareous mudstones with organic matter, under the microscope, thick laminated textures are sometimes recognized with micrite peloids, while in clayey mudstones with organic matter, the textures are defined by the form of presentation of the clay in thin to medium sheets, in lenses and as a patina with oriented clay of fine micaceous habit.

As a result of this investigation, it is proposed that the depositional environment of the Paja Formation sediments was restricted to the domains between the upper tidal and the supra-tidal regions. The age assigned to this formation ranges from the Barremian to the lower Albian.

Formación La Paja: descripción de la sección tipo. Influencia de los tapices microbiales en su génesis

2

Diana M. Montoya Arenas

RESUMEN

Se realizó el estudio detallado de la Formación La Paja en su sección tipo, localizada en la quebrada homónima y actualmente inundada a causa de la presa de Hidrosogamoso. Se midió un espesor de 288 m de secuencia, dividida en cinco segmentos estratigráficos, descritos en orden ascendente así: **segmento estratigráfico I**, compuesto por *mudstone* calcáreos con materia orgánica (*bindstone* con materia orgánica), alternantes con calizas *mudstone* (*bindstone* con recristalización); estas rocas se originan en tapices microbiales biomineralizados con calcita microcristalina (microbialitas); están acompañados de materia orgánica, algas *Dasycladaceas* en agregados o fragmentos individuales y elementos reproductores de algas. **Segmento estratigráfico II**, litológicamente similar al anterior; sin embargo, en él se destaca la presencia de láminas y lentes de calcita fibrosa que en el presente estudio se han interpretado como tapices de algas desecados; se identifican yesos nodulares removilizados y láminas de cristales de yeso con crecimiento perpendicular a S_0 , además de cuerpos con forma de cúpula: domos de gases. **El segmento estratigráfico III**, en su mayor parte cubierto, está representado por *mudstone* arcillosos con materia orgánica (*bindstone* con arcillas y materia orgánica). **El segmento estratigráfico IV** se reconoce por ser más competente que los inferiores y litológicamente más homogéneo; lo integran calizas *mudstone* con una marcada laminación plana paralela y, al igual que en los segmentos I y II, se identifican microbialitas con recristalización, lo que habla de condiciones similares del medio de depósito, más duraderas que en los segmentos anteriores. En el **segmento superior V**, la presencia de arcilla es constante; predominan *mudstone* arcillosos (*bindstone* con arcilla y materia orgánica), que hacia el tramo cuspidal son más calcáreos; alternan con capas esporádicas de calizas *mudstone* (*bindstone* recristalizados).

Las calizas *mudstone* de esta formación presentan en el microscopio tres grados de recristalización: en el bajo se conservan las formas laminares de los tapices microbiales; en el grado de recristalización medio, las texturas laminares casi han desaparecido, y en el grado de recristalización alto, la textura se vuelve homogénea.

En los *mudstone* calcáreos con materia orgánica, se reconocen en el microscopio texturas con laminación gruesa, en ocasiones con peloides de micrita; mientras que en los *mudstone* arcillosos con materia orgánica las texturas son definidas por la forma de presentación de las arcillas: en láminas delgadas a medianas, en lentes y como pátina, con arcillas orientadas de fino hábito micáceo.

Como resultado de la investigación, el medio de depósito de estos sedimentos se restringe al dominio de fondo comprendido entre la región intermareal superior y la supramareal.

INTRODUCCIÓN

En el año 2013, el Servicio Geológico Colombiano (SGC), mediante cartografía geológica y levantamientos estratigráficos, adelantó un estudio detallado en las localidades tipo de las unidades cretácicas de la región del Valle Medio del Magdalena, adoptadas por Morales y The Colombian Petroleum Industry (1958). La presente investigación registra el mayor número de las características de dichas unidades litológicas, ante la inundación de las secciones tipo de la estratigrafía del Cretácico del Valle Medio del Magdalena.

Como parte de esta investigación se realizó el levantamiento de la Formación La Paja, nombre propuesto por Wheeler (1929), quien estudió las rocas que afloran en la quebrada La Paja (**fig. 1**); Morales y The Colombian Petroleum Industry (1958, 648-649) admiten estos afloramientos como la sección tipo.

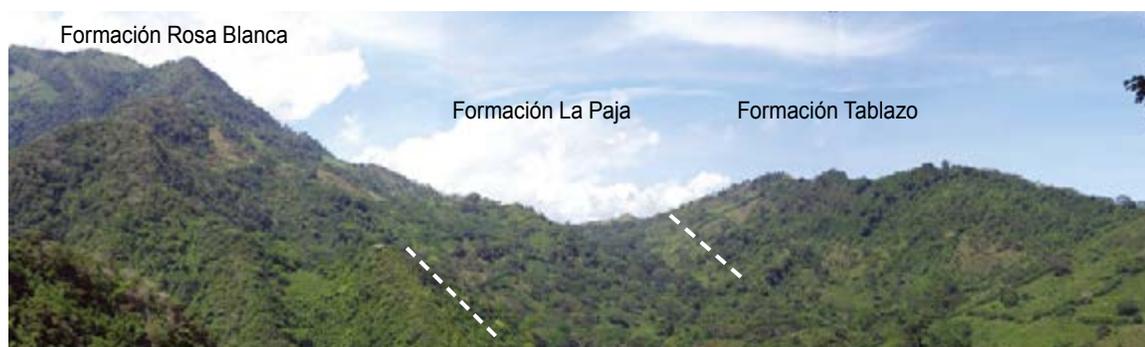


Figura 1. Panorámica de la Formación La Paja (entre líneas punteadas). Obsérvese la morfología suave que genera la unidad. Fotografía tomada desde el punto con coordenadas: N:1.271.422, E:1.083.530, Z:390, azimut 224°.

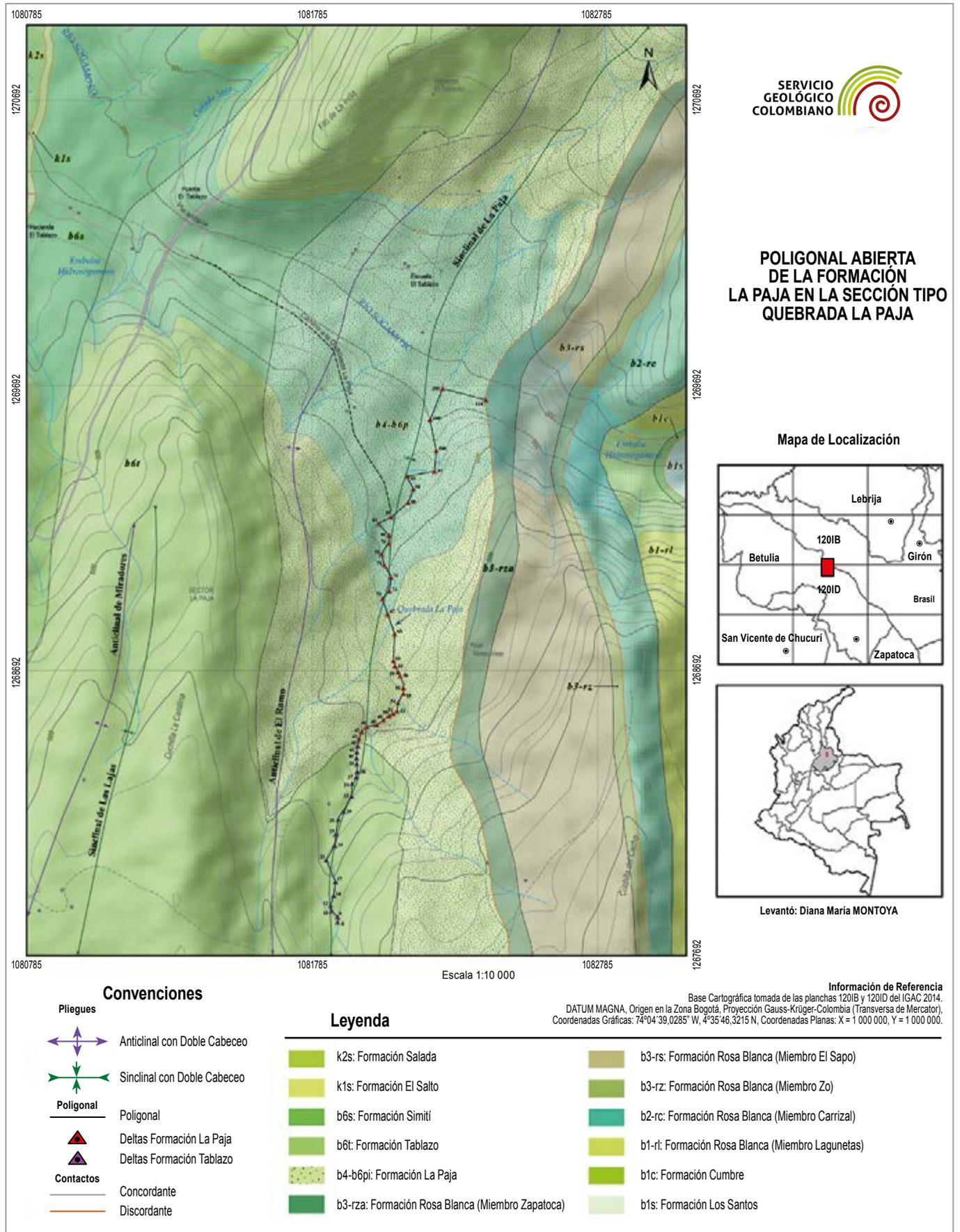


Figura 2. Localización y poligonal (mapa geológico del sector Tablazo, tomado de Moreno-Sánchez 2019).

METODOLOGÍA

Por la quebrada La Paja se realizó el estudio de las rocas aflorantes (**fig. 1**), que fueron descritas y amarradas a una poligonal abierta levantada con brújula y cinta métrica (**fig. 2**). En la poligonal se marcaron 116 puntos o deltas (Δ), de los cuales 70 Δ corresponden a sitios en donde se estudiaron las rocas de la Formación La Paja (Δ 116- Δ 46).

En el Δ 116 (N:1.269.639, E:1.082.371, Z:193) afloran las capas cuspidales de la Formación Rosa Blanca en contacto con las rocas basales de la Formación La Paja. El Δ 116 está localizado 120° al este y a una distancia de 156 m del sitio de la antigua confluencia de la quebrada La Paja con el río Sogamoso, localizada en el Δ 109 (N:1.269.760, E:1.082.224, Z:202).

La poligonal continúa desde Δ 109, aguas arriba (hacia el sur) por el cauce de la quebrada La Paja, que coincide de modo aproximado con el eje de una estructura sinclinal (Moreno-Sánchez 2019).

La secuencia se corta de base a techo; presenta diez tramos cubiertos por depósitos coluviales (**fig. 3**), tres de los cuales comprenden espesores de decenas de metros, el primero, desde el Δ 109 hasta el Δ 98 (39 m), el segundo desde el Δ 99 hasta el Δ 94 (19 m) y el tercero desde Δ 74 hasta el Δ 56 (56 m). En la quebrada se observan bloques rodados de dimensiones métricas tanto de las rocas calcáreas y siliciclásticas de la unidad suprayacente, como de la Formación La Paja.

Entre los puntos Δ 43- Δ 42 se observan las rocas basales de la Formación Tablazo (N:1.268.497, E:1.081.973, Z:399), y los metros cuspidales de la Formación La Paja se presentan en Δ 46 (N:1.262.497, E:1.081.973, Z:399).



Figura 3. Depósitos coluviales de bloques en el lecho de la quebrada La Paja (Δ 63, N:1.268.890, E:1.082.103, Z:317).

La poligonal continúa aguas arriba hasta el punto Δ 0 (N:1.267.830, E:1.081.872, Z:541), en donde siguen aflorando las rocas de la parte inferior de la Formación Tablazo.

El espesor de la sucesión litológica se midió mediante el método del bastón de Jacob. El recálculo del espesor se hizo mediante aplicación de la fórmula de Mertie (1922).

La sucesión de las rocas descritas por la quebrada La Paja se dividió en segmentos estratigráficos con base en la homogeneidad de la litología; esta información se condensó en la columna estratigráfica, en donde se amarró a la poligonal por medio de los deltas (Δ). Las porciones de la secuencia que están cubiertas se representan en el dibujo por medio de líneas punteadas. Las muestras paleontológicas y petrográficas se registraron en formatos adoptados para la descripción litológica.

La descripción de campo de las rocas aflorantes en la quebrada fue macroscópica, mediante el uso de la lupa de diez aumentos. Para describir el espesor y la forma de las capas se utilizaron, hasta donde fue posible, los criterios de Campbell (1967) e Ingram (1954).

Para las rocas de grano fino (< 62,5 μ m) se utilizó el nombre de *mudstone* en lugar de lodolita y para indicar su composición se siguieron las recomendaciones de Lazar et al. (2015). De acuerdo con estos autores, el nombre de la roca debería reflejar la heterogeneidad de sus constituyentes; así, la segunda palabra del nombre es composicional y refleja las condiciones de origen, es decir, si los sedimentos son el producto de materiales adicionados al fondo de acumulación (minerales de arcilla, carbonatos, etc.), o son producidos en ella (materia orgánica, carbonatos producto de procesos biológicos o microbiales, etc.). En el diagrama ternario planteado por Lazar et al. (2015), en los vértices están los porcentajes totales (100%) de carbonatos, arcillas (illita, esmectita) y cuarzo; el diagrama puede ser modificado en uno de sus vértices para reflejar los componentes dominantes: presencia de materia orgánica (TOC), fosfatos, etc.

Nótese que para la nomenclatura de las rocas de la Formación La Paja utilizada en campo, como *mudstone*, coincidentes con entrantes en el perfil topográfico, se sitúan en los vértices del diagrama ternario (Lazar et al. 2015) arcilla, carbonatos y materia orgánica.

Utilizando la metodología de Lazar et al. (2015), después de la palabra *mudstone* sigue el nombre que refleja el componente con contenido mayor del 50%, y se usará más de un nombre si ningún contenido sobrepasa el 50%.

El orden de los calificativos del nombre de la roca se da con base en las proporciones de sus componentes, de mayor a menor. Entonces un *mudstone* calcáreo con materia orgánica es la roca cuyos componentes principales son carbonatos y materia orgánica; un *mudstone* arcilloso con materia orgánica es la roca compuesta por minerales de arcilla y materia

orgánica. Así, se utilizaron los nombres *mudstone* calcáreo arcilloso con materia orgánica, para la roca compuesta por carbonato, arcilla y materia orgánica, y *mudstone* arcillosos calcáreos con materia orgánica es la roca constituida por arcilla, carbonatos y materia orgánica.

Mediante la observación en el microscopio se distingue en estas rocas la presencia de tapices microbiales y se entiende que la formación de carbonato de calcio (calcita microcristalina) está influenciada por la acción de microbios, lo que a su vez permite la litificación; a este tipo de rocas, Burne y Moore (1987) las denominan microbialitas.

Siguiendo las técnicas convencionales de trabajo de campo, es importante destacar que en el terreno la roca se identificó como *mudstone* calcáreo con materia orgánica o *mudstone* arcilloso con materia orgánica, etc. En el microscopio, si solo

se trabaja con los objetivos 3,5x a 10x, esta roca se identificaría como una biomicrita con materia orgánica, dependiendo de la proporción de sus constituyentes. Sin embargo, con objetivos 20x y 50x es posible detectar los tapices microbiales y comprobar que los carbonatos tienen texturas de origen microbial, y que se trata de crecimientos o construcciones *in situ* laminares (fig. 4). Por ello se emplearon los criterios de clasificación textural propuestos de Embry y Klovan (1971): el término *bindstone* se refiere a las construcciones laminares, seguida de la palabra microbialita, que indica la influencia directa o indirecta de procesos biológicos en su litificación. En el caso de los *mudstone* arcillosos se adiciona la expresión con arcilla después de *bindstone*.

En el microscopio, por no tener valores de TOC, no se utiliza el término *carbonoso* y en su reemplazo se dice que la roca tiene materia orgánica y el componente de colores negro o pardo de

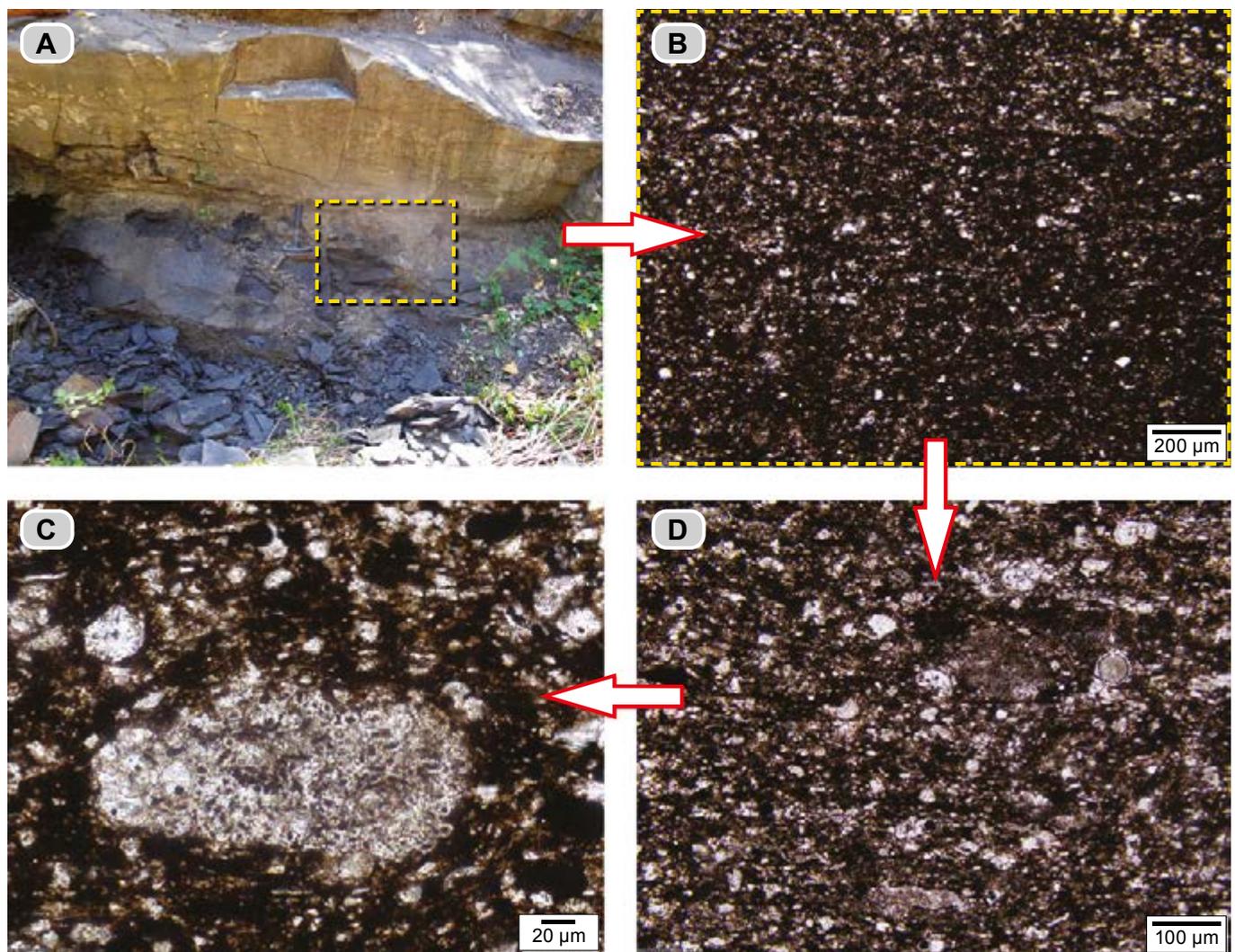
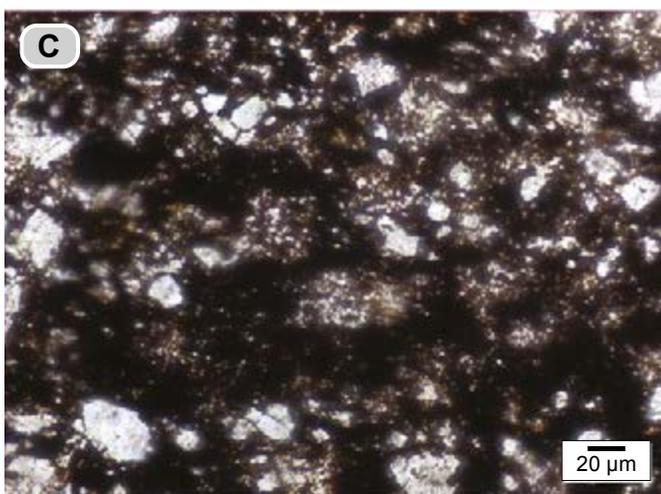
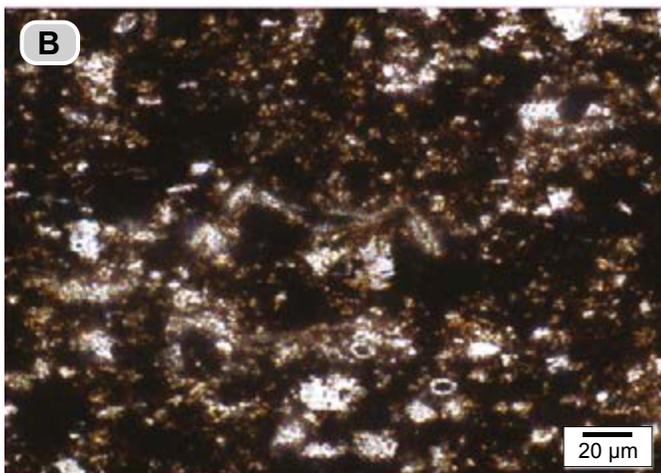
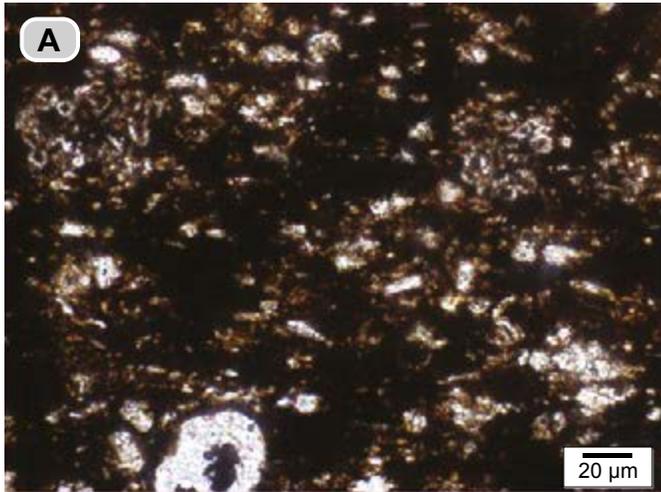


Figura 4. Procedimiento utilizado para el estudio de las rocas de la Formación La Paja. **A)** Identificación de la roca en afloramiento con la lupa de aumento 10x; en este caso se denomina *mudstone* calcáreo con materia orgánica (recuadro amarillo). **B)** La sección delgada (dms 5020: recuadro), vista en el microscopio con objetivo de aumento 10x: biomicrita rala con materia orgánica. **C y D)** Al utilizar los objetivos 20x **D)** y 50x **C)** se distingue que lo que con aumento 10x aparece blanco o amarillo, en realidad corresponde a estructuras orgánicas identificadas como tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina, en este caso acompañada con fragmentos de algas *Dasycladaceas*, estos últimos como cuerpos individuales o como intraclastos. La roca se identifica por su composición y textura como *bindstone* con materia orgánica (microbialita).

carácter isotrópico, se considera como materia orgánica. Aplicando el método sugerido por Folk (1987), se diferenciaron la materia orgánica, los sulfuros y los hidrocarburos.

En sección delgada, un tapiz microbial se ve como un entramado de calcita microcristalina (Chafetz y Buczynski 1991, fig. 1A), en tonos pardos, por la presencia de materia orgánica, con textura de tamiz o cedazo: es decir, se reconocen po-



ros negros con tamaños menores de 5 μm , distribuidos aleatoriamente, unidos por carbonato de calcio microcristalino y enmascarados por un tono pardo (materia orgánica) (fig. 5).

En las rocas de grano muy fino ($< 62 \mu\text{m}$), *mudstone* calcáreos con materia orgánica y *mudstone* arcillosos con materia orgánica, se han diferenciado petrográficamente las siguientes texturas (fig. 6):

Textura A, exhibida por los *mudstone* calcáreos con materia orgánica, en donde la principal característica es la proporción alta de materia orgánica sobre los tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina.

Textura B, son los *mudstone* calcáreos con proporciones altas de materia orgánica, y se caracteriza por presentar peloides de micrita.

Textura C, son *mudstone* arcillosos, y aunque se evidencia la presencia de cantidades importantes de materia orgánica, la arcilla está presente y forma una película abiótica que está adherida a los tapices microbiales (Konhauser 1998), los cuales muestran tres disposiciones (fig. 7):

Textura Laminar, es aquella en donde se observa alternancia entre láminas de tapices microbiales que conforman intervalos claramente delimitados por hilos de materia orgánica, en los que la arcilla se adhiere y forma una superficie abiótica (Konhauser 1998); estos agregados de arcilla toman color azul, bajo nicoles cruzados, al insertar el compensador 1λ y después de rotar la platina a posición NE-SW (fig. 7).

Textura Lenticular, son agregados de arcilla de fino hábito micáceo que dibujan lentes de diferentes dimensiones sobre los tapices microbiales (fig. 7).

Textura Pulverulenta, se reconoce como una pátina de finas partículas de micas, en general orientadas ópticamente, con extinción en conjunto (Pettijohn 1975) (fig. 7).

Las rocas calcáreas (con más de 50% de CaCO_3), que corresponden a salientes en el perfil topográfico, se identificaron en campo teniendo en cuenta la proporción de sus constituyentes y su textura; siguiendo la clasificación propuesta por Dunham (1962); de esta manera, se llamaron calizas *mudstone*, calizas *wackestone*, etc. Si se presentan cantidades apreciables de arcilla, se adiciona el adjetivo ar-

Figura 5. En sección delgada (dma 5020), los tapices microbiales aparecen como un entramado de calcita microcristalina en tonos pardos por la presencia de materia orgánica, que tienen textura de tamiz o cedazo: se distinguen poros diseminados negros de tamaños entre 2 y 5 μm ; la materia orgánica también se aprecia en motas y laminillas. **A)** Se observan tapices microbiales con textura en tamiz; se destaca la presencia de grupúsculos de algas *Dasycladaceas*. **B)** Se observan tapices microbiales con textura de tamiz, el tono más claro se debe a la biomineralización por calcita microcristalina; también hay presencia de restos de algas *Dasycladaceas*. **C)** En este caso aparecen cristales de carbonatos con formas rómbicas y de tolva *hopper* (Robertson 1991) acompañando la presencia de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina y materia orgánica.

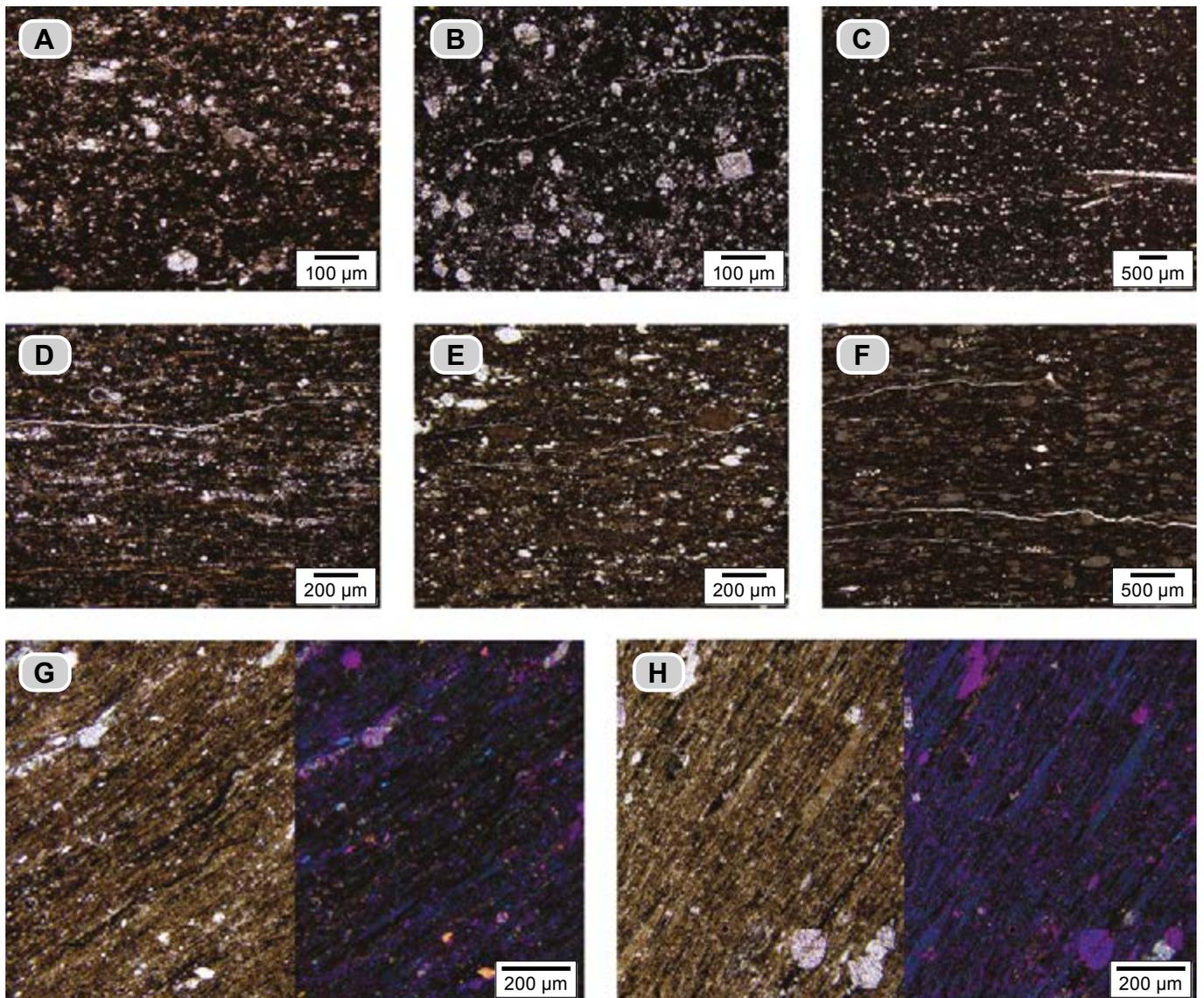


Figura 6. Texturas de los *mudstone* calcáreos y *mudstone* arcillosos con materia orgánica. **Textura A:** los *mudstone* calcáreos son de color casi negro, debido al alto contenido de materia orgánica; los demás constituyentes en general son carbonato de calcio (**A, B, C y D**). **A)** Son comunidades de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina y por restos de algas *Dasycladaceas*. **B)** En este ejemplo, además de calcita microcristalina (micrita) y materia orgánica, hay cristales cúbicos (halita?) reemplazados por calcita. **C)** En este caso acompañando a las microbialitas, son visibles conchas de foraminíferos reemplazadas por cristales de calcita espar. **D)** Los *mudstone* calcáreos a simple vista aparecen de color casi negro debido al alto contenido de materia orgánica; sin embargo, destacan lentes de color pardo claro por presencia de arcilla adherida a los tapices microbiales; hay presencia de lentes blancos que están constituidos por cristales de yeso y halita. **E y F) Textura B:** es similar a las anteriores en cuanto a la presencia de materia orgánica, calcita microcristalina que biomineraliza los tapices microbiales, pero aquí son notorios los peloides de micrita. En las texturas **A y B**, es común observar indicios de hidrocarburos que atraviesan láminas y rellenan espacios interlaminares. **G y H) Textura C:** corresponde a los *mudstone* arcillosos con materia orgánica, con o sin calcita microcristalina; presentan arcilla adherida a los tapices microbiales. Se diferencian tres modos de presentación de la arcilla: en **G**, la arcilla tiene textura pulverulenta (finos hábitos micáceos) y lenticular. En **H)** las arcillas resaltan como lentes y menos frecuente en fino hábito micáceo. **Nota:** el color azul de la arcilla se obtiene al girar la platina del microscopio a 45° en relación con la laminación, de cruzar nicoles e introducir el compensador 1λ.

cillosa, y si tienen cantidades apreciables de arena, el adjetivo es arenoso.

En el microscopio, cuando se trabaja con los objetivos 2,5x a 10x, la roca se identificaría como calizas *mudstone*, *wackestone* y *packstone* (Dunham 1962) y como micritas y biomicritas (Folk 1962); sin embargo, al observarlas con objetivos 20x y 50x es posible reconocer los tapices de origen microbial y los restos de algas.

Al determinar con el microscopio la naturaleza microbial de estas rocas se utilizaron los criterios de clasificación textural de Embry y Klovan (1971): *bindstone*, *bafflestone*, entre otros, seguida de la palabra microbialita, que indica la influencia directa o indirecta de procesos biológicos.

Las calizas *mudstone* estudiadas en el microscopio muestran varios estadios de recrystalización, que a su vez definen diferentes texturas (**fig. 8**):

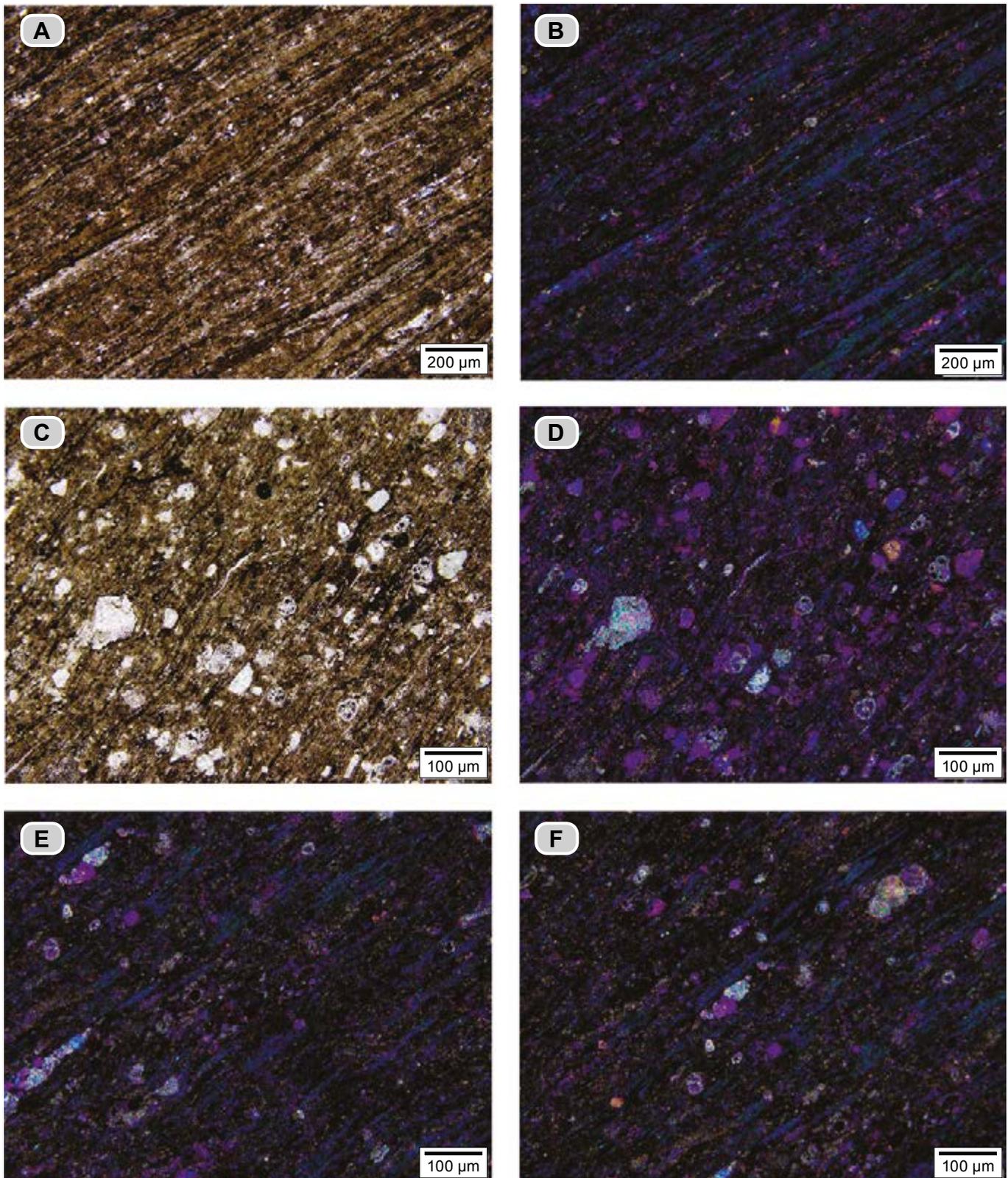


Figura 7. Texturas en los *mudstone* arcillosos de la Formación La Paja. **A y B)** Textura laminar (**dma 4841**): se observan láminas continuas y discontinuas de tapices microbiales con arcilla adherida que alternan con tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina y laminillas de materia orgánica que se interponen entre las anteriores. **C y D)** Textura pulverulenta (**dma 4822**): las arcillas tienen fino hábito micáceo; también se presentan conchillas de foraminíferos, cristales rómbicos de calcita y escasos cuarzos (puntos blancos). **E y F)** Textura lenticular (**dma 4993**): se observan lentes con arcilla de hábito micáceo fino, con extinción en conjunto; en este caso alternan con láminas de tapices microbiales biomineralizados con calcita microcristalina; además se reconoce la presencia de conchillas de foraminíferos. **Nota:** el color azul de la arcilla se obtiene al girar la platina 45° con respecto a la laminación, luego se cruzan los nicoles y finalmente se inserta el compensador 1λ.

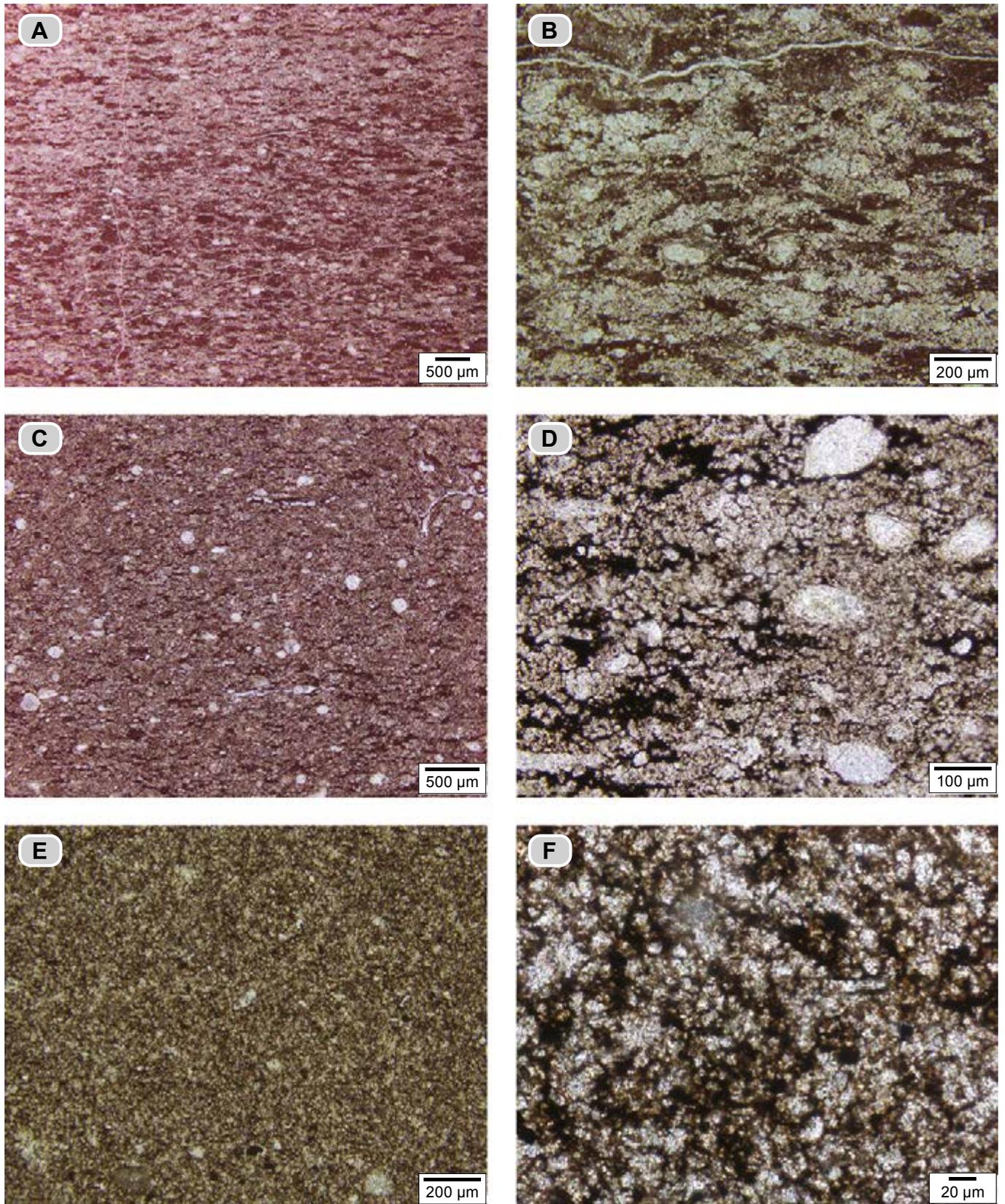


Figura 8. Estadios de recristalización **A y B)** Estadio de recristalización bajo (**dma 5023**): se conserva la laminación original; las láminas de color claro tienen recristalización que produce un agregado de cristales de calcita textura limo fino (espar) y alterna con lentes en tono pardo constituidos por tapices microbiales. **C y D)** Estadio de recristalización medio (**dma 5025**): se reconoce la textura original de manera difusa; en **D**, con mayor aumento se observan agregados de cristales neoformados, además de la presencia de conchas de ostrá-codos. **E y F)** Estadio de recristalización alto (**dma 5021**): no se observa la textura original, que ha sido obliterada, y el tamaño de los cristales de calcita es homogéneo por neoformación más avanzada.

Textura tipo I, en este estadio se conserva la laminación y se reconocen dos elementos: **a)** láminas blancas, constituidas por un agregado de cristales de calcita de textura limo fino y limo grueso por recristalización, alternantes con **b)** láminas oscuras de tapices microbiales con biomineralización de carbonato de calcio microcristalino y materia orgánica (**fig. 8**).

Textura tipo II, o estadio intermedio de recristalización; comienza el proceso de homogeneización parcial, y como resultado la textura laminada es difusa; se presentan agregados de cristales de calcita de textura limo, separados por tapices microbiales a modo de hilillos (**fig. 8**).

Textura tipo III, es el estadio de recristalización más alto; se ha obliterado la textura original: la homogeneización de la roca es total. El resultado es un agregado de cristales de calcita de textura limo (**fig. 8**).

Cuando los constituyentes calcáreos no están influenciados por microbios, en la identificación con el microscopio se utilizan los criterios de Folk (1962).

Con el microscopio, en las rocas se observa la presencia de varios cuerpos circulares calcáreos, algunos su naturaleza no se conoce con certidumbre. A continuación se describen los principales tipos (**fig. 9**):

1) Cuerpos circulares con estructura interna concéntrica, cuyos diámetros varían entre 120 μm y 200 μm ; aparecen reemplazados por cristales de calcita-espar (**fig. 9A**).

2) Cuerpos circulares con diámetros que varían entre 120 μm y 180 μm ; internamente son agregados de cristales de calcita espar. Generalmente su contorno es liso, aunque en ocasiones tienen prominencias; también se presentan cuerpos circulares similares, con menor tamaño, de hasta 70 μm (**fig. 9B**), elementos reproductores de algas? o esferas de calcita por la acción de bacterias? (Bundeleva et al. 2012).

3) Cuerpos circulares con diámetros desde 20 μm hasta 40 μm ; con centro de carbonato de calcio en un único cristal, rodeado por un anillo segmentado de varios cristales de calcita espar; estos cuerpos corresponden a quistes de dinoflagelados calcáreos (Reháková 2000, pl. II, fig -13) (**fig. 9C**).

4) Cuerpos circulares con diámetros desde 20 μm hasta 60 μm ; internamente rellenos con cristales de espar, menos común con un cristal único de espar y rodeado por un anillo de cristales subrectangulares de calcita. Se asocia a un quiste de dinoflagelado calcáreo. (Reháková 2000, pl. II, fig. 13) (**fig. 9D**).

5) Forma ovoide reniforme, con tamaños desde 40 μm hasta 60 μm ; internamente constituido por cristales de calcita espar radiales: *microcodium* (**fig. 9E**).

6) Cuerpos circulares con diámetros que van desde 20 μm hasta 40 μm ; con un centro de varios cristales de calcita espar; rodeados por un anillo oscuro, que está circundado por cristales radiales aciculares de calcita, posiblemente por reemplazo de cristales de aragonito (**fig. 9F**). Estos cuerpos corresponden a quistes de dinoflagelados calcáreos (Reháková 2000).

TERMINOLOGÍA

Biofilms: en sentido estricto, los *biofilms* son láminas de organismos sésiles embebidos en su mucílago y fijos a un sustrato (Gerdes 2010). Se caracterizan por: **i)** organismos fisiológicamente cooperativos; **ii)** con presencia de sustancias poliméricas extracelulares (EPS) que envuelven y unen al sustrato celdas y otros componentes inorgánicos y orgánicos; **iii)** capacidad de adherencia de las EPS; **iv)** afinidad entre interfase/sustrato; **v)** agregados microbiales; **vi)** contenido de agua.

Tapiz microbial (*microbial mat*): se produce cuando los biofilmes forman láminas sobre superficies estratiformes; reflejan vacíos en la acumulación, equivalentes a la duración de crecimiento de estas comunidades; están conformadas por la asociación de cianobacterias, eucarióticas, hongos, protoctistas y macroalgas (Gerdes 2010). El tapiz microbial presenta diferenciación vertical en bandas; la más alta está dominada por cianobacterias, seguida hacia abajo por una intermedia de bacterias fotosintéticas; la más baja está integrada por bacterias sulfato-reductoras (Stal, Gernerden y Krumbein 1985; Chafetz y Buczynski 1991).

Carbonatos microbiales: son depósitos de minerales, en este caso de carbonatos, resultado de mineralización *in situ* inducida por comunidades microbiales conocidas como *microbial mats* o *algal mats* (Riding 1991, 2000). Esta biomineralización se da en la banda de bacterias sulfato-reductoras (Stal, Gernerden y Krumbein 1985).

Microbialitas: son depósitos órgano-sedimentarios que acrecen cuando pululan comunidades microbiales bentónicas que atrapan y estratifican sedimentos y forman el *locus* de precipitación mineral (Burne y Moore 1987; Krumbein et al. 2003; Dupraz et al. 2009).

Para Noffke y Awramik (2013), Noffke et al. (2013) y Noffke et al. (2001), las microbialitas tienen estructuras sedimentarias distintivas (MISS), inducidas por la interacción de los biofilmes con el ambiente, debido a la atracción, el atrapamiento y la bioestabilización, que dan como resultado la captura de varias partículas al *locus*.

Son depósitos minerales en sistemas órgano-sedimentarios laminados que permiten la preservación de los tapices microbiales como resultado de órgano-mineralización (Flügel 2010).

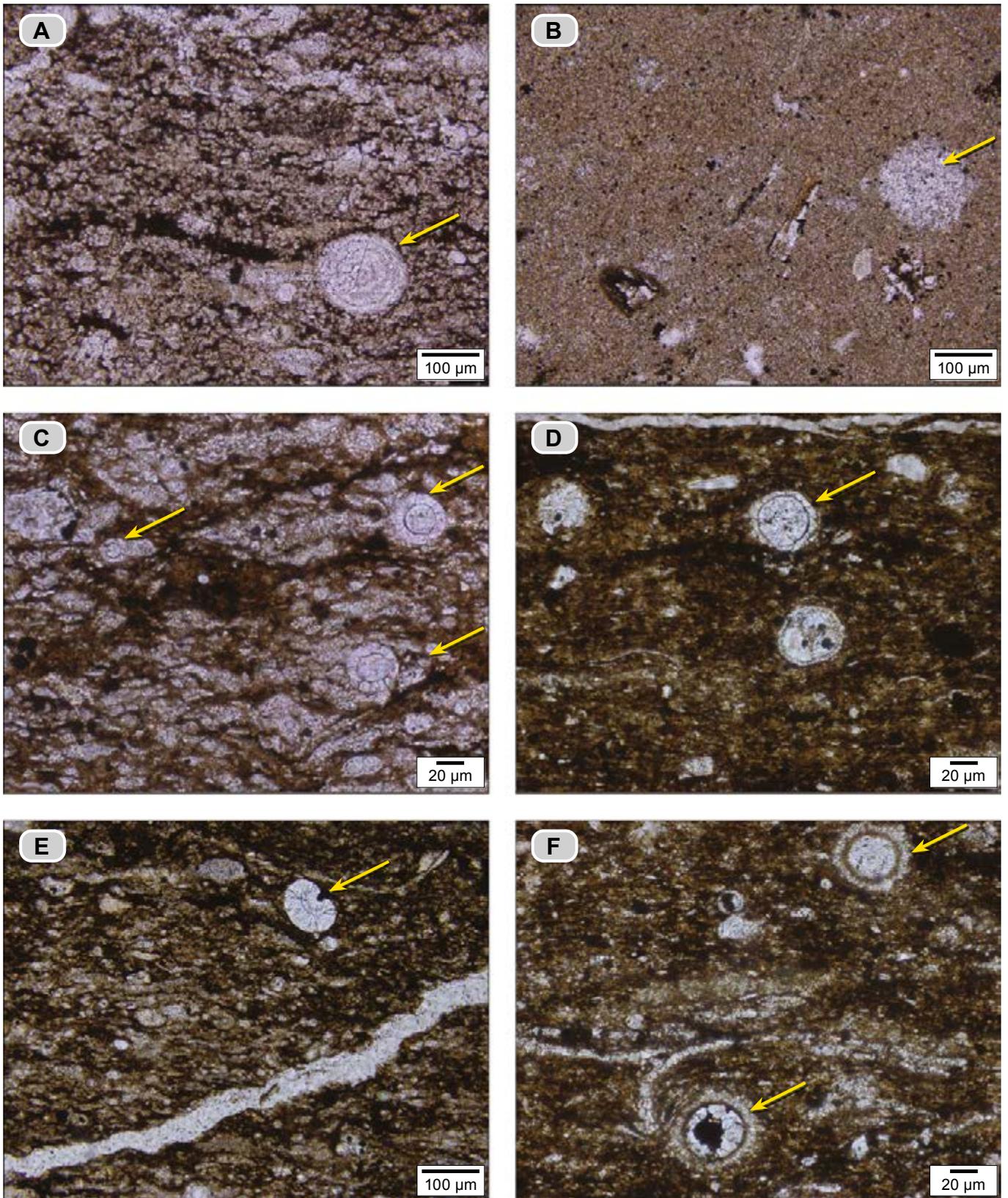


Figura 9. Cuerpos circulares: **A)** constituido por cristales de espar con un arreglo interno concéntrico. **B)** Constituido por cristales de carbonato de calcio tamaño espar, sin forma interna. **C)** Cuerpo con un centro de carbonato de calcita en un único cristal, rodeado por un anillo segmentado de varios cristales de carbonatos de calcio (quistes de dinoflagelados calcáreos). **D)** Internamente presentan cristales de calcita-espar, y con menor frecuencia un solo cristal, con un anillo exterior de cristales subrectangulares de calcita (quiste de dinoflagelado calcáreo). **E)** Cuerpo ovoide que asemeja un fríjol, internamente está constituido por cristales de calcita-espar radiales: *microcodium*. **F)** Cuerpo circular con dos anillos, el interior de color pardo oscuro y el exterior está constituido por cristales aciculares de carbonato de calcio con crecimiento radial (quistes de dinoflagelados calcáreos).

El término *órgano-mineralización* distingue e incluye la mineralización inducida biológicamente: resultante de la interacción entre actividad biológica-ambiente y la mineralización influenciada biológicamente, es decir, una mineralización pasiva de materia orgánica (Dupraz et al. 2009). La biomineralización de carbonato de calcio se produce en la banda de bacterias sulfato reductoras (Chafetz y Buczynski 1991).

Biolaminitas: equivalente a laminación criptoalgácea (Warren 2006); es una textura sedimentaria inducida por microbios; se da entre láminas orgánicas y tapices microbiales (Noffke et al. 1996)

Peloides y/o granuloides de algas: son pequeños parches de micrita secretada por algas; pueden ser granos alargados de color pardo oscuro y de aspecto microcristalino que pudieron haber sido interpretados como clastos de calizas (Wolf 1965). Esta micrita algal forma montículos semisólidos, que al desintegrarse producen fragmentos de aspecto peloidal (Wolf 1965). Los peloides microbiales, según dicho autor, tienen formación *in situ*, es decir origen autóctono y son partículas de carbonato de calcio en tapices microbiales. En Flügel (2010), los peloides algales se interpretan como partículas resultantes de la desintegración de algas calcificadas y cuerpos microbiales, como producto de la abrasión. Se diferencian varios casos:

- 1) Fragmentos redondeados de composición micrítica derivados de tapices microbiales y, en ciertas ocasiones, de algas (Wolf 1965).
- 2) Intraclastos con las mismas características composicionales con contornos irregulares (Wolf 1965).

Algas *Dasycladaceas*: grupo de algas verdes unicelulares calcificadas, bentónicas, milimétricas a centimétricas; que crecen adheridas a un sustrato. Consisten de un talo central con numerosas ramas laterales con sus órganos reproductivos, los cuales también pueden estar en el talo central. Aparecen en secciones delgadas de calizas como cortes transversales, longitudinales u oblicuos (Scholle y Ulmer-Scholle 2003). Crecen en aguas someras tropicales a subtropicales, y raramente son encontradas en aguas profundas; solo han sido observadas hasta 20 m de profundidad (Berger 2006). Su ambiente son rampas marinas de carbonatos, aparecen desde el Cámbrico hasta Cenozoico inferior (Flügel 2010).

Algas filoideas: nombre informal para cuerpos con aspecto de hojas calcificadas, parecidas a las algas verdes modernas o a algunas algas rojas. Exhiben varios rasgos internos: zonas corticales y medulares centrales; su diferenciación se basa en la corteza (Flügel 2010). Es un término descriptivo, por lo general están fuertemente afectadas por la diagénesis y exhiben pocas características diagnósticas. Se observan como hojas curvadas recristalizadas, muchas están perforadas, semejan hojuelas (*corn flakes* o *potato chip*) y pueden no

mostrar estructuras internas (Scholle y Ulmer-Scholle 2003).

Carofíceas: las carofíceas modernas son algas verdes (clorofitas) que habitan en aguas dulces o salobres internas (Scholle y Ulmer-Scholle 2003).

HISTORIA DE LA NOMENCLATURA ESTRATIGRÁFICA

Wheeler (1929) es el primer autor en realizar descripciones con base en los afloramientos por la quebrada La Paja; estas fueron reunidas en un reporte interno para la compañía Imperial Oil Ltd.

Según este autor:

The La Paja formation embraces 625 meters (2050') of black, thinly laminated shales that immediately overlie the Rosa Blanca limestones and marls. The formation is typically exposed in the Quebrada La Paja and just opposite its mouth into the Sogamoso.

The shales in this formation are uniformly black, thinly laminated, sligly (*sic*) calcareous and often micaceous and silty. They are very incompetent and entire hills composed of these shales slump down into the vales (*sic*). Resistant, ledges are rare.

The lower 800-1000' of this formation contains concretions (*sic*) of limestone, septarians, and veins of calcite. The concretions are in the shape of an obtale (*sic*) sheproud and are usually about 8" in their greatest dimension, although (*sic*) some exceeding 12" were seen. The septarians have the cracks filled with calcite and are somewhat smaller than the concretions. In addition, cophalopogd (*sic*) and worn (*sic*) tubes are common in the same part of the section.

The upper 1000' of the formation could not be studied as closely as the remainder because it was either soil covered or concealed by large talus black (*sic*) of limestone from the superjacent Tablazo limestone. It appeared, however, toward the top of (*sic*) grade into the overlying Tablazo marls and to assume more of the character of those beds. Large pelecypods like those of the Tablazo limestone and marls (*sic*) are present in the top parts of the formation.

The topography of areas of La Paja shale is, as would be expected, quite subdued. The hills are of very moderate height where they are not protected by the overlying formation.

Morales y The Colombian Petroleum Industry (1958, 650) retoman la información de Wheeler (1929), aceptan como sección tipo la estudiada por Wheeler (1929) en la quebrada La Paja, y agregan: *The stratigraphic relationship with the underlying Rosa Blanca is concordant and the contact relatively sharp [...]. The upper part of the formation seems to grade into the overlying Tablazo marls and to assume more of the character of those beds [...].*

CARACTERÍSTICAS LITOLÓGICAS DE LA SUCESIÓN AFLORANTE EN LA SECCIÓN TIPO

En su sección tipo, la Formación La Paja mide 288 m. En el presente estudio esta unidad se ha subdividido en cinco segmentos estratigráficos integrados por dos elementos superpuestos, que se repiten a través de la sucesión, en el siguiente orden:

1) *Mudstone* calcáreos y *mudstone* arcillosos, con materia orgánica: en el microscopio se identifican como *bindstone* con materia orgánica y *bindstone* con arcillas y materia orgánica. Ambos términos mencionados corresponden a microbialitas con materia orgánica. Esta tipología litológica favorece su expresión como entrantes en el perfil topográfico (**anexo 2, columna estratigráfica y fig. 10**).

2) Calizas *mudstone* recristalizadas (Flügel 2010, fig. 4.5): en el microscopio se trata de *bindstone* recristalizados; también se trata originalmente de microbialitas en las que la materia orgánica es apenas perceptible. Esta tipología litológica favorece su expresión como salientes en el perfil topográfico (**anexo 2, columna estratigráfica y fig. 10**).

El segmento estratigráfico I (0-73 m) está compuesto por calizas *mudstone* con recristalización, grises oscuras, en capas medianas a gruesas que se presentan así: **a)** planas-paralelas, **b)** con adelgazamientos y engrosamientos que configuran capas arrosariadas o de montículos, **c)** con uno de sus contactos ondulado y **d)** con uno de sus contactos dentellado. En este segmento las calizas *mudstone* alternan con *mudstone* calcáreos con materia orgánica, grises oscuros, laminados, en intervalos de hasta 1,20 m.

Con el microscopio, en los *mudstone* calcáreos con materia orgánica se reconocen tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina, que se distinguen por su textura de tamiz. Se identifican petrográficamente como *bindstone* con materia orgánica o su equivalente, microbialitas, es decir, depósitos órgano-sedimentarios producidos por comunidades microbiales bentónicas, en los cuales además se destaca la presencia de algas *Dasycladaceas*, algas filoideas y cuerpos circulares calcáreos de 100-200 μm , interpretados como elementos reproductores de algas. Hay presencia de materia orgánica.

El segmento estratigráfico II (73-116 m) es similar al anterior, pero se diferencia en particular porque contiene lentes y láminas de calcita fibrosa que recuerdan tapices de algas desecados; además, presentan yeso en láminas y nódulos resedimentados, y también domos de gases. En el microscopio persisten las microbialitas, restos de algas *Dasycladaceas*, cristales de yeso, halita reemplazada por yeso o calcita, y peloides de micrita.

El equivalente al segmento estratigráfico III (116-193 m) está cubierto en gran parte; los metros aflorantes son de *mudstone* arcillosos con materia orgánica.

El segmento estratigráfico IV (193-216 m) presenta calizas *mudstone*, cuya principal característica es la laminación, desde fina hasta mediana, plana paralela. El color en muestra fresca es gris oscuro; como pátina resalta el tono naranja amarillento. En el microscopio se identifican como *bindstone* recristalizados, y en ellos destacan cuerpos circulares calcáreos de 100-200 μm (elementos reproductores de algas) y quistes de dinoflagelados calcáreos.

El segmento estratigráfico V (216-288 m) está compuesto por calizas *mudstone* grises oscuras, que en el microscopio aparecen como *bindstone* con recristalización, dispuestos en capas con formas similares a las descritas en el segmento I, y alternan con intervalos de hasta 6 m de *mudstone* arcillosos con materia orgánica que en el microscopio se reconocen como *bindstone* con arcillas y materia orgánica.

En los *mudstone* calcáreos con materia orgánica de los segmentos estratigráficos I y II se observan conchillas de foraminíferos planctónicos con textura arena fina, mientras a partir del segmento III, en los *mudstone* arcillosos con materia orgánica, las conchillas de foraminíferos planctónicos presentan textura limo grueso.

Las impresiones de amonitas son frecuentes en toda la sucesión. Hay presencia esporádica de hidrocarburos en forma de relleno de cavidades, espacios intergranulares y microdiques. Son notables las concreciones subsferoidales a elipsoidales mayores de 10 cm en su diámetro mayor.

Algunos de los rasgos microscópicos que caracterizan las calizas *mudstone* es que están recristalizadas, en uno de tres estadios: I) se conserva la laminación original, en la que alternan láminas recristalizadas y láminas sin recristalización; II) las láminas recristalizadas y no recristalizadas que se entremezclan, y III) la recristalización la vuelve homogénea y se difumina la laminación.

Un caso conspicuo de rosetas de yeso calcificadas se presenta en calizas *mudstone* del segmento estratigráfico V, interpuestas entre *mudstone* arcillosos con materia orgánica.

El rasgo principal en los *mudstone* calcáreos con materia orgánica en el microscopio es la laminación gruesa, en ocasiones con peloides de micrita; mientras que en los *mudstone* arcillosos con materia orgánica, las texturas son definidas por la forma de presentación de las arcillas: en láminas delgadas y medianas, en lentes, y como pátina, con arcillas de fino hábito micáceo orientadas (pulverulenta).

Segmento estratigráfico I (0-73 m)

En la sección tipo, los primeros tres metros de la Formación La Paja están cubiertos, y se describen según los afloramientos que se encuentran en la vertiente oriental del río Sogamoso, a la altura del municipio de Los Santos (N:1.243.540, E:1.099.108, Z:895), en el carreteable que conduce a la mina de yeso El Carrancho (**fig. 11**).

FORMACIÓN LA PAJA SECCIÓN TIPO QUEBRADA LA PAJA

Inicio: 1.269.639N - 1.082.371E - 193 msnm
Final: 1.262.497N - 1.081.973E - 399 msnm

Por: Diana María Montoya Arenas
Grupo de Estratigrafía
Dirección de Geociencias Básicas



L E Y E N D A

- Litología**
- Mudstone arcilloso con materia orgánica
 - Mudstone arcilloso calcáreo con materia orgánica
 - Mudstone calcáreo arcilloso con materia orgánica
 - Mudstone calcáreo con materia orgánica
 - Caliza mudstone con recristalización incipiente
 - Caliza mudstone con recristalización
 - Caliza wackestone
 - Caliza packstone

- Forma de los estratos**
- Laminación plana paralela
 - Laminación lenticular
 - Laminación algácea
 - Contacto neto irregular: dentellado
 - Base o techo con adelgazamiento y ensanchamiento
 - Bases y techos con adelgazamiento y ensanchamientos: montículos unidos

- Bioturbación**
- Moderada a alta
 - Thalassinoides* isp.

- Convenciones**
- Lentes y láminas de calcita fibrosa
 - Nódulos de yeso resedimentados
 - Concreciones calcáreas
 - Amonita
 - Gasterópodo
 - Grifeido (*Aetostreon* o *Ceratostreon*)
 - Resto vegetal
 - Resto de peces con escamas
 - Fragmento de alga filoidea
 - Restos de alga *Dasycladacea*
 - Cuerpos reproductores de algas o microbianos
 - Restos de alga *Dasycladacea* calcificada
 - Foraminífero planctónico
 - Ostrácodo
 - Fragmento de bivalvo
 - Peloides de micrita
 - Materia orgánica
 - Yeso macroscópico
 - Pirita
 - Moscovita
 - Cuarzo
 - Cristales con crecimiento *pop corn* de yeso
 - Cristal de halita
 - Fragmentos de cristal de calcita
 - Cristal de calcita
 - Quistes de dinoflagelados calcáreos
 - Hidrocarburos
 - Rosetas de yeso calcificadas
 - Discontinuidad bioestratigráfica

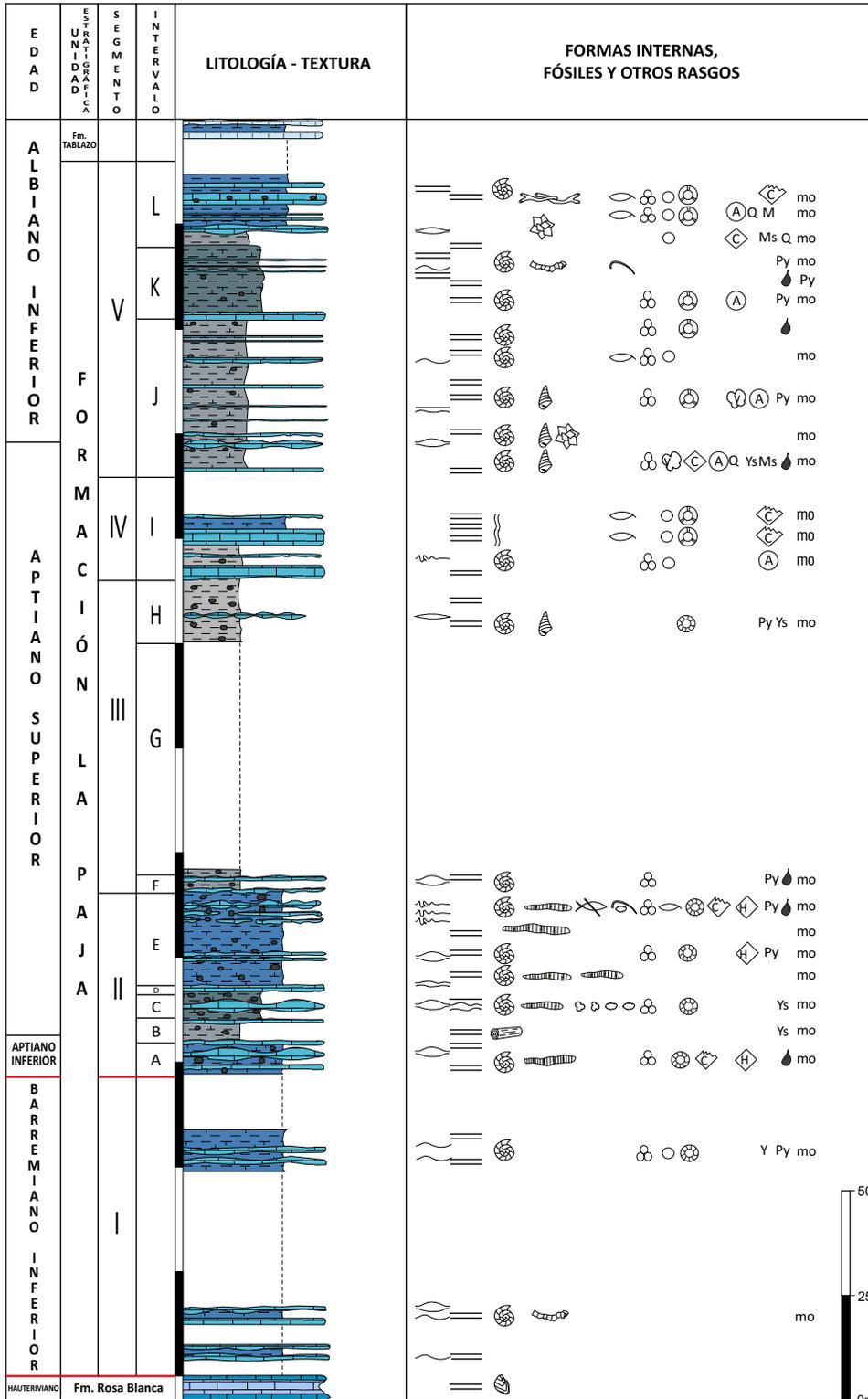


Figura 10. Columna generalizada de la Formación La Paja. Sección tipo.

El primer elemento litológico atribuible a la Formación La Paja son 5 cm de caliza *mudstone* (**dma 5891**), que yacen sobre un paleosuelo desarrollado sobre el techo de la Formación Rosa Blanca (véase Etayo-Serna y Guzmán 2019)

Los 30 cm que reposan sobre la caliza *mudstone* (**dma 5891**), corresponden a un intervalo laminado constituido por la alternancia de láminas delgadas y medianas de *mudstone* calcáreos grises (N3) a rojizos (5YR 5/4, 10YR 5/6) y láminas de yesos (**fig. 12**).

Sobre las capas anteriores se observa una sucesión constituida por calizas *mudstone* grises (N4-N5) en capas gruesas que dan resalte topográfico; alternan con capas gruesas, a su vez constituidas por *mudstone* calcáreos con láminas de yeso (**fig. 12**); el espesor total de este intervalo es de 2.70 m. Las láminas de yeso están formadas por cristales alargados perpendiculares a S_0 , blancos o de aspecto terroso por meteorización.

Las capas de las calizas *mudstone* presentan dos formas: la primera muestra ondulaciones en la base y el techo que generan adelgazamientos o engrosamientos, y en ocasiones se angostan tanto que configuran montículos unidos; la segunda forma de las capas presenta superficies planas paralelas.

El primer registro de amonitas (**dma 5894**, **dma 5830**) de la Formación La Paja se da en la caliza *mudstone*, a 35 cm del contacto con la Formación Rosa Blanca: se trata de *Nicklesia pulchella* (ORBIGNY, 1841).

En el microscopio, el primer elemento litológico (**dma 5891**) deja ver láminas medianas y gruesas alternantes, claras y oscuras; las láminas oscuras tienen un tinte pardusco, debido a la

presencia de óxidos de hierro y materia orgánica. La roca está recrystalizada y presenta un agregado de cristales de calcita con tamaños que varían desde 12 μm hasta 21 μm (**fig. 13**).

Entre los fósiles (7,5%) se reconocen (**fig. 13**): **a**) formas circulares con diámetros que varían entre 120 y 250 μm , rellenos por cristales de calcita. Algunas de estas formas presentan un apéndice que se interpreta como el inicio de la primera cámara. Estos cuerpos se han interpretado como protoconchas de amonitas o fragmentos de las mismas. **b**) Formas circulares similares con menor tamaño, de hasta 70 μm .

La caliza *mudstone* (**dma 5894**), presenta tonos rojizos y está recrystalizada, y se reconoce un agregado de cristales de calcita de 7 μm (**fig. 13**). Los fósiles son: **a**) cuerpos circulares (4%), con diámetros que varían desde 100 μm hasta 500 μm , rellenos por cristales de esparita; también se observa la presencia de cuerpos que presentan internamente cámaras, que en ocasiones conforman una espiral; estas cámaras pueden estar rellenas por micrita; todas estos cuerpos globosos son protoconchas de amonitas (Stinnesbeck, Frey y Patrick 2016) (**figs. 14 y 15**); **b**) conchas de bivalvos (5%), en dos tamaños en su dimensión mayor: alrededor de 500 μm , y desde 50 μm hasta 300 μm , con reemplazamiento a cristales de esparita o micritizadas; **c**) bivalvos con conchas articuladas (2%) con tamaños entre 120 μm y 200 μm , y **d**) restos fosfatizados de peces (4%).

En la quebrada La Paja (sección tipo), el segmento estratigráfico I de la Formación La Paja se localiza entre los puntos de la poligonal $\Delta 116$ y $\Delta 94$; presenta varios intervalos cubiertos, incluida su base, y los afloramientos representan el 8% de la sucesión estratigráfica.



Figura 11. Metros basales de la Formación La Paja. Se observa la alternancia de un elemento duro (caliza *mudstone*) con un elemento blando (*mudstone* calcáreo). La Formación La Paja descansa sobre una superficie de alteración en el tope de la Formación Rosa Blanca (Etayo-Serna y Guzmán 2019). (Carretera Los Santos hacia las minas de yeso “El Carrancho”, N:1.243.540, E:1.099.108, Z:895).

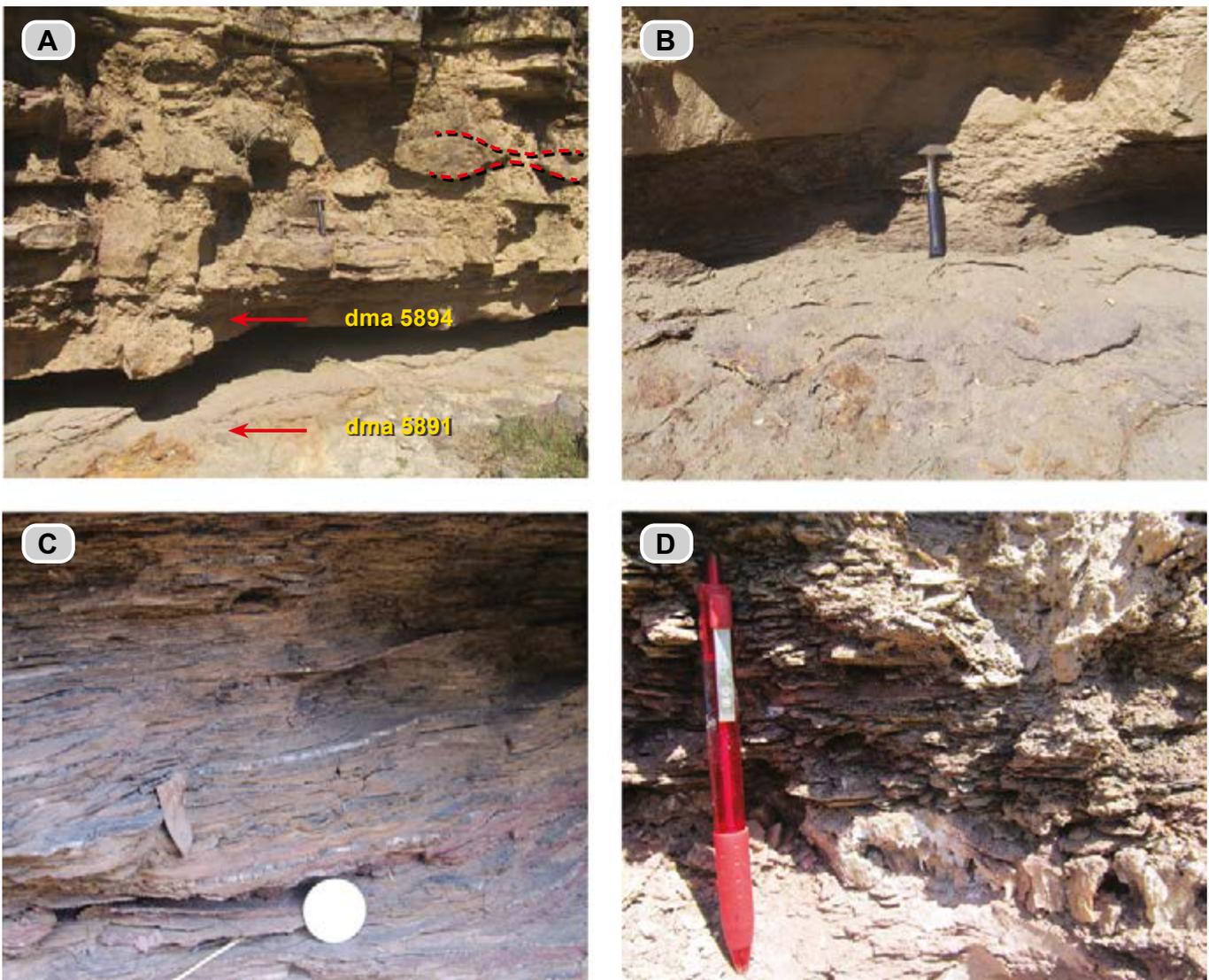


Figura 12. Metros basales de la Formación La Paja. **A)** Las capas de calizas *mudstone* tienen formas tanto plano-paralelas, en las que el espesor se conserva, como formas con contactos ondulados que configuran adelgazamientos y engrosamientos, y toman aspecto arrosariado (líneas rojas punteadas), (metro 0-2). **B)** Contacto entre las Formaciones Rosa Blanca y La Paja (30 cm basales). **C)** Detalle de la figura B (señalada por el martillo): se observa la alternancia de láminas de yeso con *mudstone* calcáreos; nótese el tono rojizo de estos. **D)** Láminas gruesas de yeso fibroso perpendiculares y laminillas de yeso paralelas a la estratificación (metro 1.5). (Carretera Los Santos a las minas “El Carrancho”, N:1.243.540, E:1.099.108, Z:897).

En esta, su sección tipo, los estratos se describen a partir del metro 3: allí afloran 2,5 m de secuencia; continúa un segundo tramo cubierto (4 m), al final del cual se observan 3,5 m de sucesión; para nuevamente aparecer el tercer tramo cubierto, hasta el metro 50, donde reaparecen los afloramientos.

En el metro 3 afloran calizas *mudstone* de color gris oscuro (N3-N5), que en el perfil topográfico generan salientes. Las rocas se disponen en capas medianas y gruesas (hasta 60 cm), con base y techo plano paralelo; en ocasiones sus bases son onduladas. Alternan con *mudstone* calcáreos con materia orgánica, laminados, en capas delgadas a gruesas (50 cm), que dibujan entrantes en el perfil topográfico (**fig. 16**).

A 11 m encima del techo de la Formación Rosa Blanca se coleccionaron las primeras amonitas con volumen de la sec-

ción tipo (**fig. 17**), en concreciones calcáreas elipsoidales a esferoidales con longitud variable en el eje mayor ϕ (ϕ): 30 cm, 25 cm y 4 cm.

En el microscopio, la caliza **dma 5196** es un *wackestone*, se identifica como *bindstone* (microbialita) y está constituida por (**fig. 18**): **a)** fragmentos de microbialitas, disgregados, subredondeados con tamaños entre 160 μm y 190 μm ; en cada fragmento internamente se aprecia una estructura reticulada; **b)** láminas de calcita espar con bordes arriñonados, irregulares y entrelazados; estas láminas representan tapices microbiales biomineralizados por calcita espar (microbialitas), y **c)** fragmentos alargados (4 mm) de formas onduladas, tipo hojuelas, cuyo grosor no es mayor de 4 μm , en general dispuestas de modo paralelo a S_0 , de color amarillo-pardo; corresponden a restos de algas filoideas.

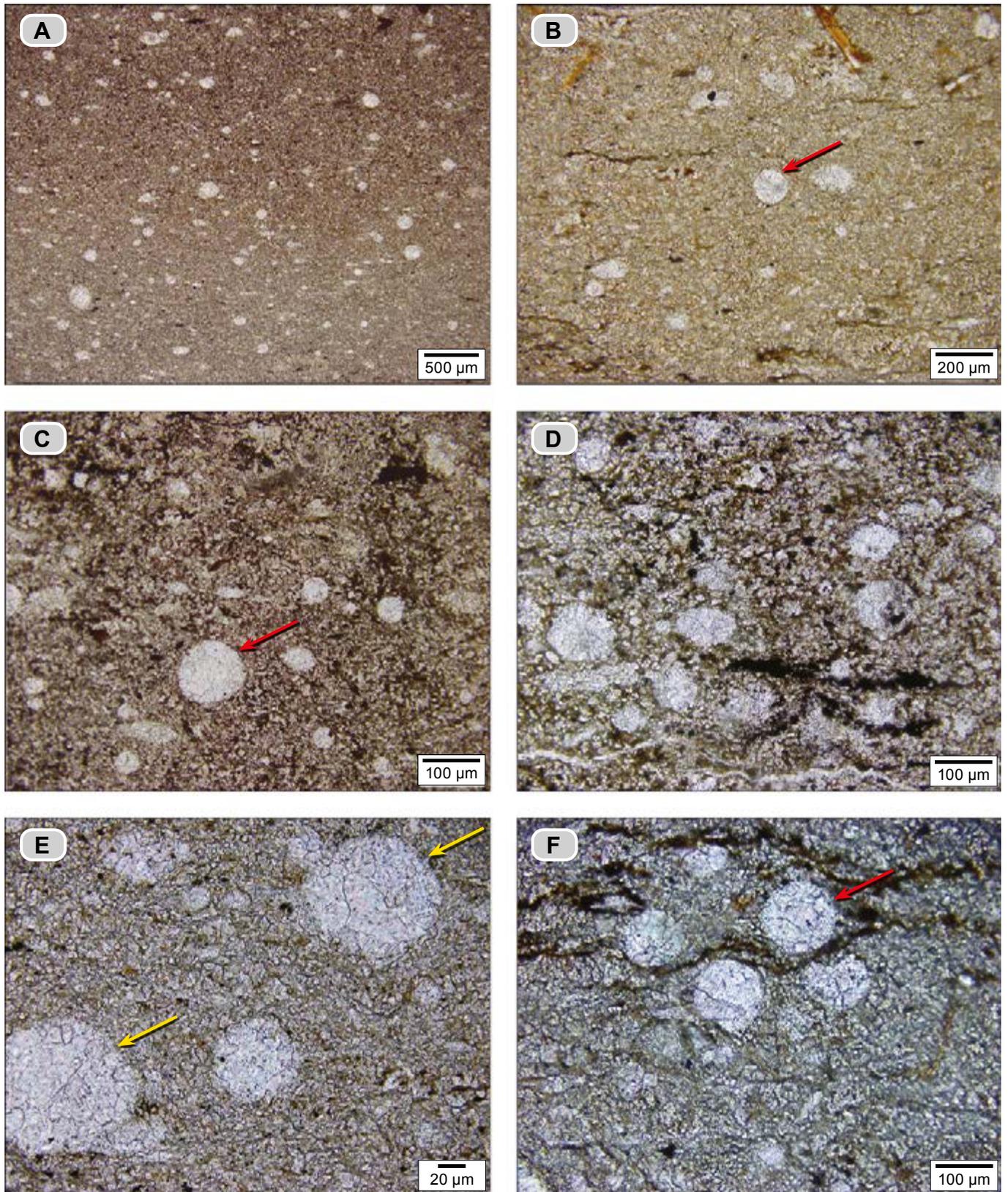


Figura 13. Caliza *mudstone* (dma 5891). **A)** El color pardo rojizo de la lámina superior se debe a la presencia de óxidos de hierro; además, en la sección delgada se observan cuerpos circulares entre 100 hasta 250 µm de diámetro, rellenos por cristales de calcita espar (protoconchas de amonitas). **B)** La flecha roja señala un cuerpo circular con desarrollo de cristales de calcita espar; además, se observan algunos restos fosfáticos y se aprecia la recrystalización de la micrita. **C)** En una lámina oscura hay presencia de protoconchas de amonitas (flecha roja) y presencia de óxidos de hierro. **D)** Nótese la micrita recrystalizada. **E y F)** En una lámina clara se observan las formas circulares (protoconchas amonitas) y la micrita con recrystalización; en **E** las flechas amarillas resaltan la presencia de cuerpos circulares rellenos por cristales de calcita espar, con apéndice (profisión de la amonita).

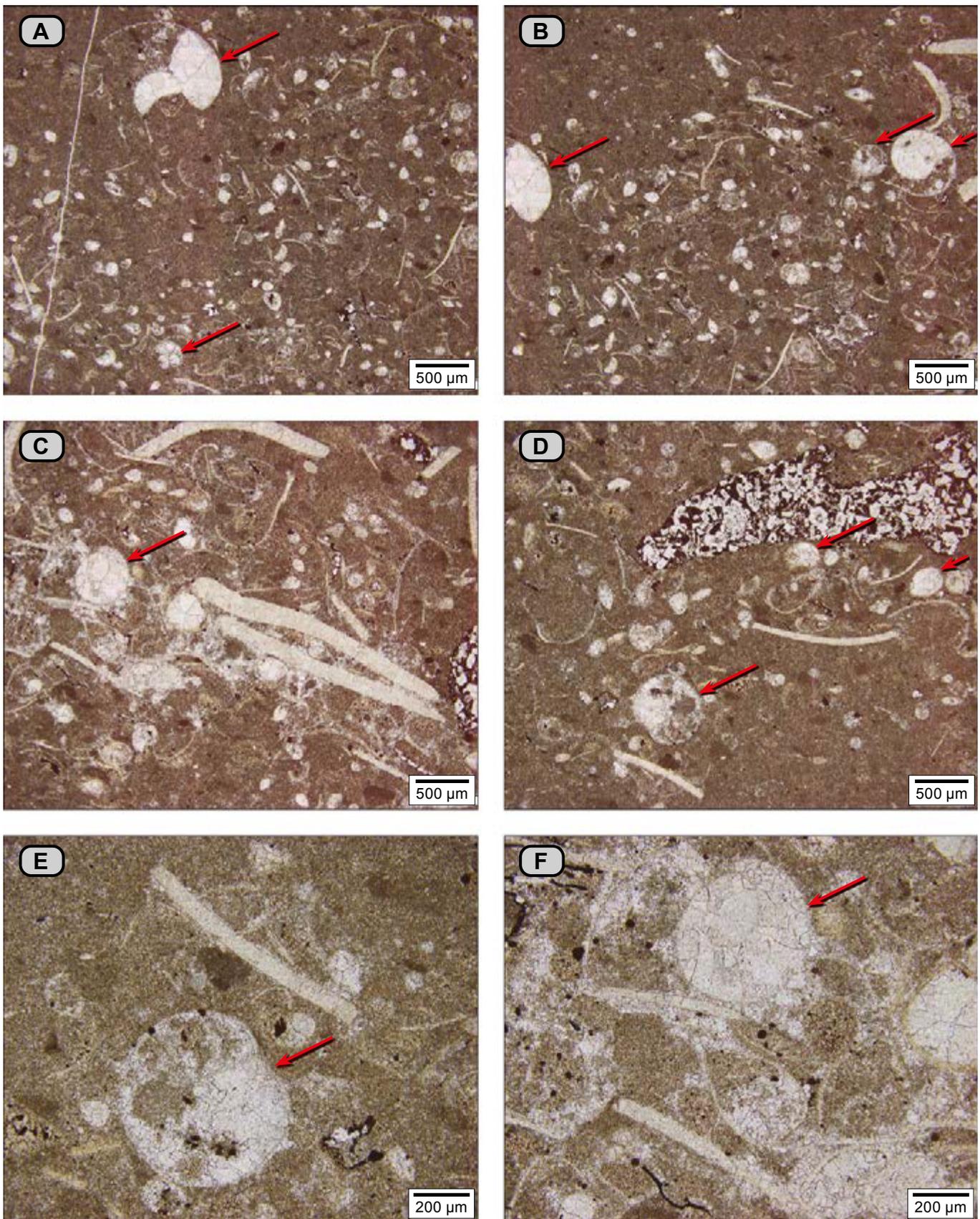


Figura 14. Caliza *mudstone* (dma 5894). **A, B, C y D)** Los constituyentes son conchas desarticuladas de bivalvos, conchas articuladas de pequeños bivalvos y fragmentos de huesos; las flechas rojas señalan la presencia de cuerpos circulares con cámaras internas y enrolladas de las protoconchas de amonitas. **E y F)** Con mayor aumento se observa micrita con recristalización incipiente, y las flechas rojas señalan cortes de protoconchas de amonitas para mostrar la primera cámara y el inicio del enrollamiento.

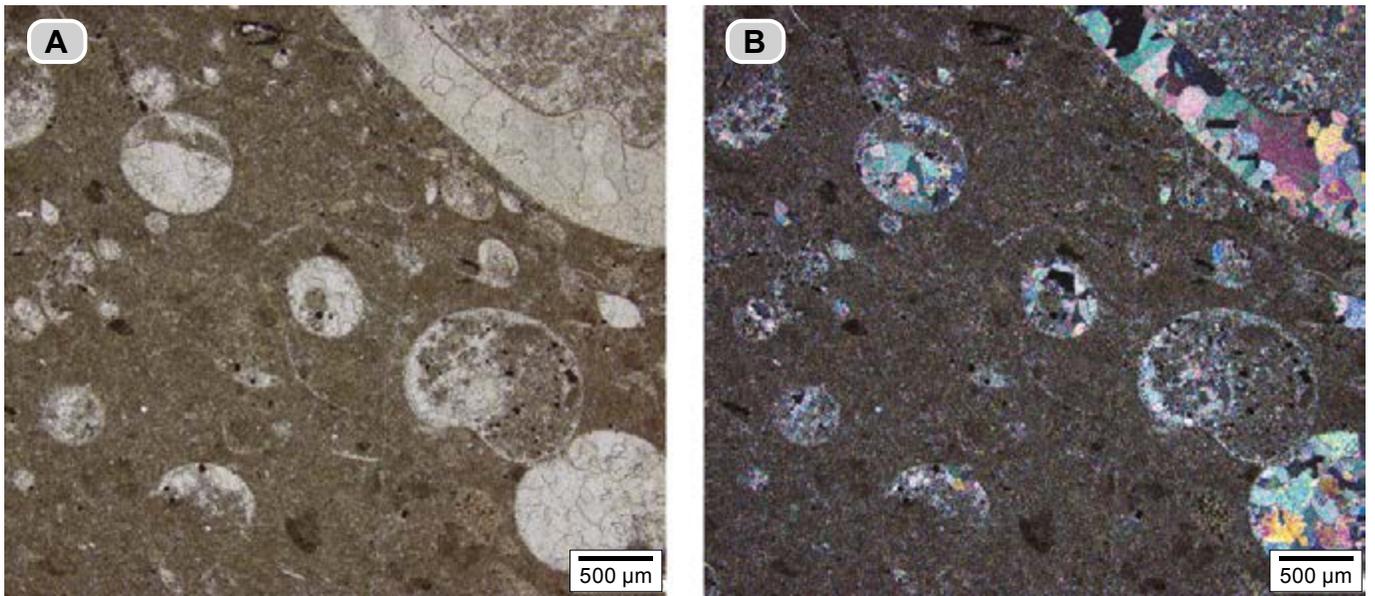


Figura 15. Protoconchas de amonitas en diferentes posiciones (**dma 5894**). Nótese que la cámara inicial suele estar rellena por cristales de calcita espar, mientras que la cámara siguiente está ocupada por micrita (Stinnesbeck Frey y Patrick 2016).



Figura 16. Calizas *mudstone* que resaltan en el perfil topográfico, en capas gruesas y medianas con formas plano-paralelas o con las bases onduladas (metro 9-12, $\Delta 116$).



Figura 17. *Nicklesia pulchella* (ORBIGNY, 1841). Metro 11 del segmento estratigráfico I.

La materia orgánica se observa como motas, que en ocasiones forma caminos. Se presentan otros restos fósiles como fragmentos de huesos y de equinodermos fosfatizados; hay presencia de hidrocarburo relleno fósiles y poros (**fig. 18**); además, hay presencia de pirita (5%) y fragmentos de cuarzo como mineral traza.

Estos constituyentes aparecen en dos tipos diferentes de láminas: **1)** la conformada por acumulaciones de fragmentos subredondeados de microbialitas, acompañados con restos de huesos de peces fosfatizados; por sectores hay presencia de fragmentos de algas filoides; estos fragmentos disponen en varias direcciones con respecto a S_0 , y **2)** la conformada por láminas entrelazadas de tapices microbiales con bordes arriñonados, recristalizados a calcita espar.

La descripción anterior termina en el $\Delta 114$, a partir del cual se presenta el tercer tramo cubierto, correspondiente a 39 m de secuencia ($\Delta 114$ - $\Delta 98$). Por esta razón, parte de esta sucesión se describe con base en el afloramiento ubicado a seis kilómetros al sur (**fig. 19**), en la quebrada El Ramo (plancha 120-IB); en este sitio (N:1.265.183, E:1.079.724, Z:321), la alternancia más apretada de estos dos tipos litológicos: calizas *mudstone* y *mudstone* calcáreos con materia orgánica, produce un saliente topográfico (Intervalo El Ramo), (véase el Mapa geológico en los alrededores del Tablazo, en Moreno-Sánchez 2019); adicionalmente, en este intervalo se presentan 90 cm de *mudstone* calcáreos con entrecruzamiento de lentes de yeso.

Retomando la descripción del segmento I por la quebrada La Paja, después del cubierto de 39 m (tercer tramo cubierto, $\Delta 114$ - $\Delta 98$), se observan los 3,5 metros cuspidales de este segmento ($\Delta 98$ - $\Delta 96$); aquí alternan calizas *mudstone* y *mudstone* calcáreos con materia orgánica.

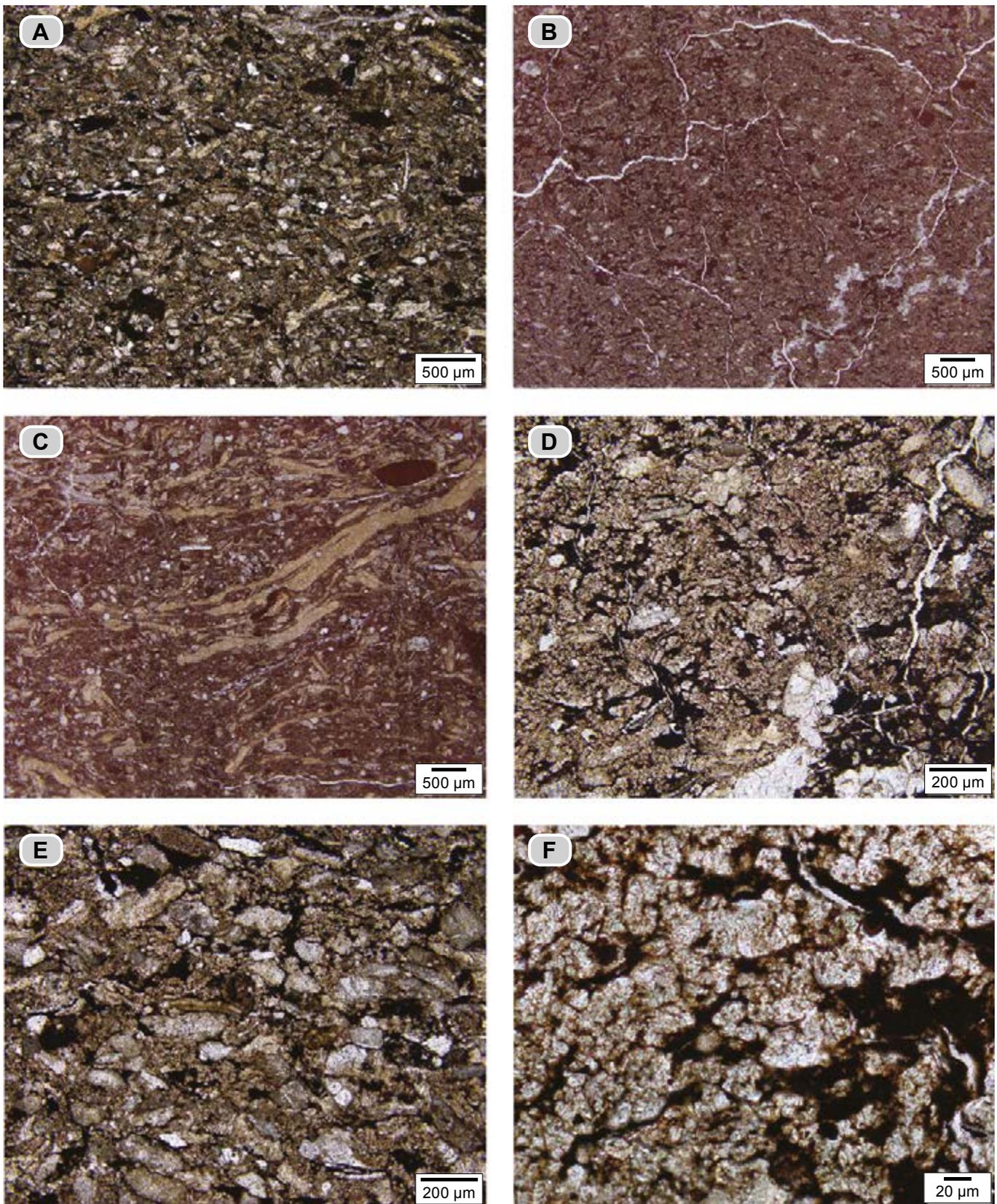


Figura 18. Caliza *wackestone* (dma 5196). Se identifica como *bindstone* (microbialita). **A)** Fotografía de una de las láminas, que muestra las acumulaciones de bioclastos de textura fina, subredondeados. **B)** Láminas contorsionadas de microbialitas con bordes arrifionados. **C)** Lámina con fragmentos de algas filoideas? (tono amarillo pálido), en general orientadas paralelas a S_0 . **D)** Ampliación de la figura B, para mostrar láminas contorsionadas con bordes arrifionados de calcita espar. **E)** Ampliación de la figura A para observar fragmentos de microbialitas de textura fina; nótese en algunos fragmentos la preservación de la estructura celular (poros negros que forma un retículo). **F)** Ampliación para mostrar las láminas de calcita espar con bordes arrifionados de las microbialitas recristalizadas.



Figura 19. Intervalo de calizas *mudstone* y *mudstone* calcáreos que generan resalte en el perfil topográfico (Intervalo El Ramo); la flecha amarilla señala la presencia de yeso entrecruzado. (Quebrada El Ramo, punto con coordenadas N:1.265.183, E:1.079.724, Z:321 y azimut de 212°, aproximadamente a 1,5 km aguas arriba desde el puente sobre la quebrada, en el cruce con la vía principal de San Vicente de Chucurí a Lebrija).

Los *mudstone* calcáreos con materia orgánica que tiñe las manos al tocarla son ricos en restos vegetales lustrosos (5-10 mm). Se presentan en intervalos de hasta 1,20 m, son grises oscuros (N2) y dibujan entrantes en el perfil topográfico. Alternan con calizas *mudstone* grises oscuras (N3) que resaltan en el perfil (**fig. 20**) y tienen dos formas de presentación: **I**) capas gruesas con bases y techos que muestran adelgazamientos y ensanchamientos, y que adquieren aspecto de montículos unidos, con las siguientes dimensiones: 2 m de largo, 2 m de ancho y 70 cm de grosor; **II**) capas medianas con formas plano paralelas (**fig. 20**).

En el microscopio, los *mudstone* calcáreos con materia orgánica (**dma 5020**), se identifican como *bindstone* con materia orgánica (microbialita), tienen **textura tipo A** y están constituidos por (**fig. 21**):

- a) Calcita microcristalina (micrita) con aspecto poroso o de tamiz, interpretada como tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (microbialitas);
- b) formas circulares con centro de color negro, recubiertas por un halo de cristales de calcita, que se identifican como restos de algas *Dasycladaceas* (5%), que se observan como secciones transversales de agregados y como restos individuales;
- c) amonitas juveniles (1%);
- d) conchillas de foraminíferos planctónicos y quistes de dinoflagelados calcáreos (Reháková 2000, plate II, fig 12);
- e) cristales anhedrales individuales de calcita con tamaños entre 5-30 μm , que se han interpretado como fragmentos disgregados, provenientes de láminas preexistentes de microbialitas recristalizadas;
- f) materia orgánica en forma de motas e hilillos paralelos a S_0 , y
- g) pirita diseminada en porcentajes menores de 1%.

Las calizas de *textura mudstone*, en el microscopio se identifican como *bindstone* recristalizados (microbialita recristalizada), con **textura tipo III** (**dma 5021**); se reconocen por la homogeneización total de la roca, que genera un mosaico de cristales de calcita espar con **textura limo** (**fig. 22**). Hay



Figura 20. Calizas *mudstone* que forman resalte: **A**) Se observan capas con formas de montículos unidos. **B**) Se diferencian como cornisas con formas plano-paralelas (metro 50-52, $\Delta 98$).

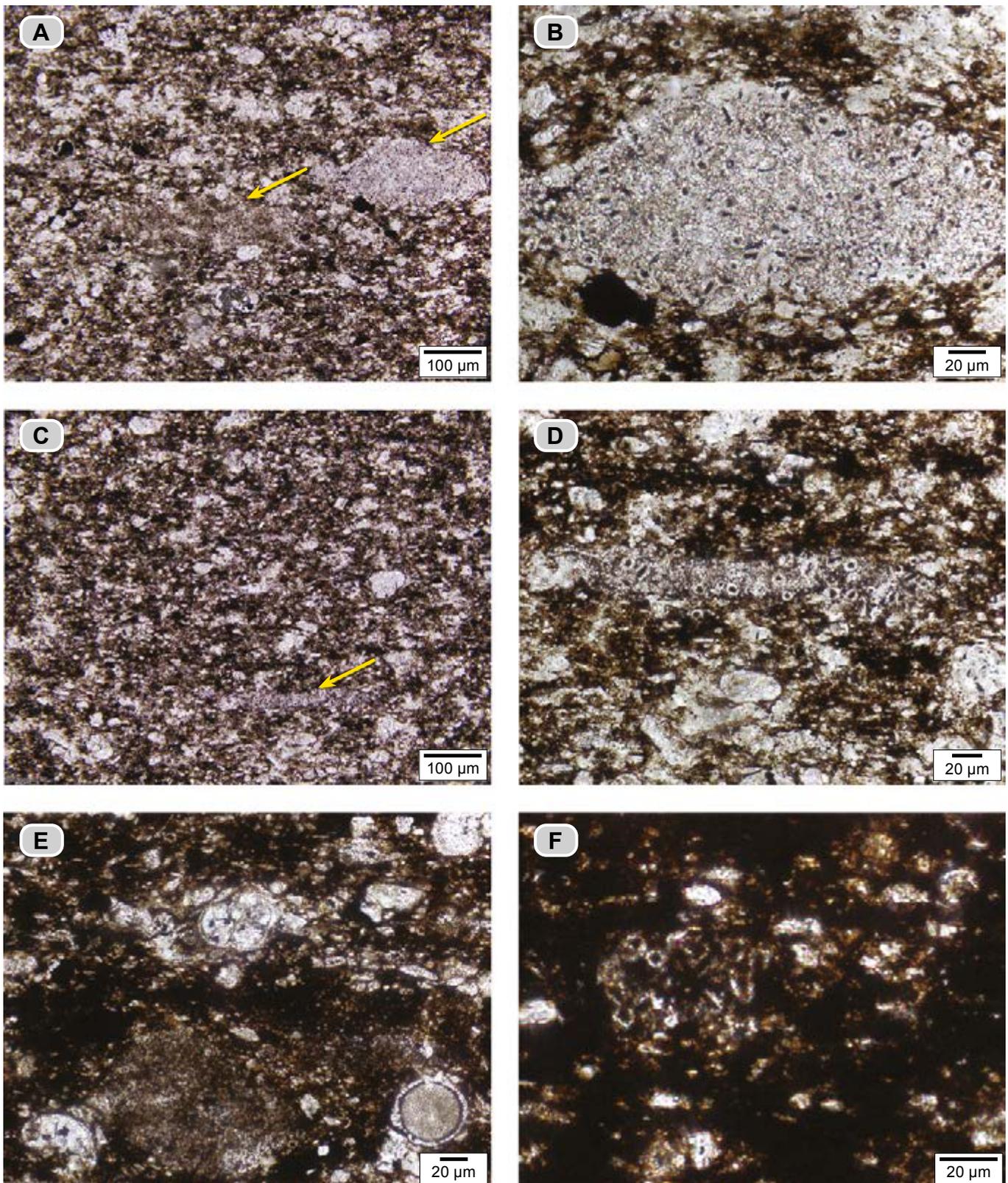


Figura 21. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica (dma 5020); en el microscopio es un *bindstone* con materia orgánica (microbialita). **A)** Se observa calcita microcristalina (micrita) con textura de tamiz: es una retícula de carbonatos acompañada de materia orgánica (tapices microbiales), intraclastos y peloides de algas *Dasycladaceas* (flechas amarillas); hay presencia de fragmentos disgregados de calcita espar de 10-30 μm . **B)** Detalle de un intraclasto de algas *Dasycladaceas*. **C)** Se observan tapices microbiales mineralizados con calcita microcristalina, intraclastos de algas *Dasycladaceas* y fragmentos de cristales de calcita espar; la materia orgánica se presenta en motas. **D)** En la parte central de la fotografía se observa un intraclasto laminar de restos de algas *Dasycladaceas*. **E y F)** Detalle de los tapices microbiales, que entrapa en ellos foraminíferos planctónicos (parte central de la fotografía), e intraclasto de algas *Dasycladaceas* (parte inferior de la fotografía), y quiste de dinoflagelado calcáreo (parte inferior derecha de la fotografía) (Reháková 2000, plate II, fig. 12), acompañados de materia orgánica; en **F** se observa un grumo con restos de algas *Dasycladaceas*.

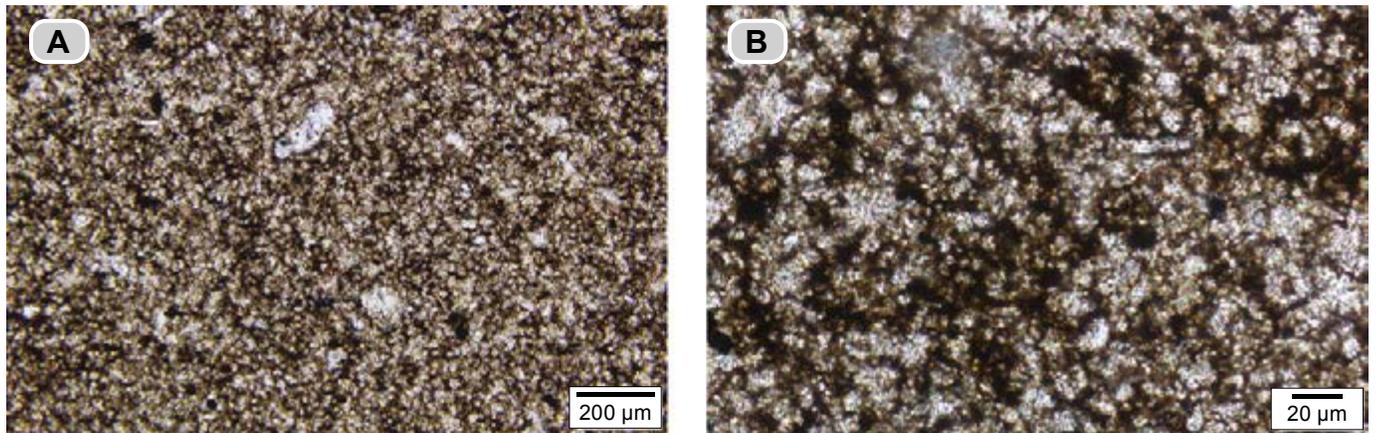


Figura 22. A) Caliza *mudstone* (dma 5021), en el microscopio se identifica como *bindstone* recristalizado (microbialita recristalizada). Obsérvese la textura homogénea por recristalización alta. **B)** Detalle del carbonato de calcio recristalizado a cristales con textura limo y materia orgánica en motas.

presencia de: **a)** cuerpos circulares que recuerdan elementos reproductivos de algas; **b)** materia orgánica en hilillos que insinúan caminos ramificados, y **c)** pirita framboidal.

El cuarto tramo cubierto se localiza entre los puntos $\Delta 98$ - $\Delta 94$, correspondientes a 19 m de secuencia.

Segmento estratigráfico II (73-116 m)

Este segmento se localiza entre los puntos de la poligonal $\Delta 94$ - $\Delta 74$. Alternan calizas de texturas *mudstone* y *wackestone* con *mudstone* calcáreos laminados que, respectivamente, dan cornisas y entrantes en el perfil topográfico, en los que se diferencian cinco intervalos estratigráficos.

En el $\Delta 94$ (metro 73) empiezan a aparecer de manera discreta láminas de calcita fibrosa, interpretadas como tapices de algas desecados, que se hacen más abundantes a partir del $\Delta 85$ (metro 86), y a su vez son más ricos en yeso; situación similar se presenta con las láminas continuas a discontinuas, ligeramente onduladas, en ocasiones dentelladas, de tonos gris oscuro (N4) y gris claro (N6), de posibles tapices microbiales.

Este segmento se diferencia además del segmento subyacente porque los espesores de las rocas que dibujan entrantes son mayores (hasta 7 m); sin embargo, el espesor de calizas *mudstone* permanece constante entre 30 y 60 cm, como también la forma de las capas.

Intervalo estratigráfico A (73-80 m). Se reconoce entre el punto $\Delta 94$ y el $\Delta 92$. Alternan calizas *mudstone* grises (N3-N6) y *mudstone* calcáreos con materia orgánica, grises (N2 a N6), laminados.

Este intervalo es rico en concreciones calcáreas y en restos e impresiones de amonitas. Estas últimas se hallan como impresiones sobre las superficies de acumulación (S_0), o aparecen en volumen dentro de las concreciones y suelen estar acompañadas

de bivalvos; las concreciones tienen formas elipsoidales, discoidales e irregulares con un ϕ máximo de 10 a 20 cm.

Los *mudstone* calcáreos con materia orgánica están laminados, dibujan entrantes (fig. 23) y alcanzan espesores de hasta 1.8 m. Hay presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa y valores para uranio de 5.664 cuentas por millón, superiores al promedio.

En el microscopio, los *mudstone* calcáreos con materia orgánica se identifican como *bindstone* con materia orgánica (microbialitas) y **textura A**. Exhiben laminación desde delgada hasta gruesa, resaltada por el color: las láminas oscuras predominan sobre las láminas claras (dma 5030):

Las láminas oscuras (fig. 24), están compuestas por: **a)** estructuras orgánicas en las que se distingue una textura de tamiz: poros negros con tamaños de hasta 4 μm , rodeados por calcita microcristalina e identificados como tapices microbiales, que, cabe recalcar, por estar biomineralizados por calcita microcristalina reciben el nombre de *microbialitas*; **b)** intraclastos y agregados de algas *Dasycladaceas*: se reconocen segmentos circulares centrales de color negro, rodeados por un halo de cristales de calcita; **c)** fragmentos de calcita espar con



Figura 23. Intervalo estratigráfico A. *Mudstone* calcáreos con materia orgánica, laminados (dma 5030), en tramos de hasta 1,5 m; alternan con calizas *wackestone* en capas gruesas y medianas, con formas de montículo y planas paralelas (metro 75-77, $\Delta 94$ - $\Delta 93$).

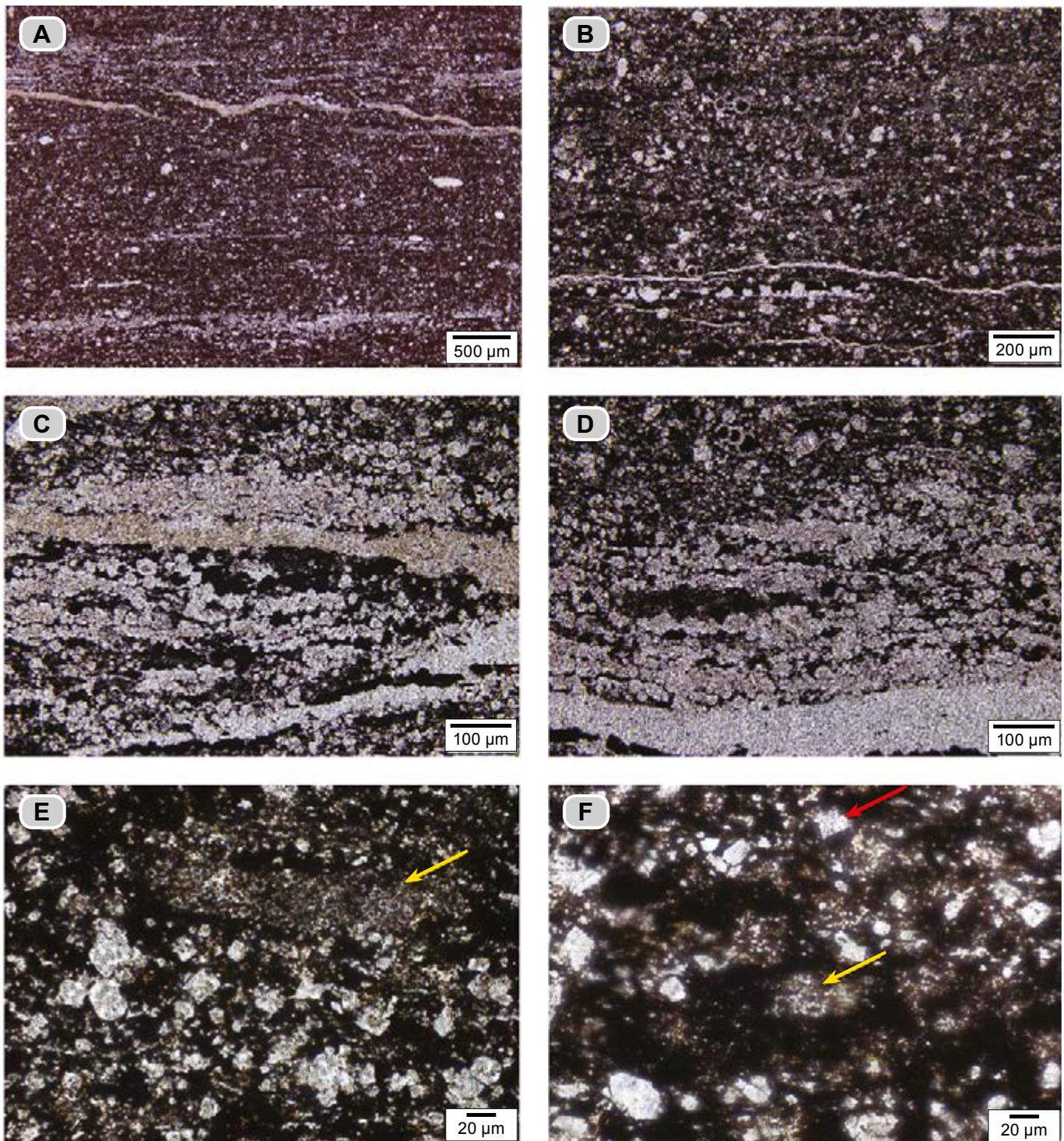


Figura 24. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica (**dma 5030**), en el microscopio se identifica como un *bindstone* con materia orgánica (microbialita). **A)** Aspecto general de la roca: se observan láminas blancas, planas, discontinuas constituidas por cristales de halita y venas ligeramente oblicuas a S_0 ; de tono parduzco-amarillento, constituidas por cristales de yeso reemplazados por calcita; alternan con láminas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina con materia orgánica. **B)** Detalle de una lámina oscura; en otro sector de la sección delgada se observa la materia orgánica en motas y laminillas, cristales de halita (blancos) de formas cúbicas reemplazados por calcita, y el resto del material de color blanco es calcita microcristalina con recristalización incipiente; también se nota la presencia de amonitas juveniles y de hidrocarburos rellenoando espacios intergranulares y cavidades en restos fósiles. **C y D)** Detalles de láminas claras. Se observan dos tipos de láminas: 1) compuesta por cristales alargados de carbonato de calcio que crecen perpendiculares a S_0 , que reemplazan yeso original; 2) compuestas por concentraciones de cristales de halita de forma cúbica y tova reemplazados por calcita; en **D** se observa, además, en la parte inferior, una lámina constituida por cristales de yeso suprayacidas por cristales de halita que forman láminas discontinuas. **E)** Detalle de una lámina oscura donde se observa la presencia de colonias de tapices microbiales con algas *Dasycladaceas* (flecha amarilla), acompañados por cristales cúbicos de halita reemplazados por calcita; la materia orgánica se observa como motas negras. **F)** Con mayor aumento se observan cristales de halita reemplazados por calcita (flecha roja); también se observan los tapices microbiales biomineralizados. Obsérvese la textura de tamiz y los agregados de algas *Dasycladaceas* (flecha amarilla).

bordes irregulares; **d**) cristales de halita cúbicos y con formas de tolvas *hopper* (Robertson 1991), con textura limo grueso (50 μm), reemplazados por calcita; **e**) materia orgánica como películas y motas micrométricas, y **f**) cámaras de amonitas, foraminíferos y otros restos rellenos de hidrocarburos.

Las láminas claras (fig. 24) aparecen discontinuas y en ellas se diferencian dos formas: **a**) las constituidas por mosaicos de cristales de halita cúbicos y con forma de tolva, reemplazados por calcita, y **b**) las constituidas por agregados de cristales de calcita alargados que crecen perpendiculares a S_0 y que corresponden a cristales de yeso reemplazados por calcita.

Las calizas *mudstone* presentan dos formas de capas (**fig. 25**): **I**) tabulares con base y techo planos paralelos, internamente integrada por paquetes de láminas; **II**) monticulares, con adelgazamientos y engrosamientos, constituidas internamente por diversos paquetes de láminas.

Las calizas *mudstone* en el microscopio (**dma 5023**, **dma 5025** y **dma 5031**) presentan dos tipos de texturas, resultantes de la recristalización. La muestra **dma 5023** tiene una recristalización baja (**tipo I**), en la que se conserva la laminación, mientras las otras dos muestras (**dma 5025** y **dma 5031**) presentan un estadio más alto (**tipo II**), en el que comienza el proceso de homogeneización, y la textura original es difusa.

En el microscopio, la caliza *mudstone* (**dma 5023**), se identifica como *bindstone* recristalizado con **textura tipo I** (microbialita): se observan conjuntos de láminas oscuras alternantes con conjuntos de láminas claras.

El conjunto de láminas más oscuras (fig. 26) presenta mayor frecuencia, y están constituidas por: **1**) lentes y láminas discontinuas de tonos pardos oscuros, a su vez constituidos por: **a**) tapices microbiales que se reconocen por los poros circulares negros (textura de tamiz), con biomineralización de carbonato de calcio; **b**) agregado de algas *Dasycladaceas*, que se identifican por sus formas circulares negras con un anillo de cristales de calcita; **c**) materia orgánica en forma de motas, y **d**) presencia de cristales aciculares de yeso secundario. Se entrelazan con **2**) cuerpos laminares blancos, discontinuos, yuxtapuestos, ondulados, que en ocasiones dibujan picos de baja altura y amplitud mayor; a su vez, cada lámina está compuesta por un agregado de cristales de calcita granulares de hasta 15 μm , interpretados como producto de recristalización.

El conjunto de láminas claras está presente con menor frecuencia, y sus constituyentes son similares a los de las láminas oscuras: **a**) láminas con terminaciones irregulares, discontinuas, de diferentes espesores; los bordes son arriñonados y con superficies en zigzag de baja altura y mayor amplitud; internamente son agregados de cristales granulares de calcita espar, con tamaños de hasta 30 μm , interpretados como producto de recristalización; se entrelazan

con **b**) láminas discontinuas de tonos oscuros, de tapices microbiales acompañados por materia orgánica, y **c**) fragmentos de cristales de calcita con textura limo de formas anhedrales, interpretados como producto de la desintegración de láminas claras (recristalizadas) preexistentes.

La caliza *mudstone* (**dma 5025**) está constituida por capas medianas, laminadas, que lateralmente cambian a *mudstone* calcáreo laminado (**fig. 27**). En el microscopio se identifica como *bindstone* recristalizado —microbialita— (**fig. 28**), con grado de recristalización medio (**textura tipo II**). Se distinguen láminas discontinuas, onduladas, entrelazadas, con contornos arriñonados; están constituidas por agregados de cristales de calcita espar (10-12 μm), separadas por hilos oscuros de materia orgánica. Hay presencia de los siguientes fósiles (6%): **a**) restos de algas *Dasycladaceas*; **b**) cuerpos circulares cuyos diámetros varían entre 120 y 200 μm , que aparecen reemplazados por cristales de calcita espar; se pueden diferenciar tres tipos: el primero con estructura interna concéntrica; el segundo, reemplazado por cristales de calcita espar, con prominencias en su periferia, y el tercero, con su contorno totalmente liso. Son interpretados como quistes de dinoflagelados calcáreos, y **c**) con menor frecuencia se reconocen fragmentos de algas filoideas, con formas de hojuela (*corn flakes*). Se observa piritita disseminada como mineral traza y se reconoce la presencia de hidrocarburos que rellenan espacios interpartículas e intrapartículas.

La caliza *mudstone* con textura tipo II de recristalización (**dma 5031**) se identifica como *bindstone* recristalizado —microbialita recristalizada— (**fig. 29**). Se reconoce un agregado de láminas discontinuas, onduladas, con contornos arriñonados, compuestas por fragmentos de cristales de calcita espar con textura limo. También se observan restos de



Figura 25. Calizas *mudstone* en capas gruesas, de dos formas: I) tabulares con base y techo planos paralelos, y II) con adelgazamientos y engrosamientos, tipo montículo; se interponen con *mudstone* calcáreos con materia orgánica, laminados, en capas muy gruesas (metro 73-75, $\Delta 94$ - $\Delta 93$).

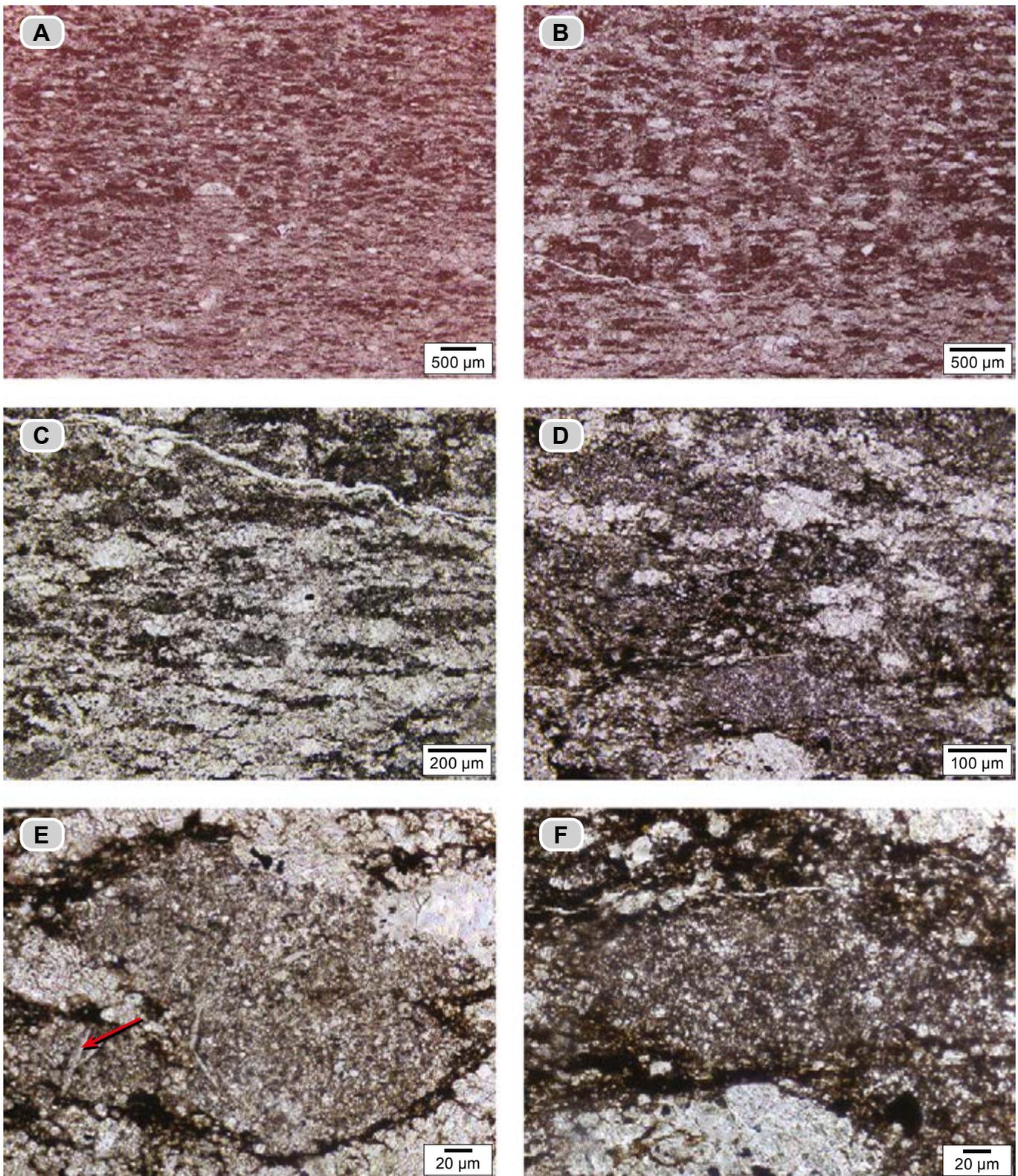


Figura 26. Caliza *mudstone* (dma 5023), en el microscopio es un *bindstone* recrystalizado. **A y B)** Estas figuras ilustran el estadio de menor recrystalización (textura tipo I); las láminas claras son discontinuas, están entrelazadas y constituidas por calcita espar; rodean y se entrecruzan con lentes y láminas oscuras de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina. En **B)** ampliación de un sector de la sección delgada. Nótese la alternancia de láminas claras y oscuras; en las claras se entrelazan cuerpos laminares blancos, levemente ondulados que encierran formas lenticulares e irregulares oscuras. **C)** Ampliación de otro sector de la sección delgada. Nótese el entramado de láminas claras constituidas por agregados de cristales de calcita espar y los tapices microbiales en color oscuro. **D)** A mayor aumento se observa cómo los tapices microbiales con materia orgánica y textura de tamiz recubren peloides de restos de algas *Dasycladaceas*. **E y F)** Detalle de una forma peloidal constituida por algas *Dasycladaceas*. En **E)** hay desarrollo de cristales aciculares de yesos (flecha roja) en el cuerpo peloidal, y está rodeado por láminas blancas recrystalizadas, interpretadas como microbialitas recrystalizadas.



Figura 27. Los *mudstone* calcáreos con materia orgánica y laminación plana-paralela que están por encima y debajo de la caliza *mudstone* (**dma 5031**), se unen y forman un intervalo de 3 m. Obsérvense las concreciones calcáreas elipsoidales (metro 74-77, $\Delta 94$ - $\Delta 93$).

algas *Dasycladaceas* en agregados peloidales (**fig. 29**). La materia orgánica se presenta en motas y como hilillos discontinuos. Hay vestigios de pirita diseminada. Los fósiles son cuerpos circulares con diámetros entre 100 μm y 200 μm , con relleno de cristales de calcita espar, interpretados como elementos reproductores de algas?

Intervalo estratigráfico B (70-86 m). Se reconoce desde el $\Delta 92$ hasta el $\Delta 85$ de la poligonal. En este intervalo comienza a presentarse arcilla; también se observan lentes de calcita fibrosa, interpretados como tapices de algas parcialmente desecados. Este intervalo termina en el quinto tramo cubierto (1,5 m de espesor).

Los *mudstone* arcillosos calcáreos con materia orgánica presentan colores grises oscuros (N3-N4), están laminados y tienen partición en las; se disponen en capas gruesas (40-70 cm) intercaladas con calizas *mudstone* grises oscuras (N2-N3), en capas delgadas de formas planas paralelas (**fig. 30**), que con alguna frecuencia presentan adelgazamientos y engrosamientos que configuran forma arrosariada. Se presentan concreciones calcáreas elipsoidales que en su interior llevan restos de troncos fosilizados; además, son notorias las impresiones de amonitas.

Intervalo estratigráfico C (87-91 m). Localizado entre los puntos $\Delta 85$ - $\Delta 84$ de la poligonal. El $\Delta 85$ se sitúa en el cruce del camino que salía del puente El Tablazo a la quebrada La Paja, hoy inundado.

Este intervalo se diferencia por la presencia de: **A)** lentes y láminas de calcita fibrosa, y **B)** yeso dispuesto de dos maneras: **1)** nódulos milimétricos resedimentados (metro 86) que forman franjas de hasta 3 cm, paralelas a S_0 ; **2)** en lám-

nas continuas dentelladas que alternan con láminas de materia orgánica.

Este intervalo está compuesto por *mudstone* calcáreos arcillosos que se presentan en dos tramos, separados por una caliza *mudstone* laminada, dispuesta en una capa gruesa con forma de montículos; tanto el tramo inferior, de 1,8 m, así como el superior, de 2,4 m de espesor (**fig. 31**), se caracterizan por la presencia de materia orgánica, laminación plana paralela y colores grises (N1-N3).

Los *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica tienen abundantes láminas y lentes de calcita fibrosa con espesores de 1 a 3 cm. Los lentes de calcita fibrosa tienen longitudes entre 3 y 15 cm, se disponen paralelos a la estratificación y están constituidos por cristales de calcita alargados con sus ejes perpendiculares a la estratificación, dispuestos en dos bandas separadas por una película oscura. Las láminas de calcita fibrosa tienen apariencia similar, pero extensión métrica (**fig. 31**). Estas estructuras se interpretan como tapices de algas afectadas por procesos de desecación diferencial (Horodysky, Bloeser y Vonder Haar 1977; Forero y Sarmiento 1982).

En el techo de los *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica se reconoce la presencia de agrupaciones de estructuras en forma de domos (Noffke et al. 2001), generadas por burbujas de gas (**fig. 32**), además de abundantes concreciones calcáreas con formas elipsoidales, irregulares y subesféricas, con el ϕ mayor, entre 20 cm y 40 cm (**fig. 33**).

En el microscopio, los *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica (**dma 4993**) se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialitas), con **textura tipo B** (**figs. 34 y 35**). Se observan láminas de tapices microbiales, materia orgánica y arcilla, esta última interpretada como material adherido a los tapices microbiales que forma una superficie abiótica (Konhauser 1998). La materia orgánica se observa en láminas o en agregados (motas).

Se diferencian dos sectores laminares: **1)** los constituidos por tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina, con arcilla (illita?) adherida en lentes, con fino hábito micáceo y extinción en conjunto (Pettijohn 1975), acompañada por materia orgánica (**fig. 34 y 35**), y **2)** intervalos laminares donde la arcilla está ausente y aumenta la cantidad de materia orgánica.

Se reconocen ocasionales lentes y láminas blanquecinas, discontinuas, compuestas por cristales cúbicos y sus fragmentos, textura limo, reemplazados por calcita y yeso. La forma de los cristales sugiere que correspondían originalmente a halita.

Los fósiles observados (2%) son: **a)** restos de algas *Dasycladaceas*; **b)** foraminíferos planctónicos con tamaños desde 100 μm hasta 120 μm , y **c)** ammonitellas rellenas por calcita y materia orgánica (**fig. 35**).

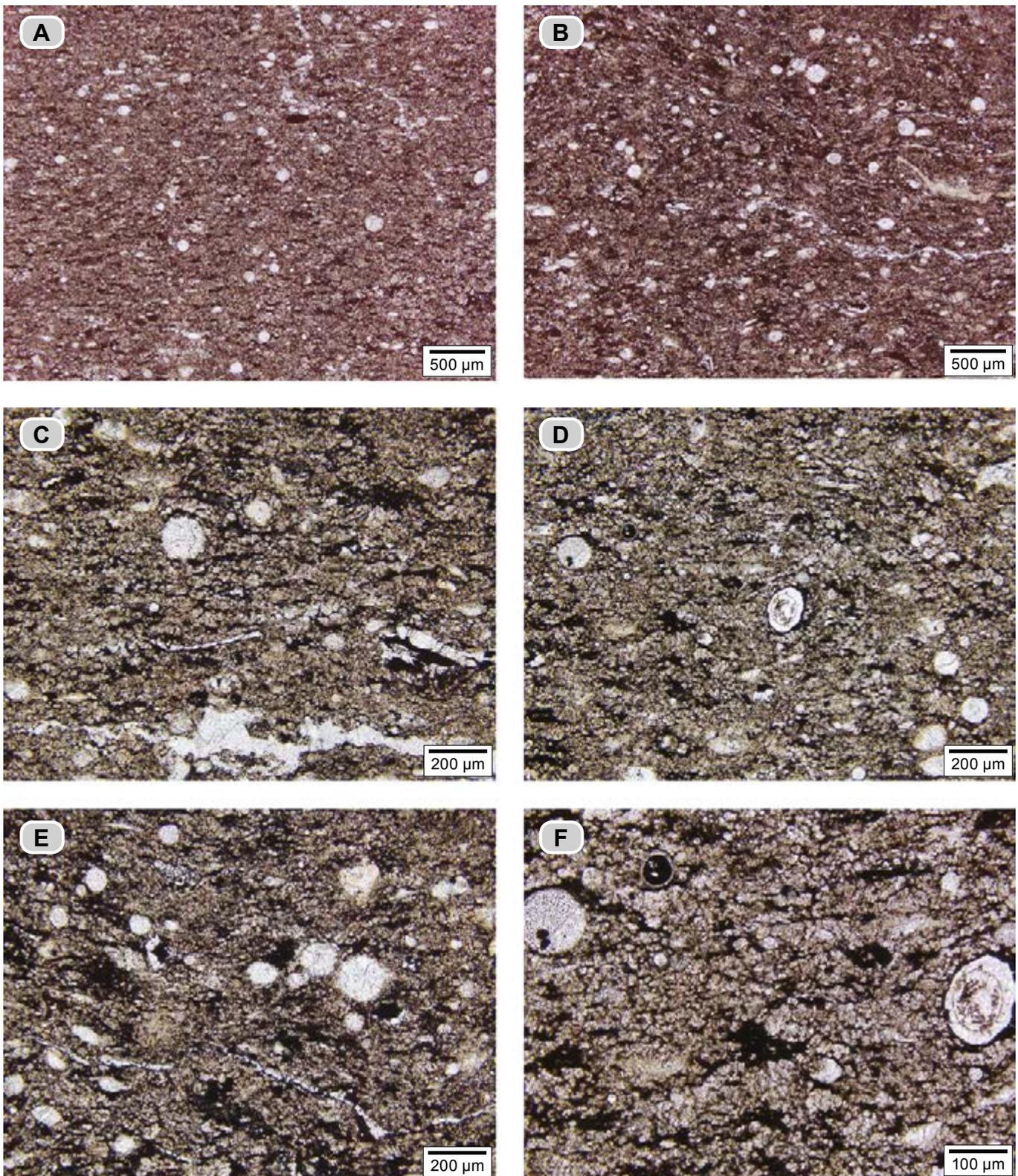


Figura 28. Caliza *mudstone* (dma 5025). En el microscopio es un *bindstone* recrystalizado. **A y B)** Grado de recrystalización medio, con presencia de cuerpos circulares reemplazados por cristales de calcita espar. **C y D)** Con mayor aumento se observan agregados de cristales de calcita, producto de recrystalización; por sectores dibujan láminas ondulosas; el tono oscuro corresponde a materia orgánica. Hay presencia de fragmentos fósiles no diferenciados, irregulares, de carbonato de calcio con rellenos de hidrocarburo y cuerpos circulares reemplazados por calcita espar, con su contorno totalmente liso. En **D**, en la parte central de la figura se reconoce la presencia de un resto calcáreo de alga *Dasycladacea*. **E y F)** Con mayor aumento, se observan tres cuerpos circulares reemplazados por cristales de calcita espar; tienen contornos totalmente lisos y contornos con prominencias en su periferia; son interpretados como quistes de dinoflagelados calcáreos? o elementos reproductores de algas? En **F** se observa, a la izquierda, un cuerpo circular con estructura interna concéntrica, y a la derecha, un resto de alga *Dasycladacea*.

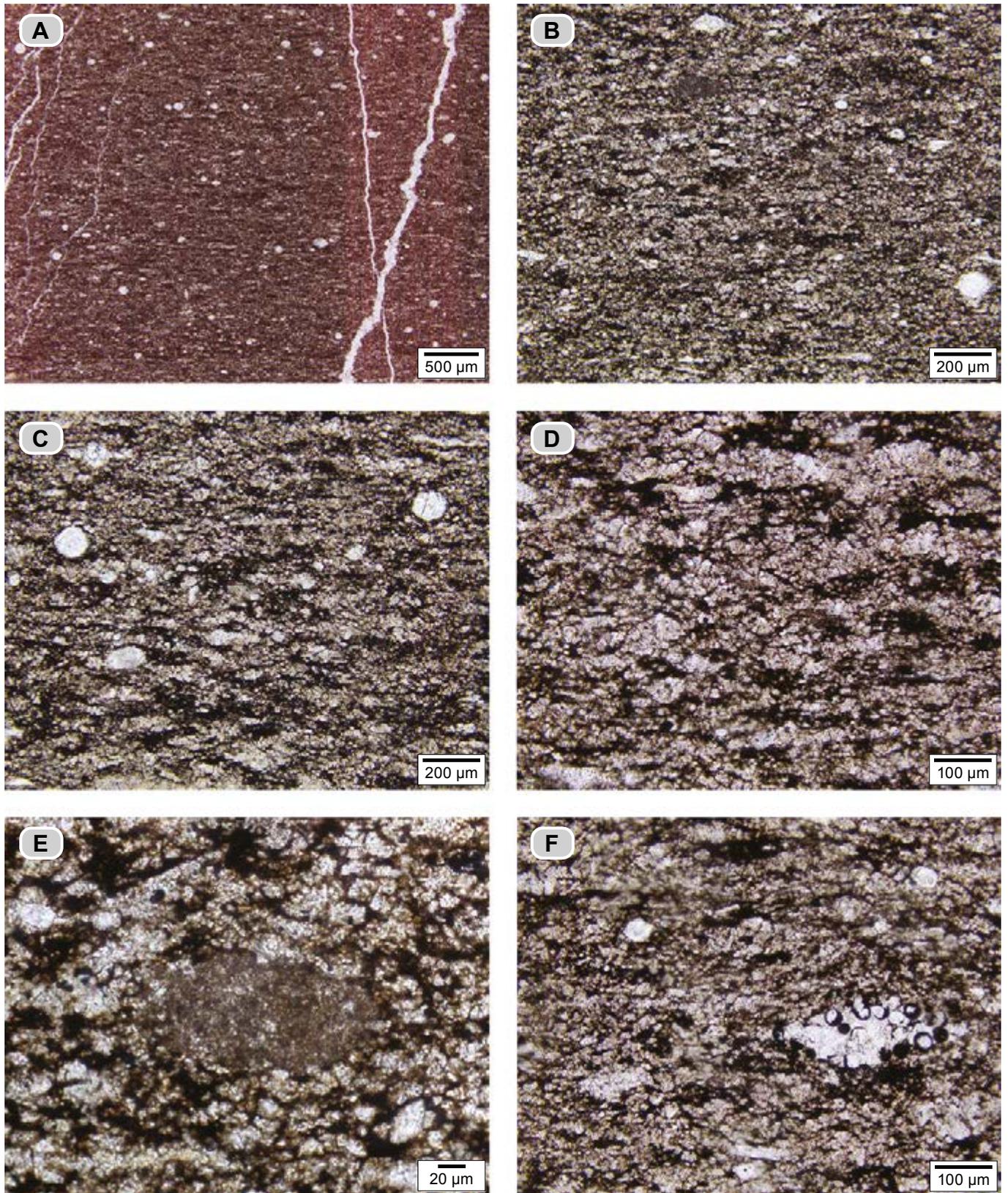


Figura 29. Caliza *mudstone* (dma 5031), con el microscopio es un *bindstone* recristalizado. **A)** Textura general de la roca tipo II. **B y C)** A mayor aumento se distingue, en tonos blancos, formas laminares y lenticulares de cristales de calcita espar con textura limo, además de cuerpos circulares reemplazados por cristales de calcita, con contornos lisos o con prominencias en su periferia (elementos reproductores de algas?). **D)** Con mayor aumento se observan formas laminares discontinuas con diferente espesor, constituidas por cristales de calcita espar, con textura limo grueso, separadas por motas e hilos de materia orgánica. **E)** En el centro, forma peloidal de restos de algas *Dasycladaceas*. **F)** Formas laminares blancas, discontinuas y lenticulares con bordes de pico de baja amplitud, constituidas por cristales de calcita espar. Nótese la presencia de un fragmento de caliche? perforado por rizoides o micelios.



Figura 30. Intervalo de *mudstone* arcillosos calcáreos laminados con materia orgánica. Nótese la partición en lajas (metro 85, Δ92).

La caliza *mudstone* que forma resalte y separa los dos tramos de *mudstone* calcáreos arcillosos se presenta como una capa muy gruesa, con forma de montículos unidos (**fig. 31 y 36**), con dimensiones mayores de 5 m de largo x 3 m de ancho x 1 m de alto. La capa está compuesta por: **1)** láminas gruesas de color gris claro (N6-N8), y **2)** conjuntos de láminas entre muy delgadas a medianas, ligeramente ondulosas, de colores gris oscuro (N2) y gris claro (N5-N8) (**fig. 36**), que recuerdan las laminaciones de los tapices cianobacteriales o microbiales (Cornée, Dicman y Busson 1992).

En el microscopio, las láminas gruesas de tonos grises claros (N6) (**dma 4989**) se identifican como *bindstone* recristalizados (microbialitas recristalizadas) (**fig. 37**). Se observan láminas continuas y discontinuas de diferente espesor, debido a ensanchamientos y engrosamientos, con bordes de aspecto de espigas unidas o arriñonados. Internamente están constituidas por cristales de calcita espar, subrectangulares, lanceolados aislados, lanceolados en abanicos, y en grupos: *popcorn*, con tamaños entre 100 μm y 120 μm.

En el microscopio, los conjuntos de láminas entre muy delgadas a medianas, ligeramente ondulosas, de colores gris oscuro (N2) y gris claro (N5-N8) (**dma 4990**), están constituidas por láminas grises claras muy delgadas, similares a las descritas en el párrafo anterior, y láminas oscuras están constituidas por (**fig. 37**): **a)** tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (micrita), en los que se reconoce la textura de tamiz, con tonos oscuros; **b)** peloides y lenticulas de micrita con contornos arriñonados, de tonos pardos amarillentos, con cristales secundarios aciculares de yeso superpuestos, y **c)** cuerpos de color blanco con forma de roseta *popcorn* y laminares, que representan intraclastos.



Figura 31. **A)** Afloramiento del intervalo estratigráfico C. Nótese en la parte inferior de la fotografía, entre líneas amarillas, el desarrollo de montículos en la capa de caliza *mudstone*, suprayacida por un paquete de *mudstone* calcáreos con arcillas y materia orgánica (metro 87-94, Δ85). **B)** *Mudstone* calcáreos con materia orgánica y arcillas. La flecha amarilla señala la presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa, que se ilustran ampliadas en **C)** (metro 94-95, Δ84).



Figura 32. Cuerpos discoidales en el techo de los *mudstone* calcáreos, generados por burbujas de gas (metro 90).



Figura 33. Concreciones calcáreas con formas elipsoidales con ϕ mayor de 20 cm, e irregulares con ϕ mayor de 40 cm. Nótese además la presencia de lentes de calcita fibrosa (metro 90-91, $\Delta 83$).

d) En las láminas oscuras hay presencia de cuerpos circulares de 40-60 μm , con su parte central ocupada por un cristal de calcita espar, que está rodeado por dos anillos: quistes de dinoflagelados calcáreos (Rehákoká 2000).

Intervalo estratigráfico D (91-92 m). Este intervalo se localiza entre los puntos de la poligonal $\Delta 84$ y $\Delta 81$, destaca en la quebrada por la morfología de resalte que lateralmente se difumina por la disminución en el contenido de carbonato de calcio (**fig. 38**).

Las calizas *mudstone* se presentan en capas delgadas a medianas que resaltan moderadamente en el perfil topográfico, alternan con láminas de *mudstone* calcáreos con materia orgánica de color gris oscuro (N2) (**fig. 39**). Hay presencia de concreciones calcáreas de formas elipsoidales a irregulares, con ϕ desde 10 cm hasta 30 cm, y amonitas en volumen en su interior.

En el microscopio, la caliza *mudstone* (**dma 4996**), se identifica como *bindstone* con materia orgánica (microbialita) (**fig. 40**). Sus constituyentes son: **a)** tapices microbiales biomineralizados con calcita microcristalina (microbialitas); se reconoce la textura porosa en tamiz con recristalización incipiente; **b)** peloides de agregados de restos algas *Dasycladaceas*; **c)** fragmentos de cristales de calcita espar; **d)** la materia orgánica se presenta en forma motas e hilos, y **e)** restos de conchillas de foraminíferos planctónicos (7%-10%), con tamaños entre 100 μm y 170 μm .

Hay presencia de cristales cúbicos y rómbicos euhedrales de calcita. Se identifica pirita diseminada como mineral traza.

Intervalo estratigráfico E (92-116 m). Localizado entre los puntos de la poligonal $\Delta 81$ y $\Delta 74$, en su base se encuentra el sexto tramo cubierto (2,5 m). El intervalo se subdivide en tres conjuntos: **Conjunto E1** (inferior) y **Conjunto E3** (superior) están constituidos principalmente por *mudstone* calcáreos con materia orgánica en intervalos de hasta 2 m, que alternan con esporádicas calizas *mudstone*. Las formas de las calizas quedan expresada así: **I)** capas gruesas con forma de montículos, y **II)** capas delgadas arrosariadas. El **Conjunto E2** (intermedio) genera resalte en el perfil topográfico; en él alternan calizas *mudstone* con *mudstone* calcáreos con materia orgánica, en capas delgadas con formas de montículos o arrosariadas.

Conjunto E1 (92-99 m). Con 7 m de espesor, forma entrante en el perfil topográfico. Está constituido por *mudstone* calcáreos con materia orgánica, grises oscuros (N3-N5), presentan laminación plana paralela, en intervalos de hasta 1,5 m. Son abundantes los lentes y láminas de calcita fibrosa y los cristales superficiales de yeso secundario en agregados con forma de roseta. Las concreciones calcáreas son elipsoidales con ϕ variable, entre 12 cm y 30 cm, que en general aparecen paralelas a la estratificación.

Conjunto E2 (99-102 m). Genera resalte en el perfil topográfico. Está limitado en la base y techo por calizas *mudstone* laminadas dispuestas en capas gruesas (**fig. 41**); entre ellas los intervalos de hasta 60 cm de *mudstone* calcáreos con materia orgánica con laminación plana paralela (**dma 5005**), son separados por calizas *mudstone* en capas delgadas. En los *mudstone* calcáreos hay presencia de láminas de yesos interpuestas entre láminas de materia orgánica (**dma 5006**).

Las calizas *mudstone* son grises (N3), generan resalte en el perfil topográfico y que limitan este conjunto, tienen varios modos de presentación: **I)** capa gruesa con forma tabular plano paralela, laminada; y **II)** capa gruesa con aspecto de montículo, internamente diferenciada en láminas gruesas claras, macizas con otras oscuras, deleznales.

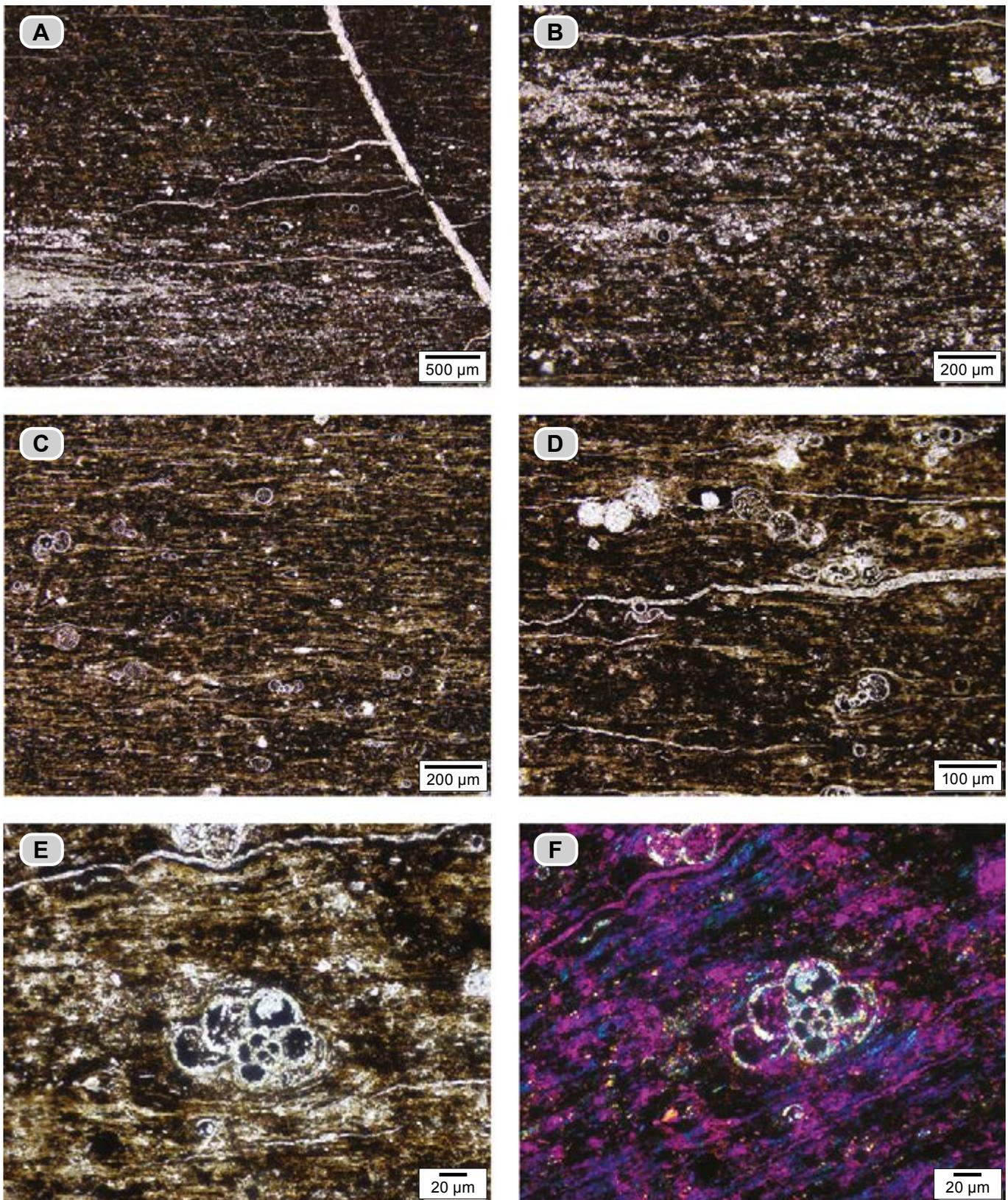


Figura 34. *Mudstone* calcáreo arcilloso con materia orgánica (dma 4993); en el microscopio se identifica como un *bindstone* con arcilla y materia orgánica (microbialita). **A)** Sector laminar oscuro constituido por tapices microbiales alternados con láminas discontinuas blanquecinas. **B)** Con mayor aumento se observan las láminas blanquecinas, son cristales cúbicos de carbonato de calcio y yeso que aparecen concentrados a modo de lentes y láminas; la presencia de carbonato de calcio se interpreta como reemplazamiento de cristales de halita. **C y D)** Observe la presencia de foraminíferos planctónicos; en **C** además, se aprecia la textura lenticular (hojuelas). **E)** Presencia de un foraminífero planctónico hedbergelido rodeado por tapices microbiales con presencia de arcilla. **F)** El tinte azul resalta la presencia de arcilla y es producido al insertar el compensador 1A, cruzar los nicoles y colocar la platina NE-SW.

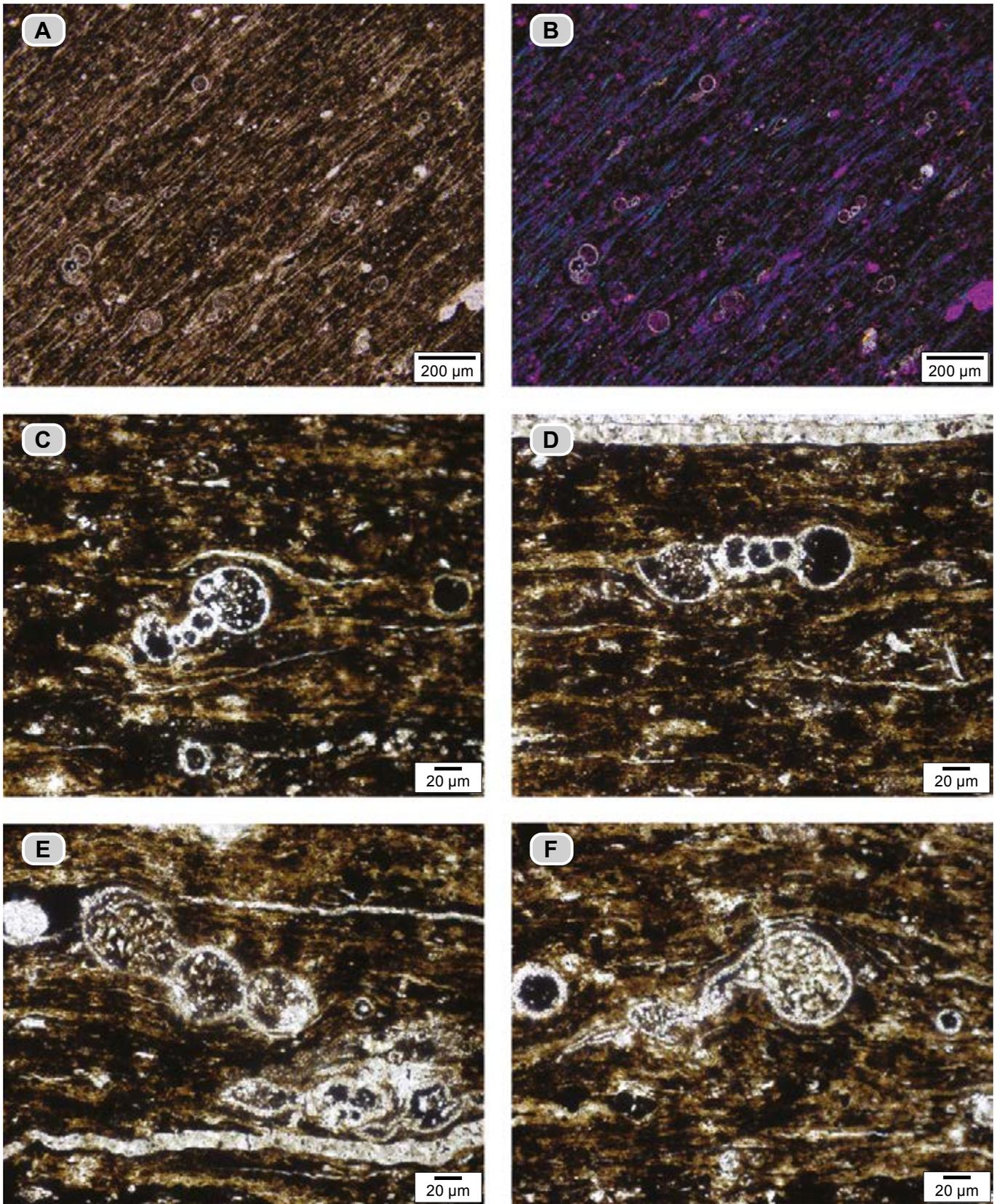


Figura 35. *Mudstone* calcáreo arcilloso con materia orgánica (**dma 4993**); en el microscopio se identifica como un *bindstone* con arcilla y materia orgánica. **A)** Tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina con textura lenticular (hojuelas), recubierta por una película de arcilla de tono pardo claro. **B)** Fotografía para mostrar que las partículas que dan el tono pardo claro en **A** son arcillas, como lo muestra el tono azul por extinción en conjunto, que da al insertar el compensador 1A, los nicols cruzados y rotar la platina NE-SW. También se observan foraminíferos planctónicos y conchillas de ammonitelas. **C, D, E y F)** Con mayor detalle destacan tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina con materia orgánica (microbialitas), que recubren conchillas de amonitas o de foraminíferos planctónicos.



Figura 36. **A)** Aspecto monticular de la capa que separa el tramo inferior y superior de los *mudstone* calcáreos arcillosos del intervalo estratigráfico C (metro 87-90). **B)** Detalle del extremo derecho de la capa monticular de la **fig. A**; nótese la laminación a modo de estructuras estromatolíticas con alternancia de láminas claras (N6) y oscuras (N3) (metro 87, Δ84).

Los *mudstone* calcáreos con materia orgánica de este intervalo, en el microscopio (**dma 5005**), se identifican como *bindstone* con materia orgánica (microbialitas) (**fig. 42**), y están constituidos por: **a)** tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina, con textura en tamiz; **b)** la materia orgánica se reconoce como hilos y motas; **c)** restos de algas *Dasycladaceas* en agregados peloidales, intraclastos y partículas; **d)** conchillas de foraminíferos planctónicos (1%), con tamaños entre 100 μm y 120 μm ; **e)** yeso que reemplaza (1,5%) cristales de halita con formas cúbicas o de tolva, y **f)** pirita diseminada.

En los *mudstone* calcáreos con materia orgánica abundan los cristales de yeso secundarios superficiales en agregados con forma de rosetas blanquecinas que acompañan, sobrepuestas, a domos de gases; en los tapices microbiales actuales también se observan formas redondeadas similares debido a la presión ejercida por el ascenso de gases (domos de gas) (**fig. 43**).

En el **Conjunto E2** destaca la alternancia de yeso y materia orgánica en láminas continuas o discontinuas ligeramente onduladas (metro 100), en varios tonos: grises (N2-N3), blancos (N8), rojizos (10YR 5/4) y pardos verdosos (10Y 6/2, 5Y 5/6) (**fig. 44**). En el microscopio (**dma 5006**) las láminas negras están constituidas por materia orgánica y alternan con láminas claras compuestas por cristales de yeso que crecieron perpendiculares a S_0 (**fig. 45**).

Conjunto E3 (102-116 m). Está compuesto por *mudstone* calcáreos con materia orgánica en intervalos de hasta 3 m, en alternancia con calizas de textura *mudstone* en capas delgadas a medianas. En la parte basal del conjunto hay abundante presencia de láminas y lentes de calcita fibrosa, que disminuyen hacia la parte superior.

A partir del $\Delta 80$ de la polygonal se observan los 7 m basales del conjunto E3. Son *mudstone* calcáreos con materia orgánica de tonos grises oscuros (N3), con laminación plana paralela, que alternan con calizas *mudstone* grises oscuras (N3), macizas, en capas delgadas con formas tabulares, planas paralelas. Las láminas y los lentes de calcita fibrosa están presentes; en ocasiones su abundancia produce franjas de hasta 15 cm de espesor (**fig. 46**), que cuando meteorizan resaltan por su color marrón. Hay presencia abundante de concreciones calcáreas elípticas o discoidales con ϕ de 30 cm.

Los seis metros superiores de este conjunto se inician a partir del $\Delta 76$ (**fig. 47**). Allí afloran *mudstone* calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N3), con laminación plana paralela, en intervalos de hasta 3 m. Hay menor presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa. Alternan con calizas de textura *mudstone* que dibujan salientes en el perfil topográfico; son grises oscuras (N3) y se presentan en capas medianas y delgadas de formas variadas: **a)** con superficies plano paralelas, y **b)** con contactos irregulares, dentellados; estas capas se observan como cuerpos alineados desconectados por estrangulamiento (**figs. 47 y 48**).

Las concreciones calcáreas presentes tienen formas discoidales e irregulares, con ϕ de 30 cm y 20 cm. En las concreciones se encuentran amonitas en volumen e impresiones de restos de peces (**fig. 49**).

En el microscopio, los *mudstone* calcáreos con materia orgánica presentan texturas tipo B (por la presencia de peloides de micrita) (**fig. 50**):

1) Bindstone con materia orgánica (microbialitas) (**fig. 51**) (**dma 4965**), y **textura B**, en donde se reconocen: **a)** láminas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina de color pardo oscuro acompañadas por materia orgánica, con recristalización incipiente; **b)** cuerpos peloidales de tamaños mayores a 100 μm , e intraclastos de micrita, interpretados como disgregación de tapices microbiales y que corresponden a lo que Wolf (1965) llama *peloides de*

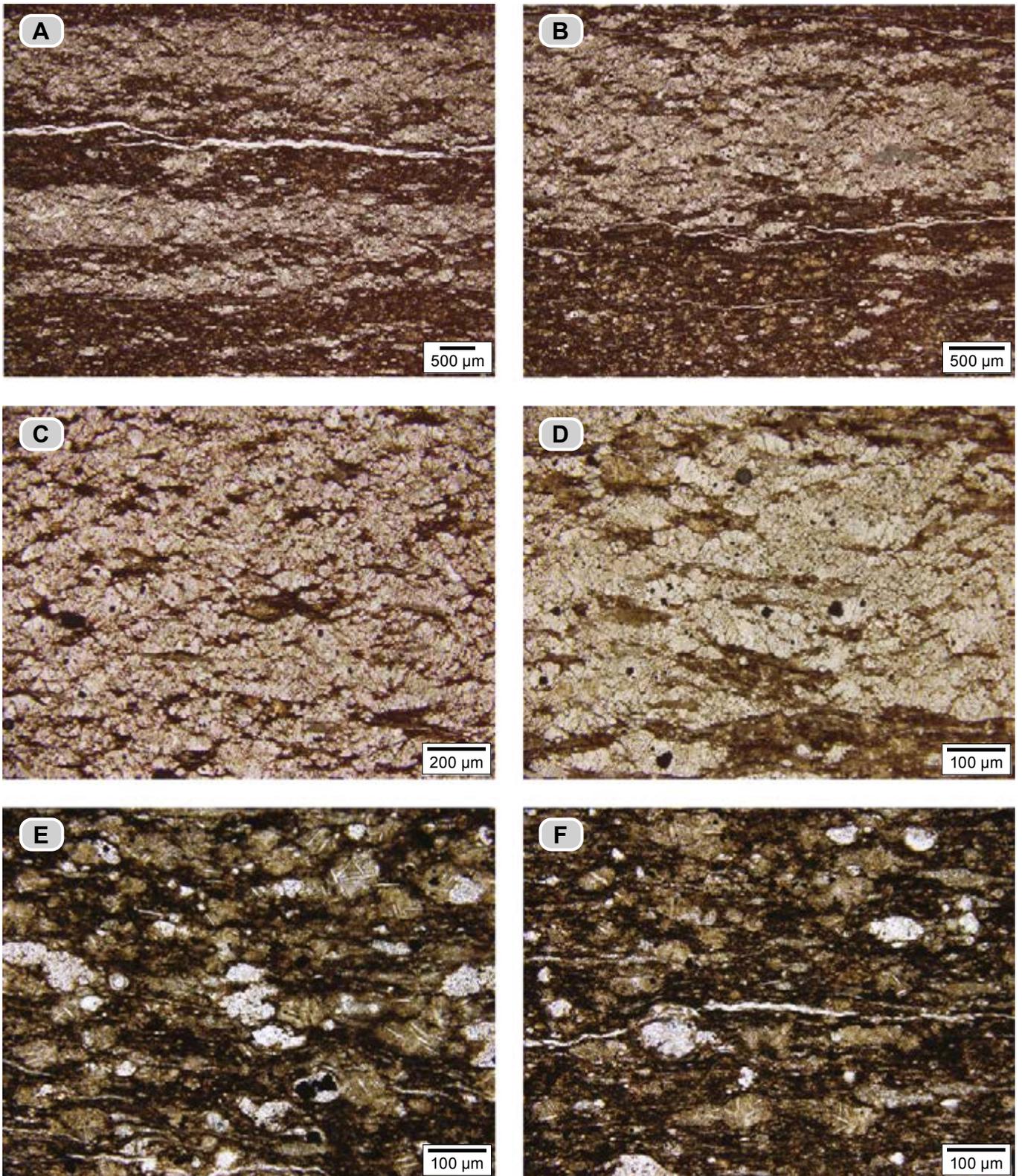


Figura 37. Vista microscópica de las láminas muy delgadas a medianas (dms 4990). **A)** Alternancia de láminas de *bindstone* recristalizados (claros) y tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina: *bindstone* con materia orgánica (oscuros). **B)** Detalle de una pareja de láminas: blanca-oscuro. La lámina blanca destaca por su aspecto espigado; también se observan bordes arrifionados. En las láminas oscuras destaca la abundancia de peloides de micrita rodeados por tapices microbiales. **C y D)** Detalle de una de las láminas blancas: están constituidas por cristales de calcita espar, subrectangulares, lanceolados aislados, lanceolados en abanicos y en grumos con bordes arrifionados. **E y F)** Detalle de una lámina oscura conformada por tapices microbiales biomineralizados por micrita microcristalina (tono pardo oscuro) y peloides de micrita, algunos con contornos arrifionados (pardo amarillento) que presentan cristales aciculares de yesos secundarios sobreimpuestos; también se observan, en menor proporción, cuerpos blancos de calcita espar con bordes que asemejan *popcorn*.



Figura 38. Afloramiento de calizas *mudstone* del intervalo estratigráfico **D** entre líneas amarillas punteadas. Nótese que cambian lateralmente (hacia la derecha) a *mudstone* arcillosos calcáreos con laminación plana-paralela (metro 89-93, Δ85-Δ84).

algas, y **c**) fragmentos de cristales de calcita, con tamaños entre 3-10 μm ; interpretados como minerales disgregados de tapices recrystalizados.

Los bioclastos (1,5%) son restos de conchillas de foraminíferos planctónicos, con tamaños entre 100-150 μm ; también se observan restos de bivalvos y ostrácodos, con disposición paralela o formando ángulo respecto a S_0 . Se reconocen restos dispersos de algas *Dasycladaceas*.

La materia orgánica se observa como laminillas y en agregados (motas). Hay presencia de hidrocarburos que rellenan espacios e intruyen las diferentes láminas (semejan microvolcanes).

La pirita se presenta diseminada y en cantidades menores a 1%; y se reconocen algunos fragmentos de cuarzo como minerales traza.



Figura 39. Detalle del cuerpo aflorante en la **fig. 38**. Capas delgadas de calizas *mudstone* separadas por *mudstone* calcáreos con materia orgánica con laminación plana-paralela (metro 91, Δ82).

2) Bindstone con materia orgánica (**dma 4975**) (microbialitas) y **textura tipo B (fig. 52)**. Presenta laminación entre delgada y mediana, definida por texturas y porcentaje de los constituyentes. En general, hay tendencia de los fragmentos a ser paralelos a S_0 ; sin embargo, algunos hacen un ángulo con S_0 .

Se diferencian tres láminas en las que los constituyentes son (**fig. 52**): **a**) tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina, en tonos pardo oscuro, acompañados por materia orgánica; **b**) cuerpos gruesos irregulares y láminas muy delgadas que se difuminan, de micrita con recrystalización incipiente de color pardo claro; **c**) peloides de micrita; **d**) materia orgánica dispuesta en laminillas y motas; **e**) hidrocarburos que sustituyen bioclastos y rellenan espacios y fracturas; **f**) fragmentos laminares alargados compuestos por cristales de calcita con tamaño 4-10 μm (posiblemente algas filoideas); **g**) cristales individuales de calcita provenientes de la disgregación de las algas o de rocas con recrystalización; **h**) arcilla que se encuentra en menor porcentaje interpuesta entre estos tapetes; **i**) fragmento de caliche perforado por rizoides; **j**) conchillas de foraminíferos planctónicos; **k**) pirita diseminada (2,5%), y **l**) fragmentos y cristales cúbicos de halita reemplazados por calcita espar.

En la lámina inferior, constituida por tapices microbiales biomineralizados con calcita microcristalina, materia orgánica y, en menor proporción, arcilla; hay presencia abundante de grumos irregulares, intraclastos y peloides de micrita (**figs. 52A, B, C y D**).

En la lámina intermedia, rica en materia orgánica, es notoria la presencia de hidrocarburos; hay fragmentos laminares de algas y de cristales de calcita espar, rodeados por el entramado microbial (**fig. 52E**).

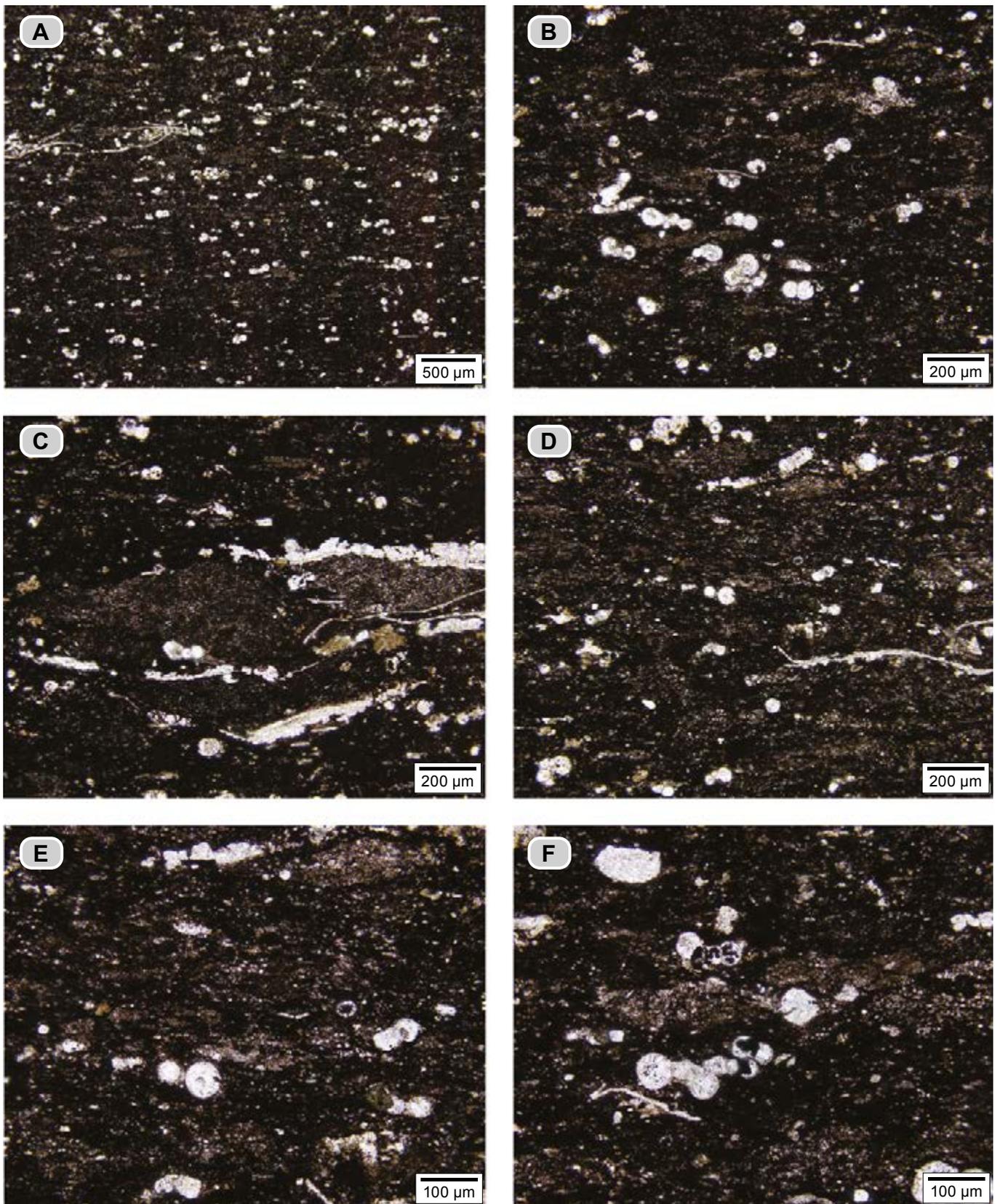


Figura 40. Caliza *mudstone* (dma 4996); en el microscopio se identifica como *bindstone* con materia orgánica (microbialita). **A)** Aspecto general de los tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (puntos amarillos y blancos), con recristalización incipiente; la materia orgánica se presenta en motas en ocasiones alineadas; nótese las conchillas de foraminíferos planctónicos. **B)** Con mayor aumento se observan tapices microbiales biomineralizados con calcita microcristalina (microbialitas), con materia orgánica y foraminíferos. **C, D, E y F)** Con mayores aumentos se reconocen tapices microbiales con la textura porosa en tamiz, peloides de agregados de restos de algas *Dasycladaceas* y foraminíferos planctónicos, algunos con sus cámaras rellenas de hidrocarburo.



Figura 41. Conjunto E2 (intermedio), suprayacido por el tramo basal del conjunto E3 (el límite superior está señalado por la línea amarilla punteada). El conjunto E2 está limitado a la base y el techo por capas de calizas *mudstone* laminadas; entre ellas alternan *mudstone* calcáreo con materia orgánica (**dma 5005**) y calizas *mudstone*; también hay presencia de láminas de yeso (**dma 5006**) (metro 99-105, Δ80-Δ79).

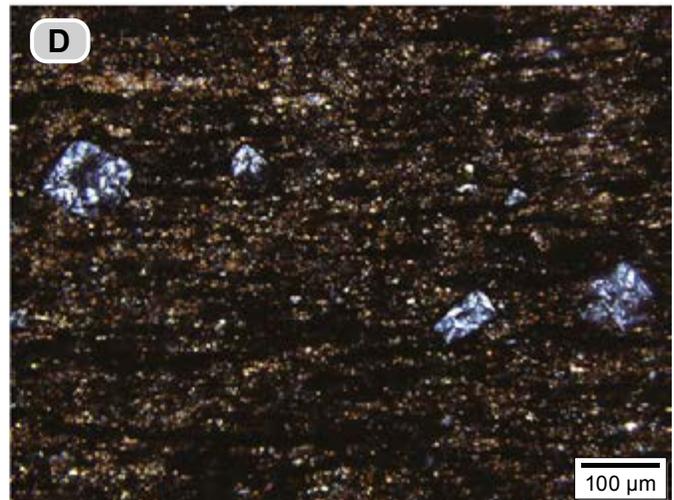
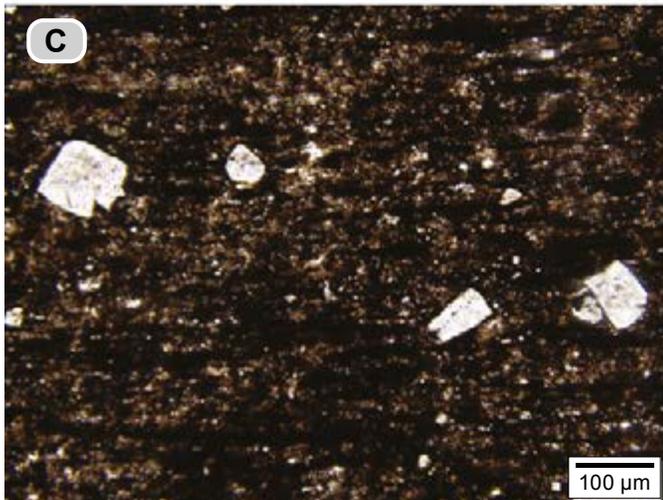
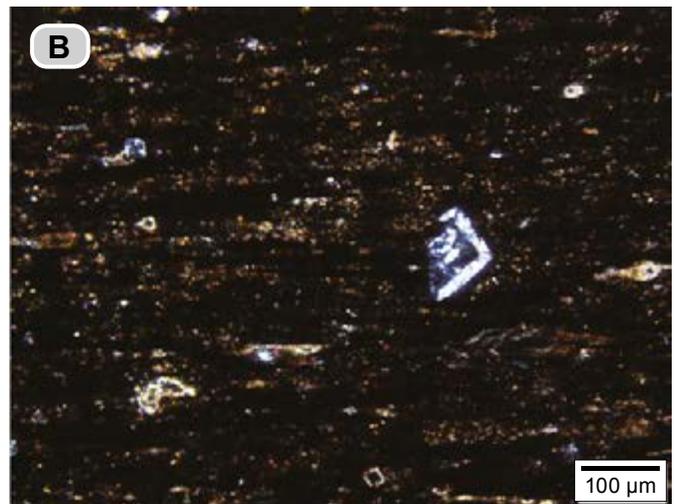
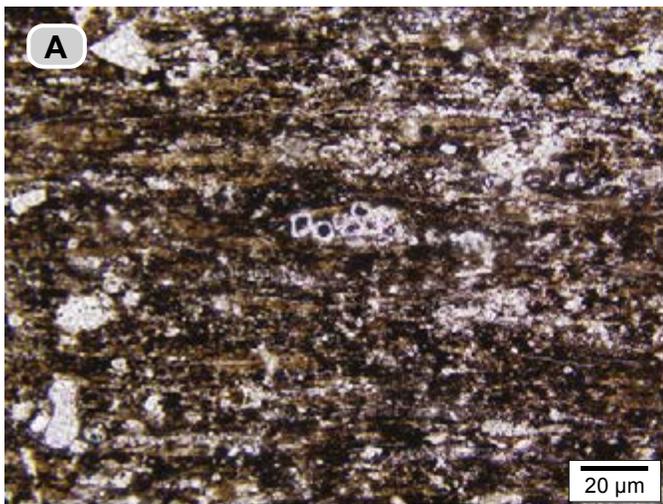


Figura 42. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica (**dma 5005**); en el microscopio se identifica como *bindstone* con materia orgánica (microbialita). **A)** Tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina, con abundante materia orgánica en laminillas y motas; se observan restos de algas *Dasycladaceas* y cristales de yeso. **B)** Se resalta la presencia de cristales cúbicos de yeso que reemplazan halita original. **C y D)** Se observan tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (tonos amarillos), además de materia orgánica en motas e hilos; nótese los cristales cúbicos con reemplazamiento de halita reemplazados por yeso.

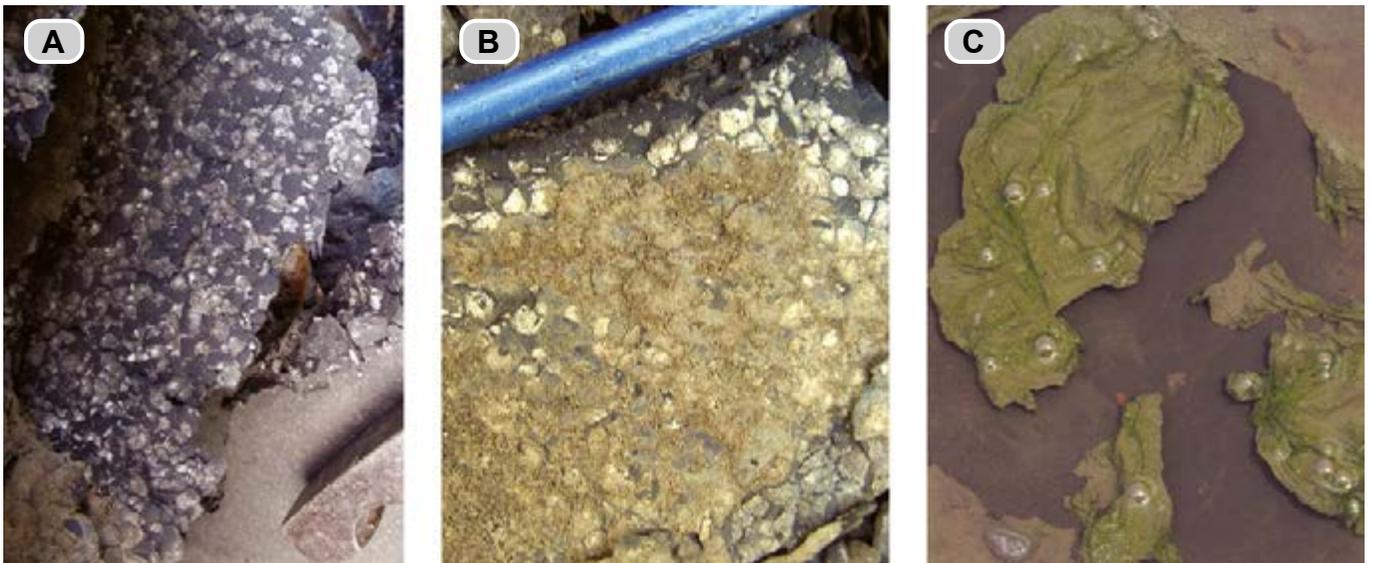


Figura 43. En el techo de los *mudstone* calcáreos con materia orgánica (conjunto E2) destacan cuerpos que en vista de planta aparecen como círculos o elipses (domos de gases) (metro 100) acompañados por agregados de cristales de yeso (color blanco). Las formas circulares se interpretan como la huella de burbujas de gases, tal como se observa actualmente en tapices microbiales desarrollados en charcas de agua lluvia (fig. C).



Figura 44. A) Se observa *mudstone* calcáreo con materia orgánica (metro 99-110); la parte superior del recuadro está ampliada en la fotografía inferior. **B)** Nótese las alternancias de láminas muy finas de color gris oscuro y blanco; por meteorización, estas láminas toman tonos pardos y amarillentos (dma 5006) (metro 100, Δ79).

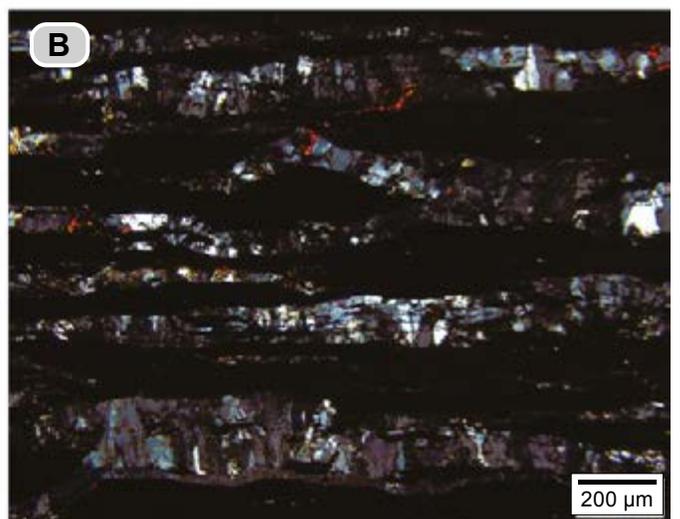


Figura 45. Esta figura ilustra el aspecto microscópico de las láminas que se muestran en el afloramiento de la fig. 43: corresponden a láminas de yeso y láminas de materia orgánica con pirita (bandas oscuras) (dma 5006).

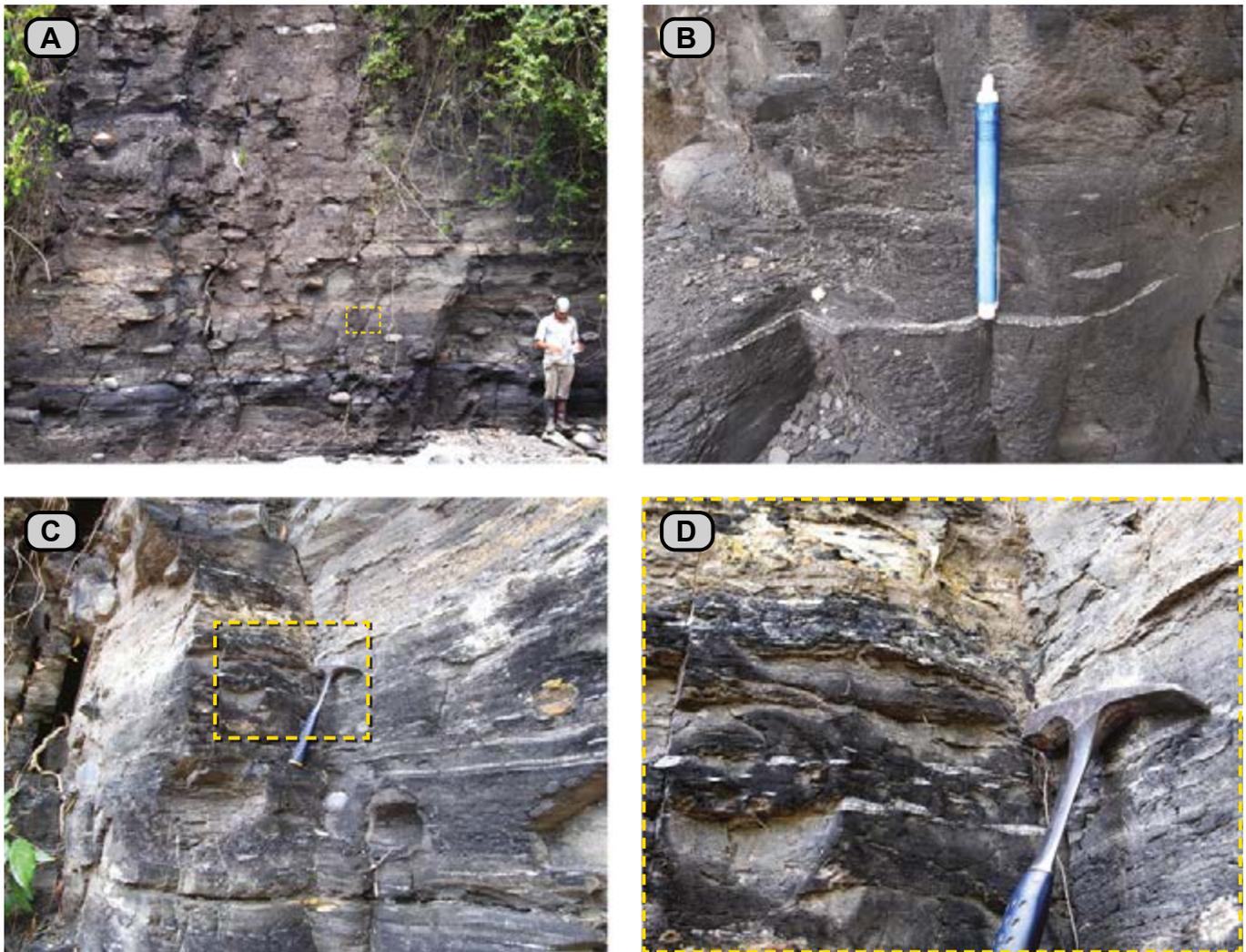


Figura 46. Aspecto general del tramo inferior del conjunto E3. **A)** *Mudstone* calcáreos con materia orgánica y concreciones calcáreas elipsoidales, paralelas a la estratificación (metro 109-112). **B, C y D)** Lentes y láminas de calcita fibrosa paralelas a la estratificación (S_0); en ocasiones forman franjas de tono marrón por meteorización (metro 109). En **D** se amplía el recuadro amarillo de **C**; nótese los lentes de calcita fibrosa (metro 110).



Figura 47. Aspecto general del tramo superior del conjunto E3. Intervalos de *mudstone* calcáreos con materia orgánica que dibujan entrantes en el perfil topográfico; en alternancia con capas medianas de calizas *mudstone* que generan salientes en el perfil topográfico. La caliza *mudstone* señalada por la flecha amarilla inferior presenta estrangulamiento y cuerpos de rocas desconectados. Las capas señaladas con flechas amarillas tienen su superficie inferior dentellada (metro 112-115, $\Delta 76-\Delta 74$).

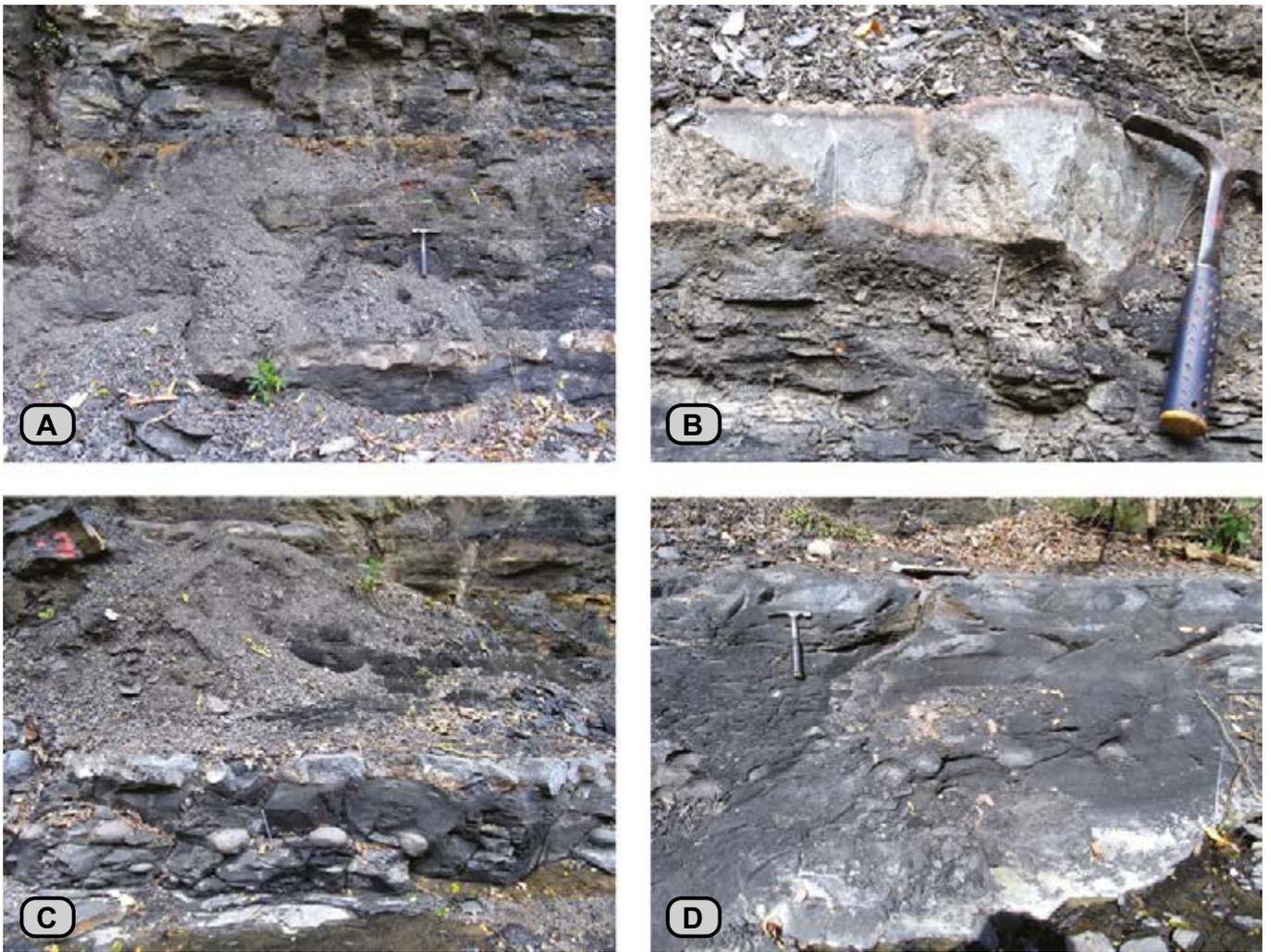


Figura 48. Conjunto E3 del intervalo estratigráfico E. **A)** *Mudstone* calcáreos con materia orgánica que alternan con calizas *mudstone* en capas delgadas; se observan como cuerpos alineados desconectados; la superficie inferior es dentellada (metro 113-114). **B)** Detalle de la forma dentellada de la superficie inferior; nótese las superficies inferior y superior oxidadas (metro 114). **C)** Caliza *mudstone* gris claro con su superficie inferior dentellada; nótese por debajo de esta capa la presencia de concreciones calcáreas discoidales alineadas embebidas en los *mudstone* calcáreos con materia orgánica (metro 114-115). **D)** Nótese en la parte superior de la figura (martillo) los fantasmas de concreciones de la capa más superior del conjunto E3 (metro 116, $\Delta 74$).



Figura 49. Concreción calcárea con restos de peces en volumen; nótese la conservación de las escamas (metro 114), intervalo estratigráfico E3.



Figura 50. Fotografía que muestra los intervalos de *mudstone* calcáreos con alternancias de calizas *mudstone* en capas medianas (metro 113, $\Delta 74$).

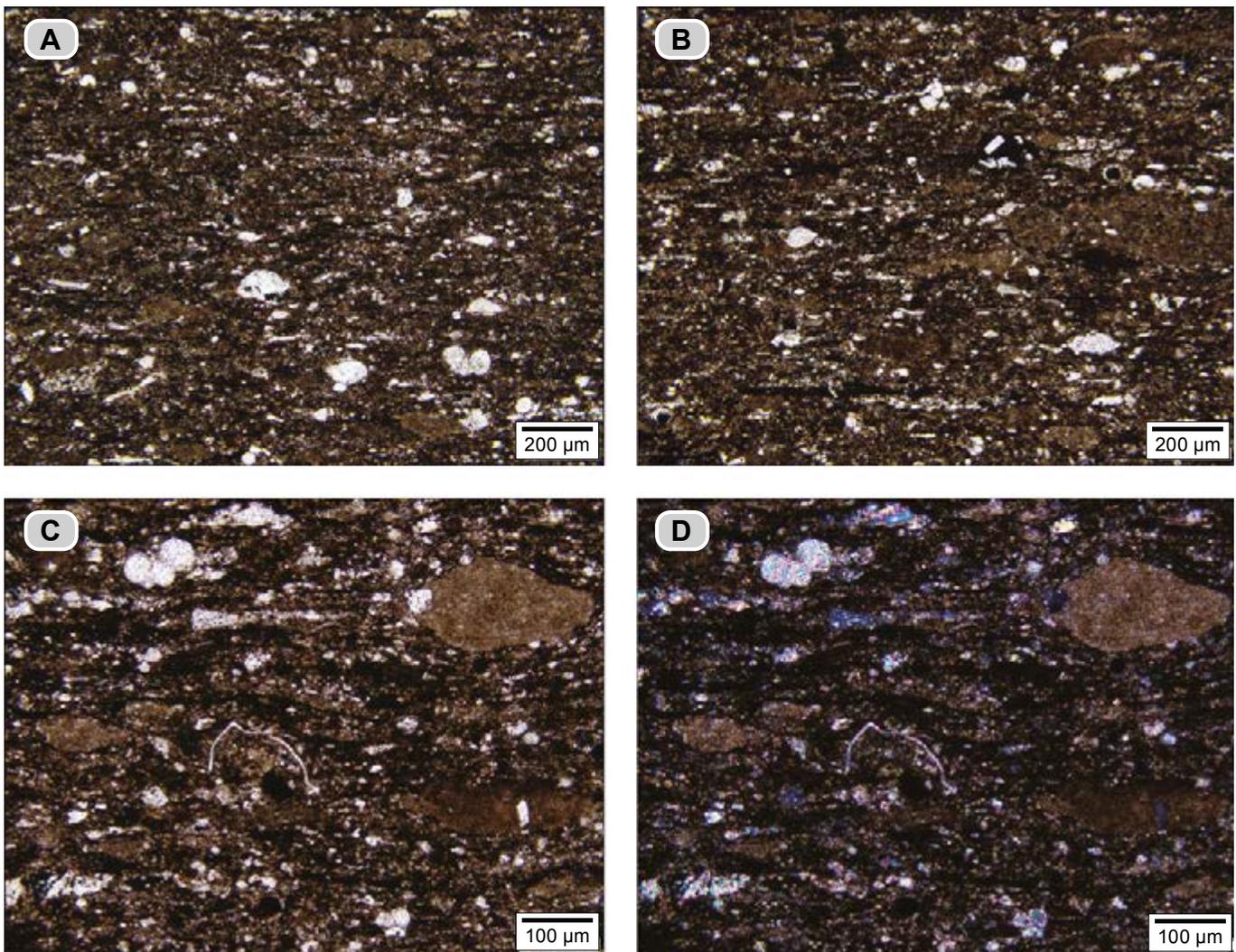


Figura 51. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica (**dma 4965**), en el microscopio se identifica como *bindstone* con materia orgánica (microbialita). **A y B)** Tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (tonos pardos oscuros) y formas peloides e intraclastos; estos últimos son producto de tapices preexistentes desecados y removilizados. Hay presencia de conchillas de foraminíferos planctónicos, ostrácodos y fragmentos de cristales blancos de calcita; la materia orgánica (negra) se presenta como hilos y motas. **C y D)** Con mayor aumento se observan láminas de micrita que se adelgazan hasta desaparecer; además, materia orgánica e hidrocarburos; en **D** la fotografía fue tomada con nicoles cruzados.

En la lámina superior, las algas filoideas que se observan desde la lámina intermedia, son más abundantes, están mejor preservadas y su longitud varía entre 1 mm hasta 15 mm; también es abundante la presencia de materia orgánica y de hidrocarburos (**fig. 52 F**).

En el microscopio, las calizas *mudstone* dejan ver varios estadios de recristalización y varias texturas de neomorfismo (**fig. 53**), así:

1) Textura tipo III. La roca está recristalizada (**dma 4967**) y por tanto los tamaños de los cristales de calcita espar pasan a 6 μm (**fig. 54**). Se reconocen: **a)** fragmentos fosfatizados de restos de peces; **b)** fragmentos de materia vegetal; **c)** formas circulares (100 μm a 200 μm), constituidas internamente por cristales de calcita espar (elementos reproductores de algas?), y **d)** restos de bivalvos, ostrácodos y otros

restos no identificables. También se presentan pirita (3%) y cuarzo como trazas. Las partículas alargadas tienen inclinación alta en relación con S_0 .

2) Textura tipo I. Con estadio de recristalización bajo (**dma 4976**). Se identifica como un *bindstone* (microbialita) (**fig. 55**). Se reconoce la textura original, y se presentan láminas claras y oscuras. En las láminas claras se entretienen: **a)** cuerpos laminares blancos, con un ancho de 20 μm , alargados, discontinuos, ondulados, entrelazados, paralelos a S_0 , constituidos internamente por cristales de calcita espar de tamaños 6-10 μm (láminas microbiales recristalizadas); **b)** láminas discontinuas y cuerpos peloidales de micrita con recristalización incipiente en tonos pardos oscuros, y **c)** tapices microbiales con materia orgánica. En las láminas oscuras están conformadas por peloides de micrita en tono pardo claro, rodeados por tapices microbiales con materia orgánica.

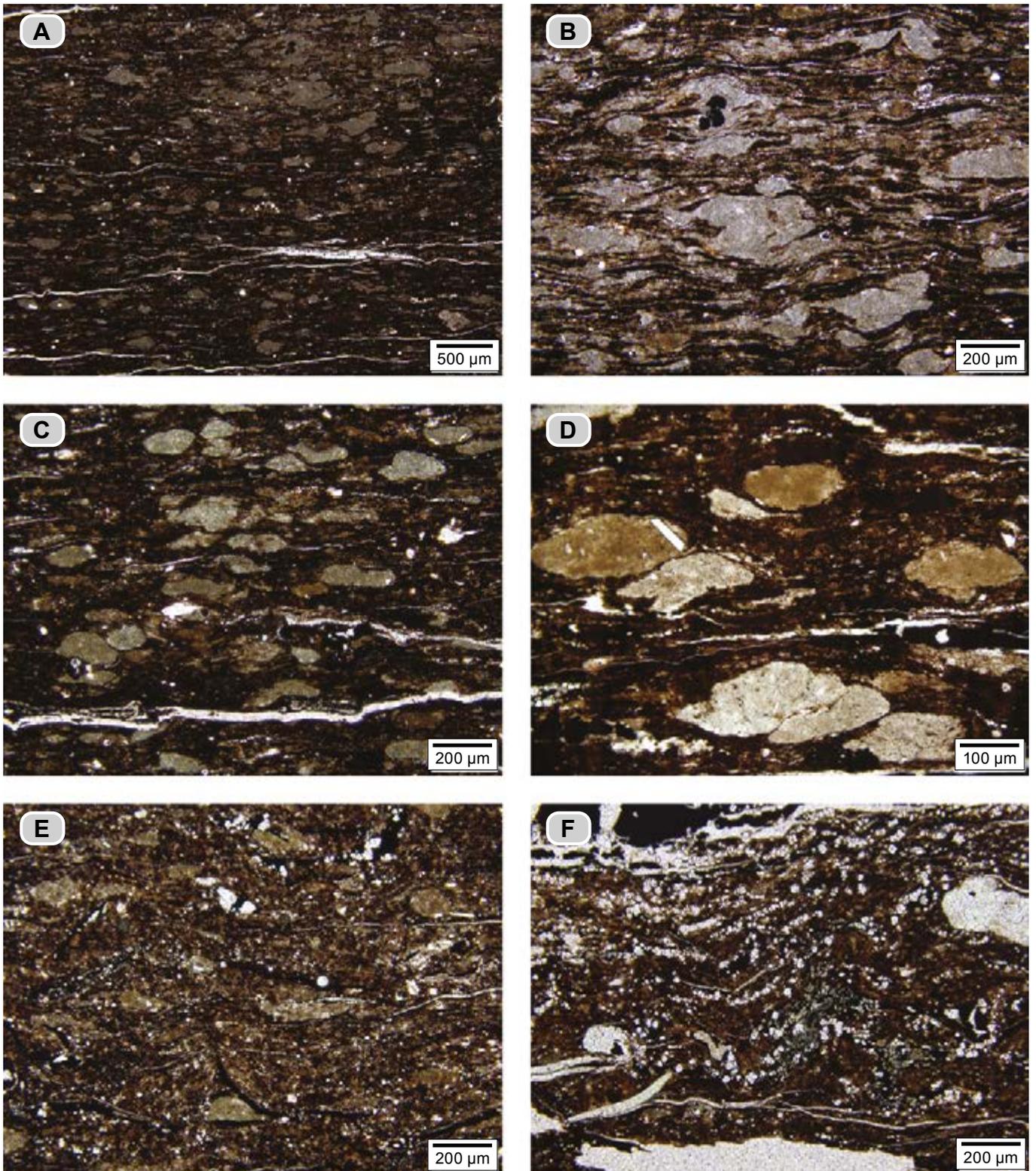


Figura 52. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica (dma 4975); en el microscopio se identifica como *bindstone* con materia orgánica laminado (microbialita). **A)** Lámina inferior: en la parte baja de la sección delgada abundan los peloides de micrita (color pardo amarillento) y tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (color pardo rojizo); en la parte superior alternan láminas delgadas discontinuas y cuerpos gruesos irregulares de micrita (color pardo claro). **B)** Detalle de la parte superior de la figura **A**; se observan láminas muy delgadas discontinuas y cuerpos gruesos irregulares de micrita de color pardo claro. **C y D)** Detalle de la parte inferior de la lámina **A**: entre los tapices microbiales con materia orgánica (color pardo oscuro) hay presencia de cuerpos peloidales de micrita, disgregados y removilizados (color pardo claro). **E)** Lámina intermedia: la proporción de materia orgánica y de hidrocarburos aumenta: hay presencia de fragmentos laminares y de cristales de calcita (provenientes de la disgregación de algas o de rocas recrystalizadas); los hidrocarburos (color negro) intruyen y rellenan espacios. **F)** Lámina superior: con presencia de algas filoides y abundancia de materia orgánica e hidrocarburos; nótese los cristales cúbicos de halita reemplazados por calcita.



Figura 53. Calizas *mudstone* (en tonos claros) que resaltan en el perfil topográfico y que alternan con *mudstone* calcáreos con materia orgánica (grises oscuros); forman entradas en el perfil topográfico (metro 113-115, $\Delta 73$ - $\Delta 74$).

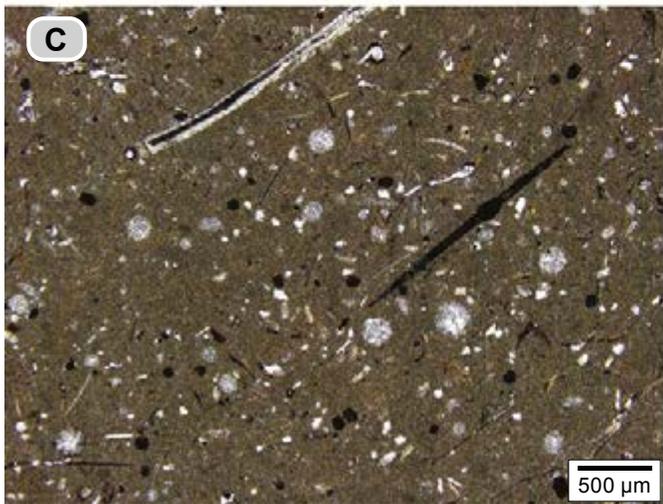
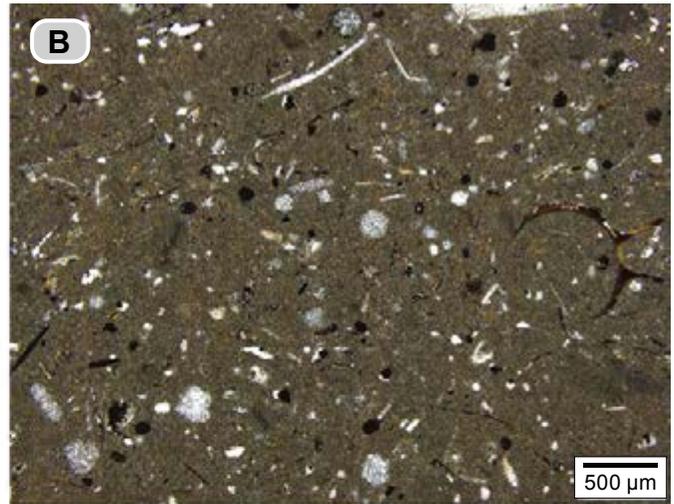
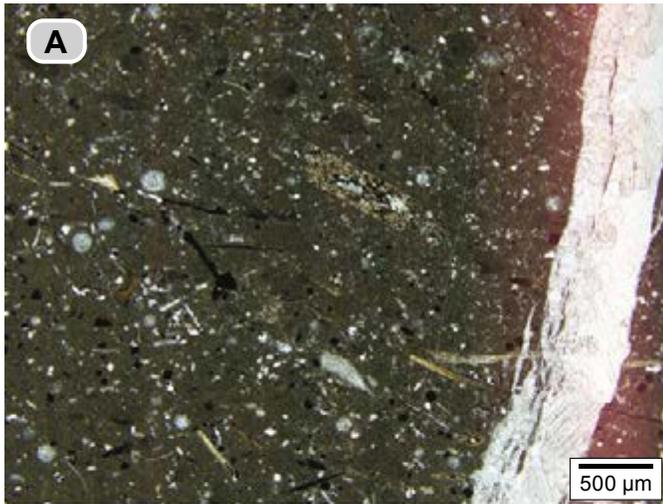


Figura 54. A, B y C) Calizas *mudstone* con bioclastos (**dma 4967**). Se observan restos de huesos de peces fosfatizados. Nótese la presencia de cuerpos circulares de 100 μm a 200 μm , conformados por cristales de calcita (elementos reproductores de algas? o esferas de calcita generadas por acción de bacterias?) y agregados de pirita. **D)** Con mayor aumento se observa la homogeneización de la calcita espar, restos de peces fosfatizados, pirita y cuerpos circulares reemplazados por cristales de calcita espar.

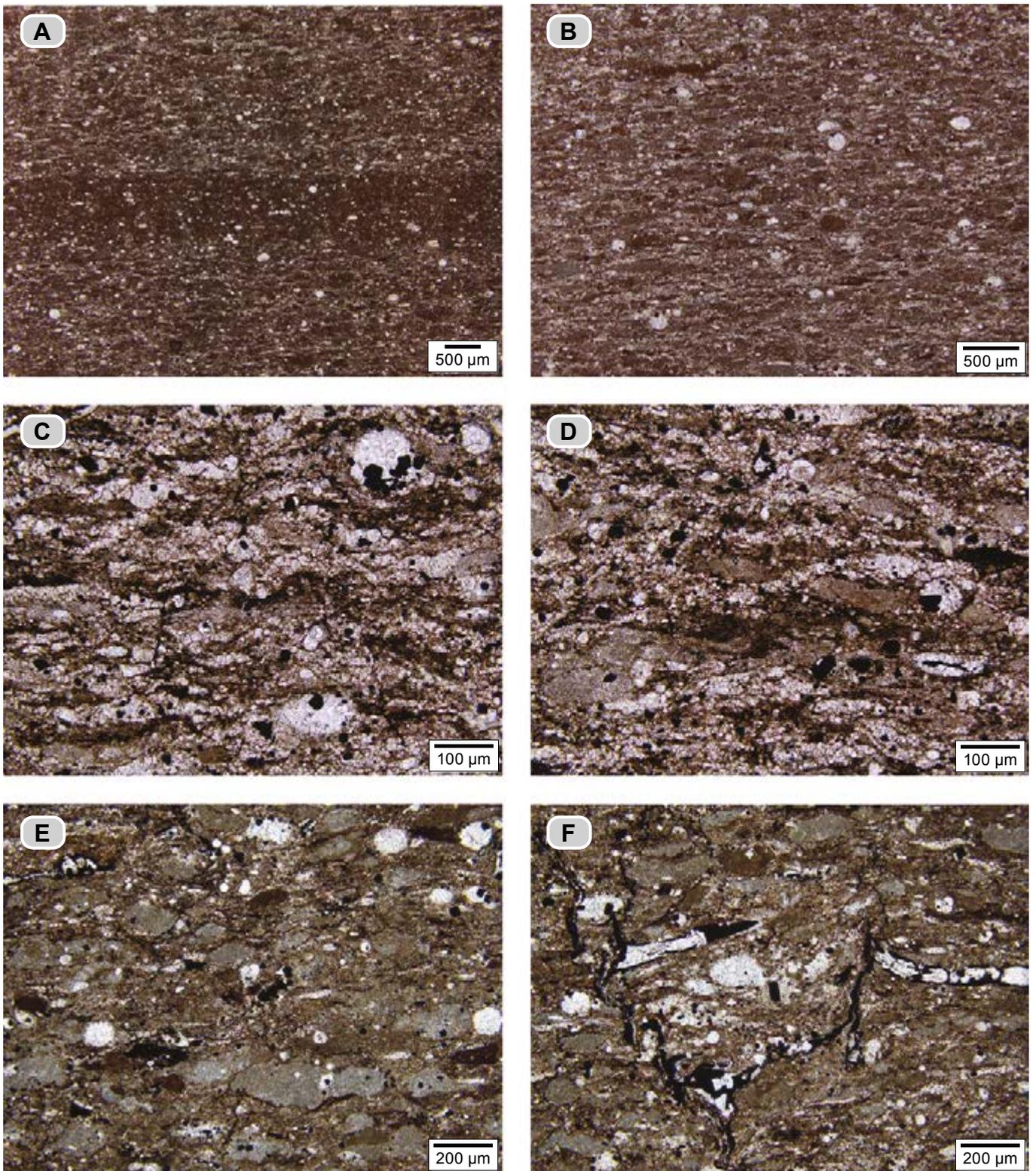


Figura 55. A) Caliza *mudstone* (dma 4976); en el microscopio se identifica como *bindstone* recristalizado. La recristalización es de tipo I. Se conserva la laminación, que está resaltada por los tonos pardos oscuros y tonos pardos más claros. **B)** Las láminas claras están constituidas por cuerpos laminares blancos, discontinuos, ondulados (microbialitas recristalizadas); peloides de micrita y tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (pardos oscuros); también se observan ostrácodos y cuerpos circulares de calcita. **C y D)** Ampliación de un sector de la misma placa con láminas claras; se observan: **a)** cuerpos laminares blancos ondulados, internamente constituidos por un agregado de cristales de calcita; **b)** tapices microbiales de tono pardo oscuro, y **c)** peloides de micrita. También se reconocen cuerpos circulares de calcita, con diámetros de 15 μm a 100 μm . Hay presencia de pirita e hidrocarburos. **E y F)** Ampliación de un sector de la misma placa de las láminas oscuras; se diferencian: peloides de micrita alternantes con tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (tono pardo); hidrocarburo que forma microdiques arborescentes, pirita y cuerpos circulares de calcita con diámetros entre 40 μm y 100 μm (elementos reproductores de algas? o esferas de calcita generadas por acción de bacterias?).

En las diferentes láminas hay presencia de foraminíferos planctónicos, conchillas de amonitas paralelas a S_0 , cuerpos circulares de 100 μm a 200 μm reemplazadas por cristales de calcita espar (elementos reproductores de algas?) quistes de dinoglagelados calcáreos y algas filoideas: son hojuelas onduladas tipo *corn flakes*. La pirita (2,5%) se presenta con hábito cúbico o framboidal; llama la atención la presencia de micro diques arborescentes de hidrocarburo.

Segmento estratigráfico III (116-193 m)

Este segmento se localiza desde el $\Delta 74$ hasta el $\Delta 55$ de la poligonal y se caracteriza por la ausencia de lentes de calcita fibrosa y por el incremento notable de la arcilla (grupo de la illita?). Se diferencian tres intervalos estratigráficos, que incluyen un tramo cubierto de 56 m (séptimo tramo cubierto).

Intervalo estratigráfico F (116-119 m). Aflora en el $\Delta 74$. Son *mudstone* arcillosos calcáreos de color gris oscuro (N4), laminados (**fig. 56**); alternan con calizas *mudstone* en capas gruesas lenticulares. Hay presencia de concreciones calcáreas redondeadas a discoidales con ϕ de 60 a 40 cm; las de mayor diámetro tienen un núcleo estrellado relleno de cristales individuales de calcita (geodas).

En el microscopio, la caliza *mudstone* se identifica como *bindstone* (microbialita) (**dma 4979**). Se observan tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (microbialita), con textura porosa (tamiz), con recristalización incipiente (**fig. 57**). La materia orgánica se presenta en hilos discontinuos paralelos a S_0 ; también hay presencia de conchillas de foraminíferos planctónicos (1,5%), hidrocarburo que rellena las conchillas y pirita (1%).

Intervalo estratigráfico G (119-175 m). Se localiza entre el $\Delta 74$ y el $\Delta 56$, y representa el séptimo tramo cubierto, de 56 m.

Intervalo estratigráfico H (175-193 m). Se ubica entre los $\Delta 56$ - $\Delta 55$. Son *mudstone* arcillosos con materia orgánica, laminados, de color gris oscuro y gris claro (N3, N4, N5), que conforman paquetes de hasta 3 m; alternan con esporádicas capas lenticulares delgadas de calizas *mudstone*.

Las rocas son ricas en bivalvos, gasterópodos e impresiones de amonitas sobre las superficies de acumulación (S_0); en ocasiones aparecen fragmentadas y en vista de perfil se destacan como láminas dentadas, discontinuas. Es común la presencia de cristales superficiales de yeso secundario y láminas de pirita.

Entre los metros 187-188 y 192-193 de la secuencia, y en un espesor de 90 cm y 1 m, respectivamente, se observan tramos con deformación circunscrita a estos paquetes. Las rocas están dislocadas, se aprecia un juego de bloques conjugados en forma de rombos angulosos, internamente fracturados, además de repliegues fallados a escala centimétrica.



Figura 56. Intervalo estratigráfico F. **A)** En la parte inferior se observan las rocas del Conjunto E3 en tonos grises y más duras, y en la parte superior, los primeros metros del intervalo estratigráfico F, constituidos por *mudstone* arcillosos calcáreos (metro 115 a 119). **B y C)** Metros inferiores del intervalo estratigráfico F; hay presencia de concreciones calcáreas de formas discoidales, ocasionalmente con geodas (metro 118, $\Delta 74$).

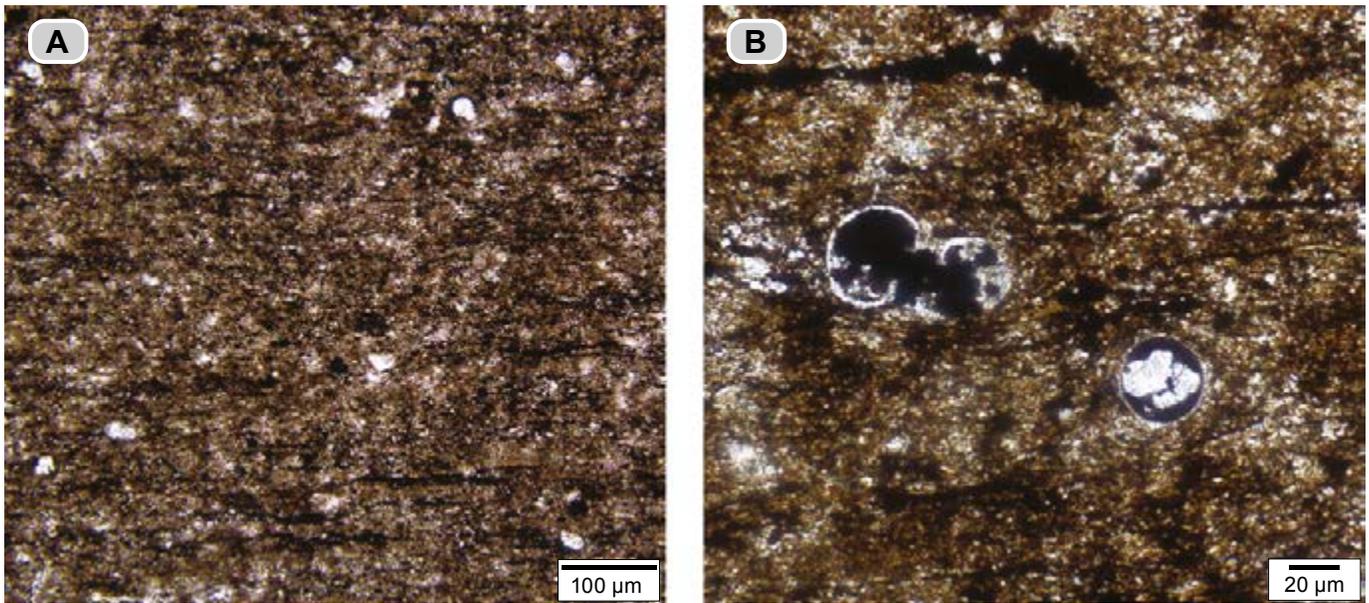


Figura 57. Caliza *mudstone* (dma 4979). En el microscopio se identifica como *bindstone*. **A)** Se observan tapices microbiales en tono pardo oscuro, biomineralizados por calcita microcristalina (microbialita); la materia orgánica se observa también como hilos y en agregados (motas). **B)** Con mayor detalle se reconoce la textura porosa, que corresponde a los tapices microbiales; nótese una conchilla de amonita rellena de hidrocarburos.

En el microscopio, los *mudstone* arcillosos con materia orgánica se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialita). Se observan intervalos con texturas laminadas e intervalos con texturas lenticulares (dma 4907 y 4915).

Los intervalos con textura lenticular (figs. 58 y 59) están compuestos por tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina, en donde se reconoce textura porosa de tamiz; adherida, hay arcilla tipo illita?, según Konhauser (1998), la arcilla constituye una superficie abiótica que forma lentes (fig. 58).

Los intervalos con texturas laminares alcanzan hasta 3 mm de espesor y están conformados por tapices microbiales con arcilla adherida de fino hábito micáceo con las siguientes configuraciones: **a)** láminas de 50 µm de grosor que aparecen levemente onduladas y discontinuas; y **b)** en lentes. Alternan con esporádicas láminas de micrita, peloides e intraclastos de agregados de algas *Dasycladaceas* (fig. 58). Según Konhauser (1998), la arcilla se suma a los tapices microbiales y forma una superficie abiótica.

La materia orgánica se observa en hilos y motas. Se observan fragmentos de amonitas paralelos a la estratificación (fig. 58) y algas filoideas (fig. 59), como también cristales de carbonato de calcio de forma rómbica.

Segmento estratigráfico IV (193-216 m)

Este segmento aflora entre el Δ55 y el Δ56 de la poligonal y termina en seis metros cubiertos (octavo tramo cubierto). En él, se diferencian dos conjuntos duros y dos blandos. El inferior duro (I1) está localizado entre los metros 193-196, y el superior duro (I3), entre los metros 201-207; están separados por un conjunto que genera valle (I2), localizado entre los me-

tros 196-201; sobre el conjunto I3, alcanza a aflorar la parte inferior del conjunto I4, parcialmente cubierto (207 a 216 m).

Los conjuntos que dan resalte (I1 e I3) están constituidos por calizas *mudstone*, se disponen en capas gruesas con formas plano paralelas y muestran pátina de color naranja amarillento (10YR 8/6 y 10YR 6/6). La principal característica de los conjuntos I1 e I3 está en que su laminación varía de delgada a mediana, plana paralela, definida por la composición, que a su vez se manifiesta en colores grises oscuros y grises claros (fig. 60).

El conjunto I2 está compuesto por *mudstone* arcillosos con materia orgánica. Hay presencia de concreciones calcáreas redondeadas y elipsoidales, piritosas, con dimensiones de hasta 35 cm en el diámetro máximo.

En el **conjunto I1**, las calizas *mudstone* están laminadas y se identifican en el microscopio como *bindstone* recristalizados (microbialitas recristalizadas), con diferentes estadios de recristalización, que permite reconocer en las calizas dos texturas:

A) Calizas *mudstone* con estadio de recristalización bajo. En ellas se conserva la laminación plana paralela (dma 4919), manifiesta en la alternancia de intervalos claros y oscuros (fig. 61). Los intervalos de tonos claros están constituidos casi exclusivamente por láminas discontinuas y lenticulares de tapices microbiales biomineralizados de calcita microcristalina con recristalización incipiente, los que a su vez están separados por laminillas en tonos oscuros de tapices microbiales con arcilla adherida. Los intervalos laminares, de tonos oscuros, tienen los mismos componentes que los intervalos claros, pero se diferencian por el incremento de materia orgánica y arcilla adherida.

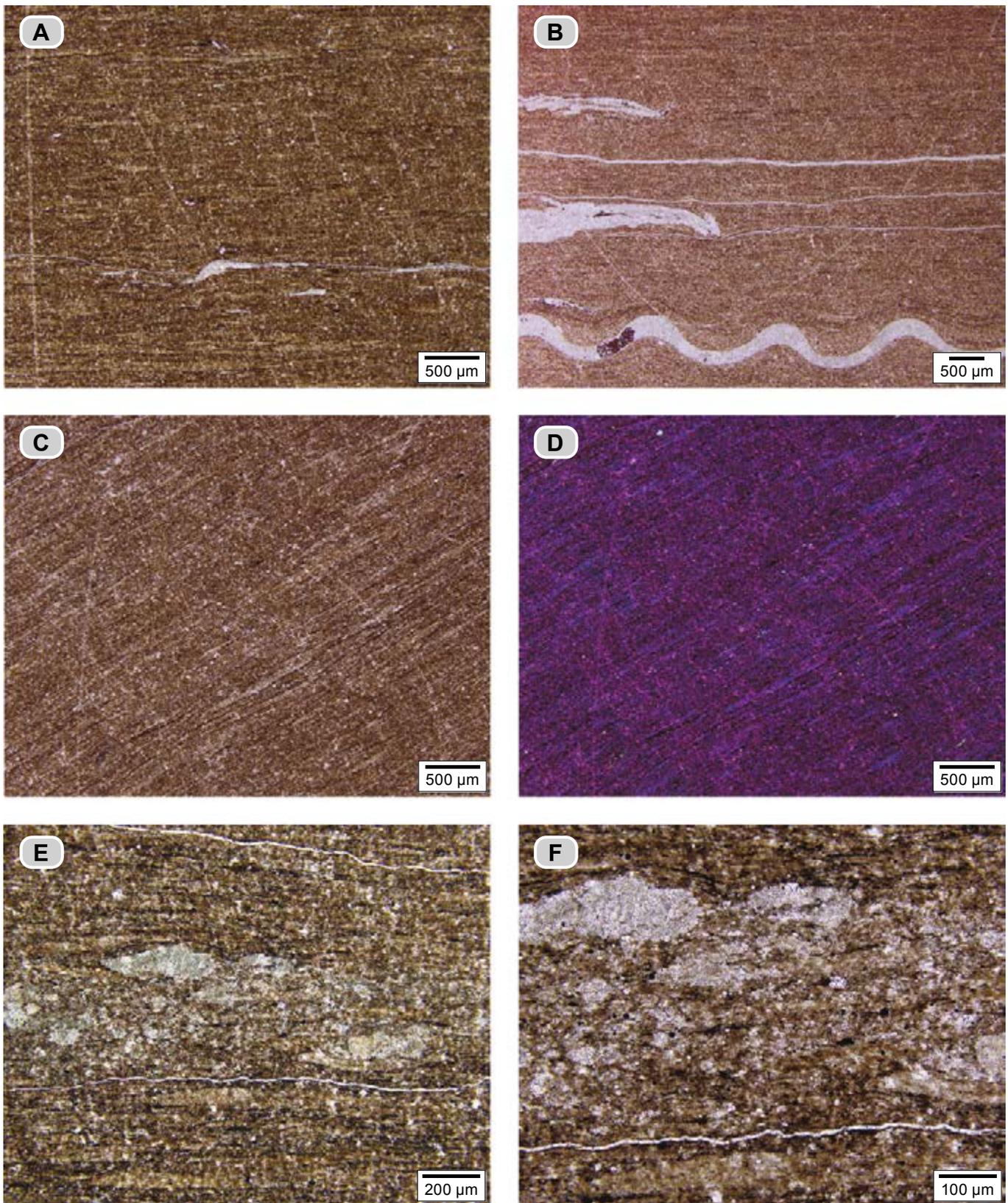


Figura 58. *Mudstone* arcilloso con materia orgánica (dma 4907); en el microscopio se identifica como *bindstone* con arcilla y materia orgánica. **A y B)** Textura lenticular y laminada; se trata de tapices microbiales con arcilla adherida (tonos más claros) y tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (tonos pardos). **A)** Se reconoce en la parte inferior un intervalo laminar, y el resto de la sección es un intervalo con textura lenticular; nótese las formas lenticulares de colores más claros, por la presencia de arcilla adherida. **B)** Nótese el perfil de una concha de amonita. **C y D)** Textura lenticular en los tapices microbiales; las arcillas destacan por su color azul cuando se introduce el compensador 1λ , se cruzan nicoles y se gira la platina NE-SW. **E y F)** Detalle de los tapices microbiales, laminillas de materia orgánica y peloides e intraclastos de restos de algas *Dasycladaceas*.

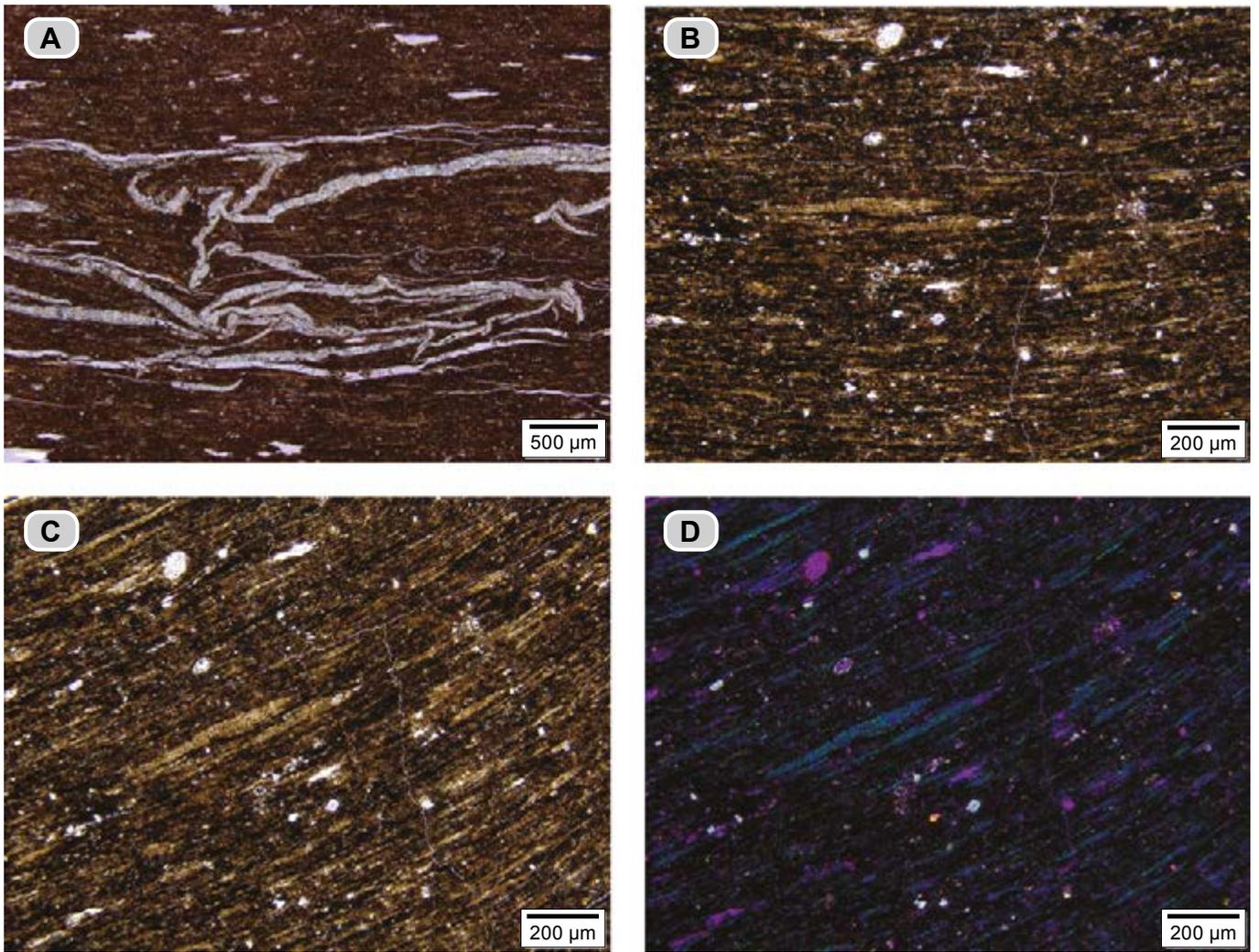


Figura 59. *Mudstone* arcillosos con materia orgánica (*dma 4915*); en el microscopio se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica. **A y B)** Lentes de tapices microbiales con arcilla adherida (tonos pardo claro) y tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina acompañados de materia orgánica (tonos pardos oscuros); en **A** microbialitas con textura lenticular; nótese la presencia de láminas arrugadas (tono blanco), correspondientes a algas filoideas o restos de bivalvos. **C)** Con mayor aumento se observan tapices microbiales. **D)** La misma fotografía anterior vista con compensador 1A, nicoles cruzados y platina rotada a NE-SW, en donde se ve que las arcillas dan tono azul y definen la textura lenticular.

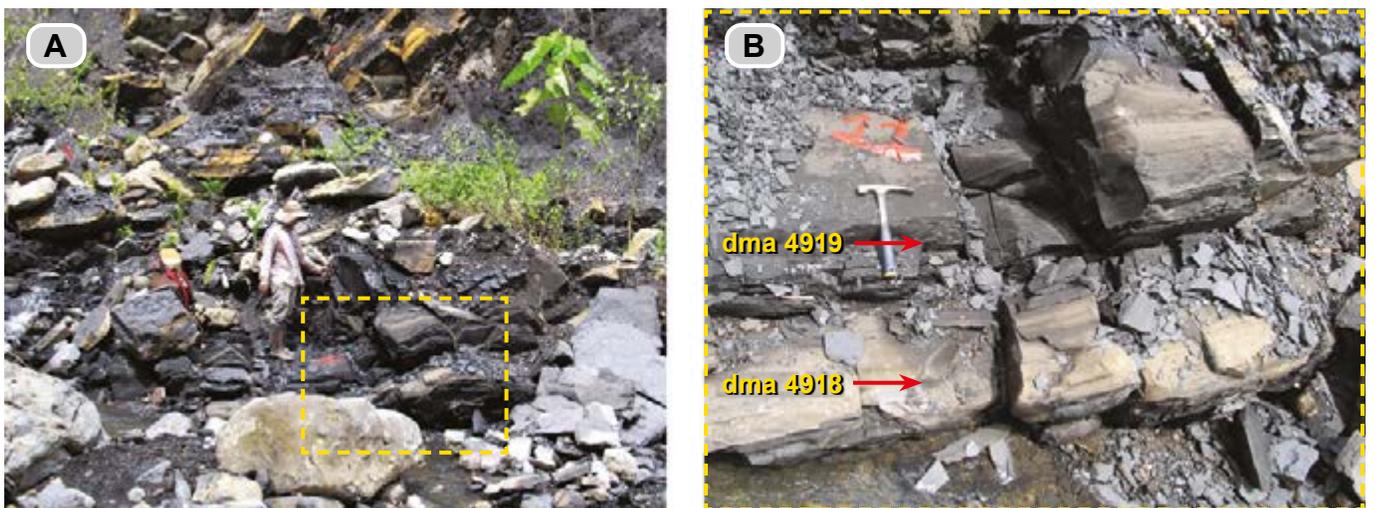


Figura 60. Segmento estratigráfico IV. **A)** Conjunto 11: son calizas *mudstone* laminadas en capas gruesas (metros 193-196, Δ54-Δ53); el recuadro amarillo, está ampliado en **B)**, donde se observa la laminación resaltada por una gama de colores grises, superficialmente con pátina naranja amarillenta (metro 193-196).

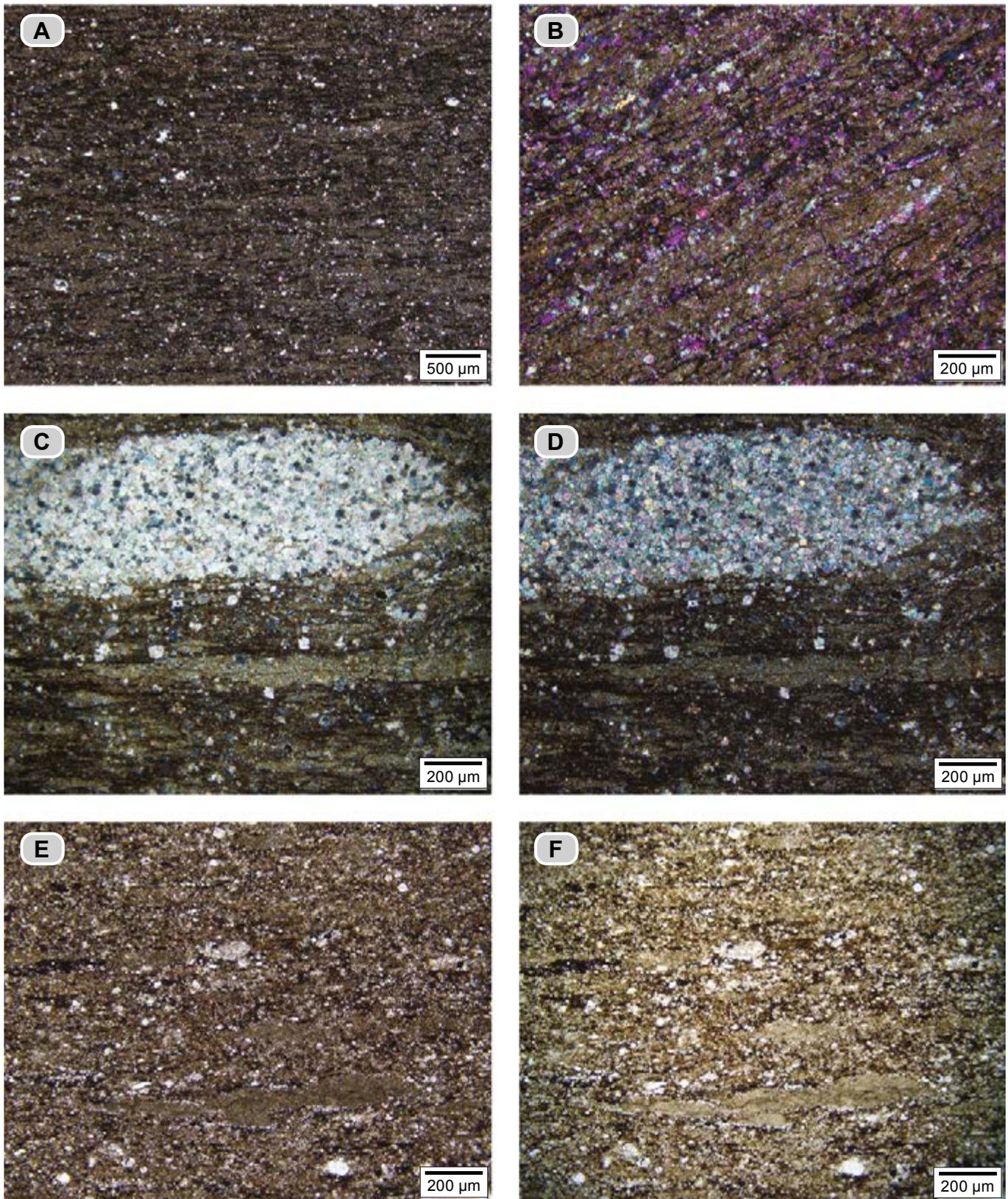


Figura 61. Calizas *mudstone* del segmento estratigráfico IV (**A**, **B**, **C** y **D**); en el microscopio son *bindstone* con recristalización (**dma 4819**). En **A**) alternan láminas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (tono claro) y tapices microbiales con materia orgánica y arcilla adherida (tono oscuro). **B**) Al insertar el compensador 1λ y girar la platina en dirección NE, las arcillas toman color azul, lo cual permite observar mejor la laminación. **C** y **D**) Se observa un intraclasto, consistente en un agregado de esferas de calcita producto de la actividad biológica de bacterias, con crecimiento de caras cristalinas alrededor de las esferas, que dibujan cristales rómbicos de carbonato de calcio. **E** y **F**) Caliza *mudstone* con recristalización (**dma 4818**): la laminación está difuminada; sin embargo, se observan remanentes (lentes) de calcita microcristalina de posibles tapices microbiales con recristalización incipiente.

En ambos intervalos laminares se identifican esferas de calcita generadas por acción de bacterias?, con diámetros entre 5-15 μm (Bundeleva et al. 2012, fig. 4) y quisites de dinoflagelados calcáreos; también se observa el crecimiento de caras cristalinas alrededor de las esferas, que dibujan cristales rómbicos de carbonato de calcio, en ocasiones maclados, con tamaños de hasta 30 μm . Lo anterior está ilustrado en el intraclasto de las **figs. 61C y 61D**.

B) Las calizas *mudstone* con estadio de recristalización más alto (**dma 4918**) presentan laminación difusa: se trata de tapices microbiales con calcita microcristalina con recristalización (**fig. 61**); lentes y láminas discontinuas de micrita con recristalización incipiente y restos de laminillas de materia orgánica y los mismos fósiles.

El **conjunto I2**, que genera valle y separa los conjuntos I1 e I3, está representado por *mudstone* arcillosos levemente calcáreos, grises oscuros (N3), en intervalos de hasta 1.9 m. Estos *mudstone* presentan laminación plano paralela y parten en esquirlas pequeñas; al ser martilladas despiden fuerte olor a azufre. Se observan impresiones de amonitas, bivalvos y gasterópodos paralelos a las superficies S_0 , destacan agrupaciones de cristales superficiales aciculares de yeso secundario a manera de rosetas.

En este conjunto destacan dos capas calizas *mudstone* en capas delgadas, una de las cuales es discontinua y presenta su base dentellada (**fig. 62**), mientras que la otra aparece continua y es plana paralela.

En el microscopio, los *mudstone* arcillosos levemente calcáreos con materia orgánica (**dma 4927**) se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialitas) (**fig. 63**). Se presentan intervalos laminares alternados y constituidos por: **a)** tapices microbiales (tonos pardos) en láminas discontinuas, levemente onduladas, con textura porosa en tamiz; tienen arcilla adherida en finas partículas, en general orientadas ópticamente, con extinción en conjunto (Pettijohn 1975); **b)** de tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina, **c)** tapices microbiales con arcilla adherida, que conforman lentes.

La materia orgánica se observa en laminillas y motas, mientras que hidrocarburos rellenan espacios interlaminares y reemplazan bioclastos. Se observan fósiles: **a)** foraminíferos planctónicos con tamaños de hasta 60 μm ; **b)** quisites de dinoflagelados calcáreos: son cuerpos circulares con dos anillos, el primero oscuro, y el segundo conformado por cristales subrectangulares de calcita (Reháková 2000). Como minerales traza hay fragmentos de cuarzo, glauconita, mica detrítica y piritita framboidal.

En el **Conjunto I3**, los primeros metros son calizas *mudstone* finamente laminadas que gradan a *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica laminados (**fig. 64**); al ascender en la sucesión, la laminación desaparece por la bioturbación (**fig. 64**).

En el microscopio, las calizas *mudstone* laminadas se identifican como *bindstone* recristalizados, laminados (**dma 4931-4934**); se reconocen intervalos claros e intervalos oscuros (colores que en muestra de mano corresponden a tonos grises claros y oscuros) (**fig. 65**). En los intervalos claros, las láminas tienen mayor recristalización: se observa un agregado homogéneo de cristales de calcita con tamaños entre 5-6 μm , y en menor proporción tamaños de 15 μm ; por sectores se alcanzan a reconocer vestigios de las texturas originales, que son laminillas de tapices microbiales. En los intervalos oscuros se reconocen tapices microbiales con materia orgánica y arcilla (illita?); en ellos se presenta menor recristalización y más heterogeneidad, tanto en los tamaños de la micrita como en los cristales de calcita dispersos, se observa micrita con recristalización incipiente y fragmentos de cristales de calcita anhedrales (15 μm), que han sido interpretados como producto de la disgregación de tapices microbiales recristalizados (**fig. 65**).

Entre los fósiles de las rocas destacan cuerpos circulares con las siguientes características: **a)** rellenos por un cristal único de calcita, con dos halos: el interno oscuro e isotrópico, mientras que el otro está formado por cristales de calcita espar subrectangulares (quisites de dinoflagelados calcáreos), con tamaño de 20 μm ; **b)** rellenos por varios cristales de calcita espar; el tamaño del cuerpo circular es de alrededor de 200 μm ; **c)** objetos circulares en cuyo interior se presenta un cristal único de calcita, y lo rodea un anillo segmentado de cristales de calcita (quisites de dinoflagelados calcáreos); y **d)** restos de ostrácodos y menos frecuente conchillas de foraminíferos.

Hay presencia de piritita framboidal, laminillas de materia orgánica, hidrocarburos a modo caminillos y trazas de cuarzo.

Los *mudstone* calcáreos con arcilla (**dma 4932**); en el microscopio se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (**fig. 66**); se observan alternancias de láminas de tapices microbiales biomineralizados con calcita microcristalina y lentes y láminas de tapices microbiales acompañadas por arcilla.

Se presentan cristales maclados de carbonato de calcio, rómbicos, de textura limo (5-7%); en ocasiones crecen a partir de un cuerpo esférico (quisites de dinoflagelado calcáreos).

También se observan foraminíferos con tamaños de hasta 60 μm , y como trazas: fragmentos de cuarzo y moscovita. La materia orgánica se observa en laminillas.

En los metros superiores de este conjunto las calizas *mudstone* no presentan laminación (**dma 4835-4836**), por bioturbación; son de color gris (N4) y superficialmente toman coloración amarilla (10YR 8/6 y 10YR 6/6). En el metro 205, el contacto inferior dibuja una cicatriz de erosión (**fig. 64**).

En el microscopio, las calizas bioturbadas pueden diferenciarse en dos tipos:

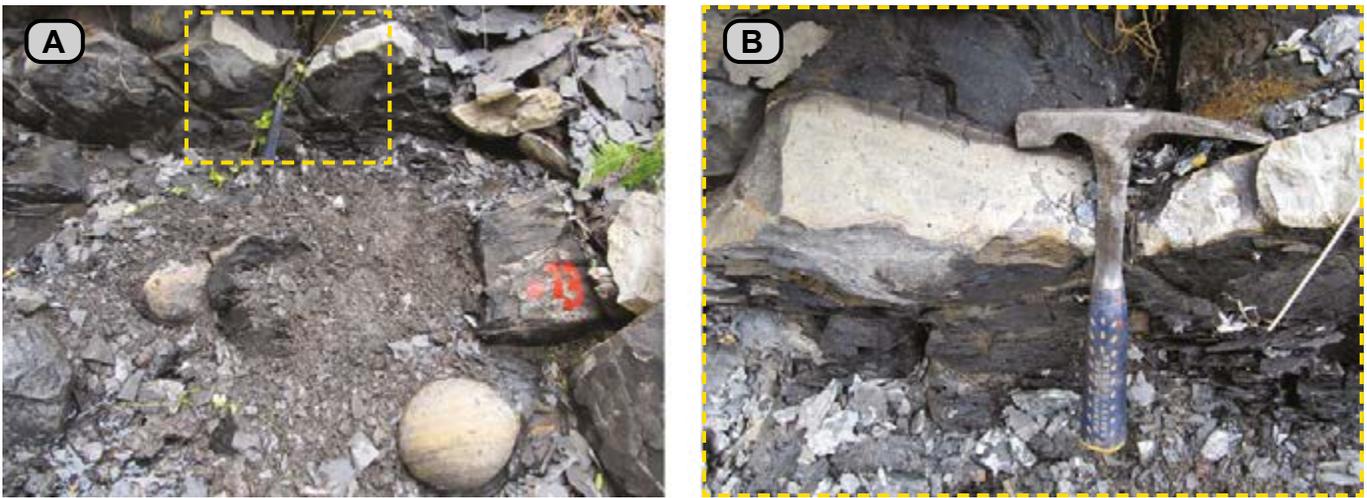


Figura 62. A) Conjunto I2. *Mudstone* arcilloso levemente calcáreo con materia orgánica que alterna con calizas *mudstone*; presencia de concreciones calcáreas esferoidales (metro 197). B) Ampliación del recuadro de la A; nótese la forma de la caliza *mudstone* de color claro, con su base irregular (metro 199).

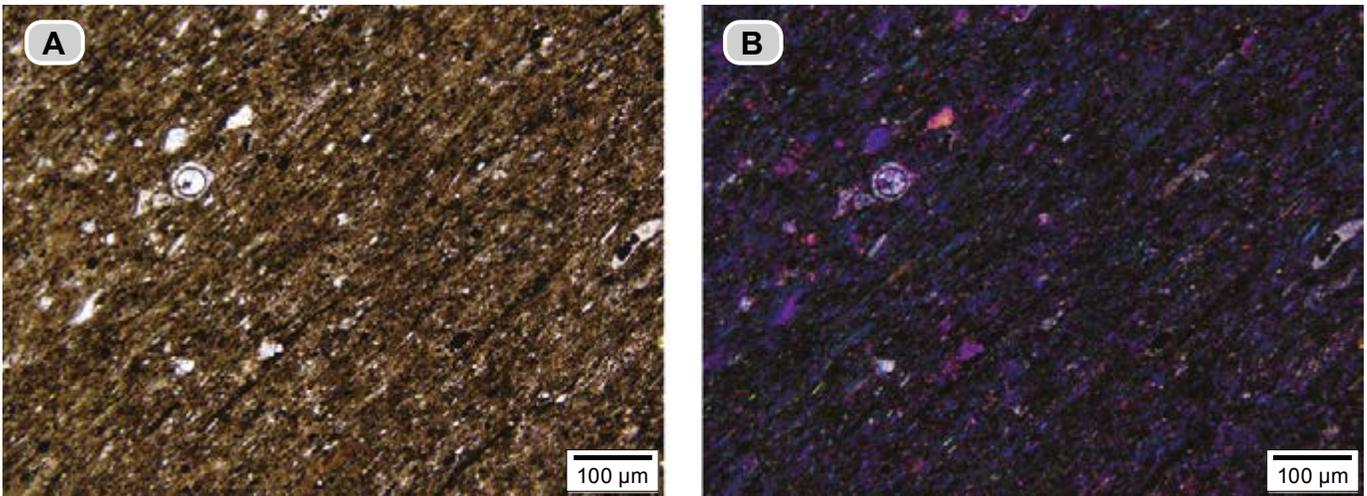


Figura 63. *Mudstone* arcilloso calcáreo con materia orgánica (dma 4927); en el microscopio es un *bindstone* con arcillas y materia orgánica. A) Láminas y lentes de tapices microbiales de color pardo con arcilla. Nótese la presencia de hidrocarburos de color negro que rellenan los espacios interlaminares; la materia orgánica se observa como hilillos. Hay presencia de quistes de dinoflagelados calcáreos. B) La presencia de arcilla resalta en color azul, al insertar el compensador 1λ con nicoles cruzados. Nótese el cuerpo circular (40 μm) con dos anillos, uno oscuro que circunda cristales de calcita espar, y que a su vez está rodeado por un anillo de pequeños cristales de calcita.

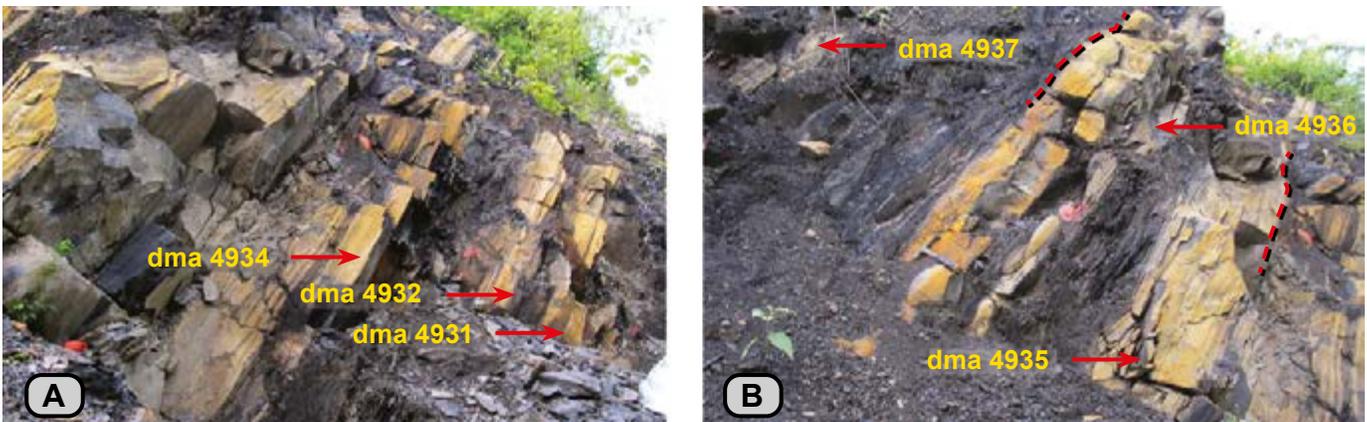


Figura 64. Conjunto I3. A) Las calizas *mudstone* (dma 4931 y dma 4934) de la parte inferior tienen laminación muy fina, plana-paralela, mientras que en las calizas de la parte superior no existe laminación: su textura es homogénea por bioturbación (metro 198-203). B) Se observan las calizas *mudstone* bioturbadas del Conjunto I3 (dma 4935 y dma 4936) (entre líneas rojas discontinuas) y los metros inferiores del Conjunto I4, en donde alternan *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica y calizas *mudstone* (dma 4937), con laminación plana-paralela (metro 201-209, Δ55-Δ54).

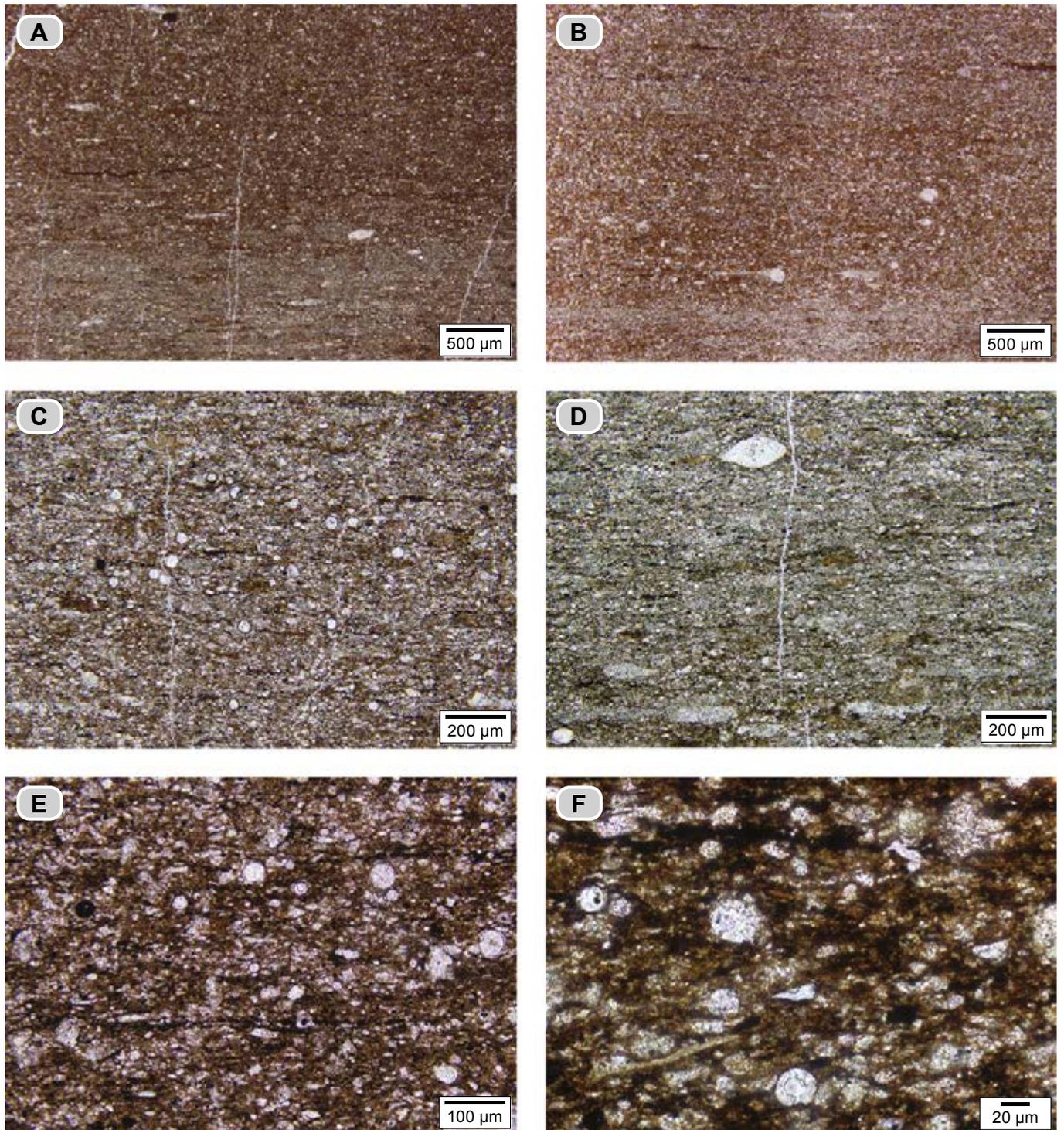


Figura 65. Caliza *mudstone* laminada (**dma 4931**); en el microscopio se identifica como un *bindstone* recristalizado. **A y B)** Se observan intervalos claros y oscuros. En los claros se reconocen láminas conformadas por agregados de cristales de calcita, con tamaños entre 6 y 10 µm; en los intervalos oscuros, no recristalizados, destacan las microbialitas de tonos pardos y contienen fragmentos de cristales de calcita disgregados. **C)** Lámina clara vista con mayor aumento; nótese las láminas onduladas de los tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina, cristales de calcita espar, fragmentos laminares disgregados, y cuerpos de calcita circulares (quistes de dinoflagelados calcáreos). **D)** Lámina clara recristalizada; nótese las ondulaciones de las láminas constituidas por agregados de cristales de calcita y pinceladas oscuras de restos de tapices microbiales; la concha de un ostrácodo aparece recubierta por las láminas de tapices microbiales recristalizadas. **E y F)** Caliza *mudstone* laminada (**dma 4934**); en el microscopio se identifica como un *bindstone* recristalizado. Se describe un intervalo oscuro de esta sección delgada: **E)** se observan cristales de calcita dispersos, con tamaños entre 5 µm y 15 µm; en tono pardo destacan los tapices microbiales y las laminillas de materia orgánica son negras. Nótese los diferentes tipos de los cuerpos circulares que corresponden a quistes de dinoflagelados calcáreos: **a)** con un centro de un único cristal y bordeado un anillo oscuro; **b)** similar al anterior, pero con un anillo externo compuesto por cristales de calcita subrectangulares y **c)** con un centro único y rodeado por un anillo segmentado de cristales de calcita. **F)** Con aumento mayor se alcanza a diferenciar la textura en tamiz de los tapices microbiales; se reconocen restos de quistes de dinoflagelados calcáreos, que se identifican por su forma circular, con centro de único cristal y un anillo segmentado de cristales de calcita.

A) Caliza moteada (**dma 4935**), con relictos de laminación; se identifica en el microscopio como *bindstone* recristalizado (microbialitas) y presenta moteado indistinto (**fig. 67**). Se observan remanentes de la laminación en tonos claros y tonos oscuros: las láminas claras están constituidas por cristales de calcita espar y en las láminas de tonos oscuros se observan tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina; acompañados por hilillos de materia orgánica y por fragmentos de cristales de calcita que alcanzan tamaños de 10-20 μm : producto de la disgregación de láminas recristalizadas preexistentes. Los fósiles observados son: **a)** ostrácodos, **b)** conchillas de foraminíferos planctónicos, y **c)** cuerpos circulares de calcita de dos tipos: **1)** tamaño de 20-30 μm , con un centro de único cristal con un anillo segmentado de cristales de calcita, reconocidos como quistes de dinoflagelados calcáreos, y **2)** con tamaño de 60 μm hasta 150 μm , constituidos por cristales de espar.

B) Calizas *mudstone* homogéneas (**dma 4936**). Presentan los mismos fósiles dispuestos de diversas maneras (removidos) y envueltos por tapetes microbiales biomineralizados y con materia orgánica. Son notorios los fragmentos disgregados de cristales de calcita (**fig. 67**). Se observa piritita framboidal, que en ocasiones reemplaza fósiles. También hay cristales de calcita de forma rómbica, además de fragmentos de cuarzo y micas como trazas.

Conjunto I4. Solo afloran los metros basales; está compuesto por *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica en intervalos de hasta 1.5 m de espesor. Alternan con calizas *mudstone* laminadas que ocurren en capas medianas.

En el microscopio, la caliza *mudstone* (**dma 4837**), corresponde a *bindstone* recristalizado. Se observa alternancia de intervalos en tonos claros y oscuros (**fig. 68**). Los de tonos claros

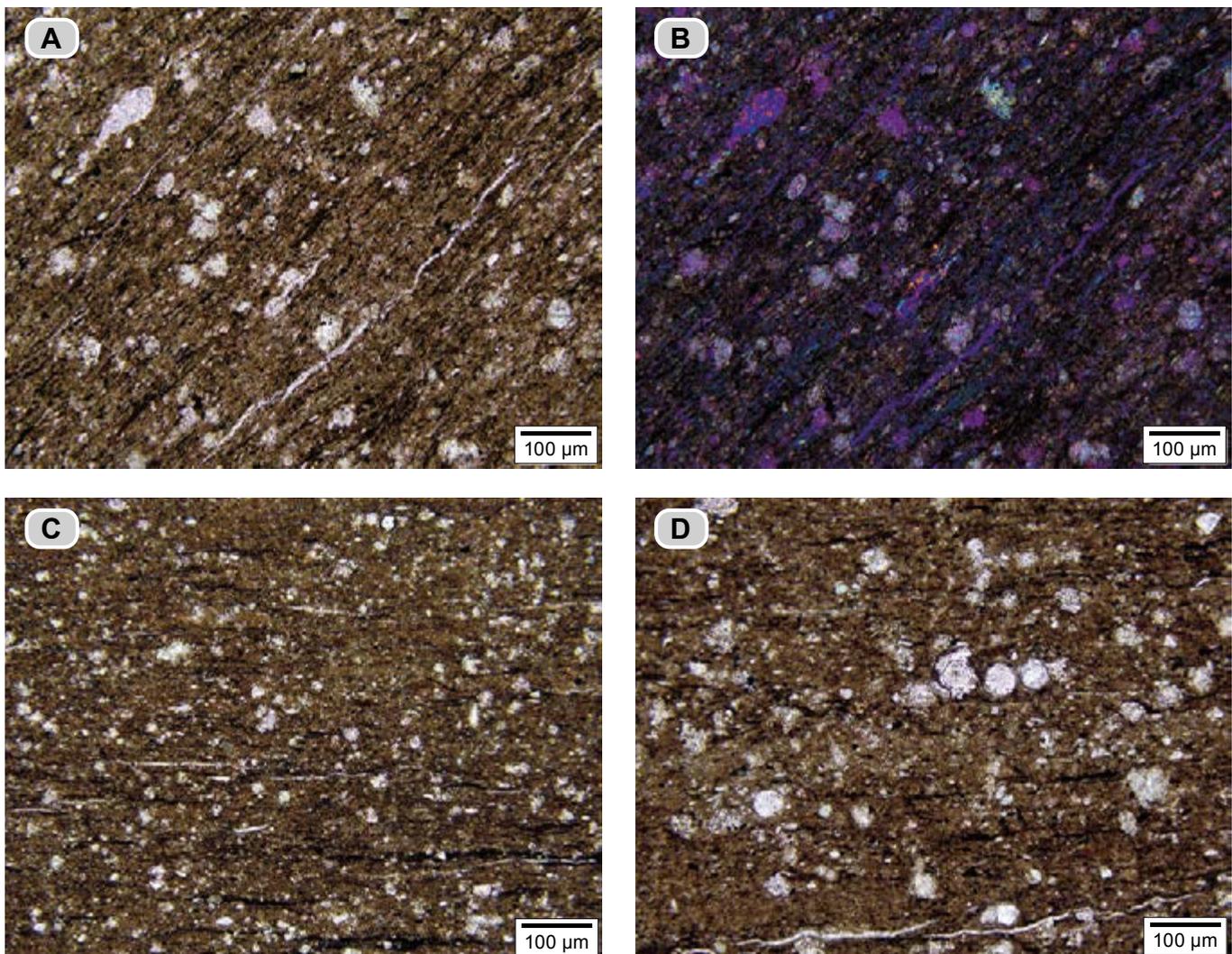


Figura 66. *Mudstone* calcáreo arcilloso con materia orgánica (**dma 4932**); en el microscopio se identifica como *bindstone* con arcillas y materia orgánica. **A)** Láminas de tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina, en donde se reconoce la textura de tamiz; hay presencia de cristales rómbicos maclados de carbonato de calcio y materia orgánica en laminillas y en motas. **B)** La misma fotografía para destacar la presencia de arcillas con tono azul (compensador 1 λ y nicoles cruzados). **C)** Fotografía que ilustra la presencia de las laminillas discontinuas de materia orgánica y la presencia de cristales rómbicos de carbonato de calcio. **D)** A mayor aumento se observa cómo algunos cristales de calcita rómbicos crecen a partir de un centro circular; nótese la presencia de materia orgánica en laminillas y motas. Se manifiestan también elementos reproductores de algas-bacterias.

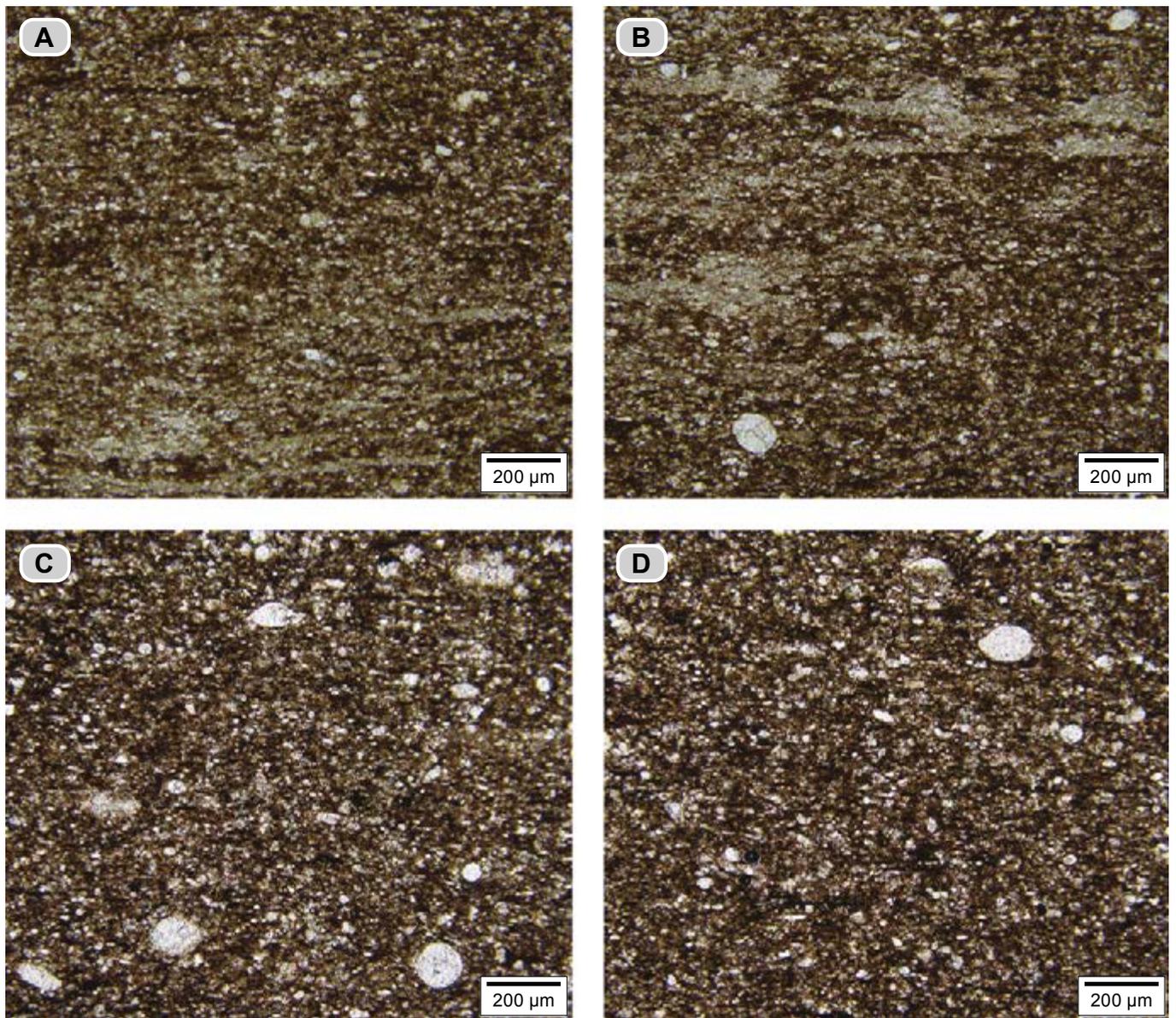


Figura 67. Calizas *mudstone* bioturbadas. **A y B)** Caliza *mudstone* con relictos de laminación (**dma 4935**). **C y D)** Caliza *mudstone* bioturbada (**dma 4936**). Presenta moteado indistinto a homogéneo; hay presencia de conchas de ostrácodos y cuerpos circulares de 100-200 µm, constituidos por cristales de calcita espar; también se observa la materia orgánica en motas.

están compuestos por cuerpos laminares ondulados que se apilan y se entrelazan, son discontinuos e internamente contienen agregados de cristales de calcita; esporádicamente se presentan vestigios de tapices microbiales (tonos pardos). Los intervalos de tonos oscuros por su parte están interlaminados por tapices microbiales en los que se reconoce la textura de tamiz, acompañados por fragmentos disgregados de calcita. Los tapices microbiales están acompañados por materia orgánica en motas y hay presencia de arcilla adherida a los tapices.

En todas las láminas aparecen cuerpos de calcita circulares (**fig. 68**), diferenciados así: **a)** con diámetro de alrededor de 40 µm y centro de cristal único de calcita, rodeado por un anillo segmentado de cristales de calcita (quistes de dinoflagelados calcáreos); **b)** con diámetros de alrededor de 60 µm, reemplazados por cristales de calcita espar, con un anillo

externo de cristales subrectangulares (quistes de dinoflagelados calcáreos), y **c)** con diámetros de hasta 60 µm, reemplazados por cristales de calcita, sin anillos. También se presentan conchillas de ostrácodos y de foraminíferos planctónicos.

Segmento estratigráfico V (216-288 m)

Este segmento se localiza entre los Δ53 y Δ46 de la poligonal y mide 72 m. Se caracteriza por el aumento en el contenido de material terrígeno (arcillas), que sobrepasa la presencia de carbonato de calcio y que se expresa en la alternancia de dos elementos litológicos: uno blando más potente de hasta 7 m, y uno duro, más delgado, de alrededor de 50 cm de espesor. Hay presencia abundante de amonitas, bivalvos y gasterópodos como impresiones o en volumen.

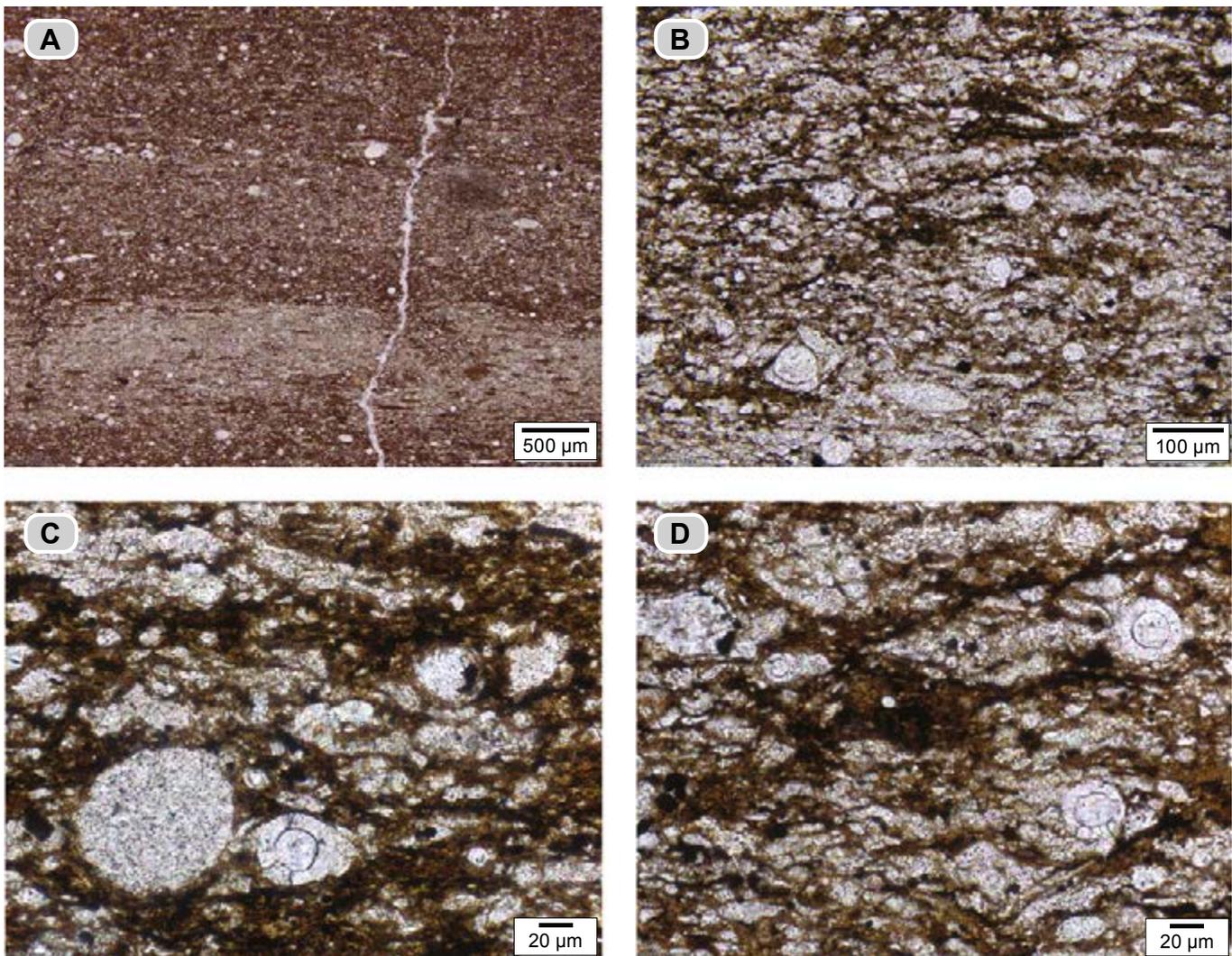


Figura 68. Caliza *mudstone* laminada (dma 4937); en el microscopio se identifica como *bindstone* recristalizado laminado. **A)** Alternan intervalos de tonos claros y oscuros. Los intervalos claros están compuestos por cuerpos laminares delgados con recristalización, que se apilan y se entrelazan; se observan vestigios de tapices microbiales en tono pardo oscuro. Los intervalos de tonos oscuros están constituidos por tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina y fragmentos de cristales de calcita disgregados. **B)** Intervalo oscuro observado con mayor aumento; hay presencia de cristales de calcita disgregados de 10 μm y fragmentos laminares constituidos por un mosaico de cristales de calcita, interpuestos con tapices microbiales de tonos pardos; nótese que el tono oscuro decrece en proporción con el mayor contenido de fragmentos de cristales y laminares de calcita. **B, C y D)** Con mayor detalle se observan cuerpos circulares calcáreos: **a)** cuerpos que presentan un cristal central de calcita rodeado por un anillo de cristales de calcita segmentados (quistes de dinoflagelados calcáreos) con tamaños de hasta 40 μm , y **b)** cuerpos circulares con un cristal central de calcita con tamaños de hasta 40 μm , con un anillo de cristales subretangulares de calcita (quistes de dinoflagelados calcáreos).

En este segmento estratigráfico los *mudstone* son arcillosos calcáreos con materia orgánica y se presentan en intervalos de hasta 7 m, que alternan con calizas *mudstone* en capas delgadas y medianas. El contenido de arcilla permite diferenciar tres intervalos estratigráficos, nombrados en orden ascendente *intervalos J, K y L*.

Intervalo estratigráfico J (216-255 m). Se localiza entre los $\Delta 53$ y $\Delta 51$ de la polygonal y se caracteriza por la gran cantidad de material terrígeno (arcillas). Los *mudstone* arcillosos calcáreos con materia orgánica son grises oscuros (N4-N3), generan entradas en el perfil topográfico en tramos de 2 a 7 m; tienen laminación plana paralela y rompen en esquirlas pequeñas (figs. 69 y 70). En ellos se observan pirita y cristales superficiales de yeso secundario superficiales que forma rosetas.

Este intervalo contiene concreciones calcáreas que suelen estar alineadas, de modo paralelo a la estratificación; tienen formas elipsoidales, esféricas, de trompo e irregulares, con un ϕ que varía desde 10 hasta 60 cm.

En el metro 242 se observa un tramo con deformación circunscrita a un espesor de 1.50 m, con las siguientes características: **a)** rombos angulosos internamente fracturados, y **b)** salbanda localizada (5 cm); la roca pierde su fábrica original, está finamente fracturada, y el material es blando, maleable.

En el metro 252 también se presenta un sector deformado de 90 cm; la roca tiene un arreglo de rombos y repliegues a pequeña escala (fig. 70).

En el microscopio, los *mudstone* arcillosos calcáreos con materia orgánica se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica; en ellos se reconocen intervalos laminares con las siguientes texturas:

A) *Bindstone* con textura lenticular y pulverulenta (**dma 4823, dma 4828, dma 4829, dma, 4848 y dma 4856**): 1) Intervalos con textura pulverulenta, en los que la arcilla es abundante y se reconoce como una pátina de finas partícu-

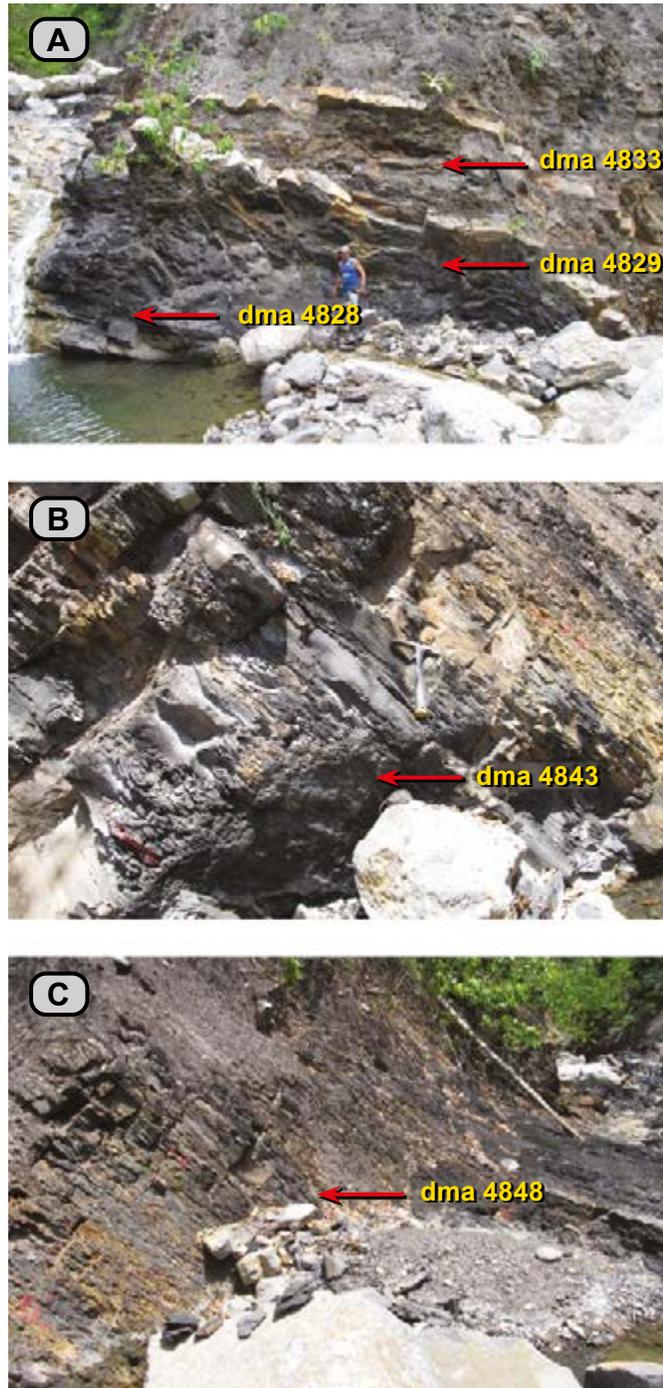


Figura 69. Calizas *mudstone* en capas gruesas y medianas (30-60 cm), con formas de montículos o planas paralelas, interpuestas entre *mudstone* arcillosos calcáreos con materia orgánica, en paquetes de 2 a 7 m. (A) Metro 216-225, Δ53. (B) Metro 227, Δ52-Δ51. (C) Metro 237-240. Δ51-Δ50.

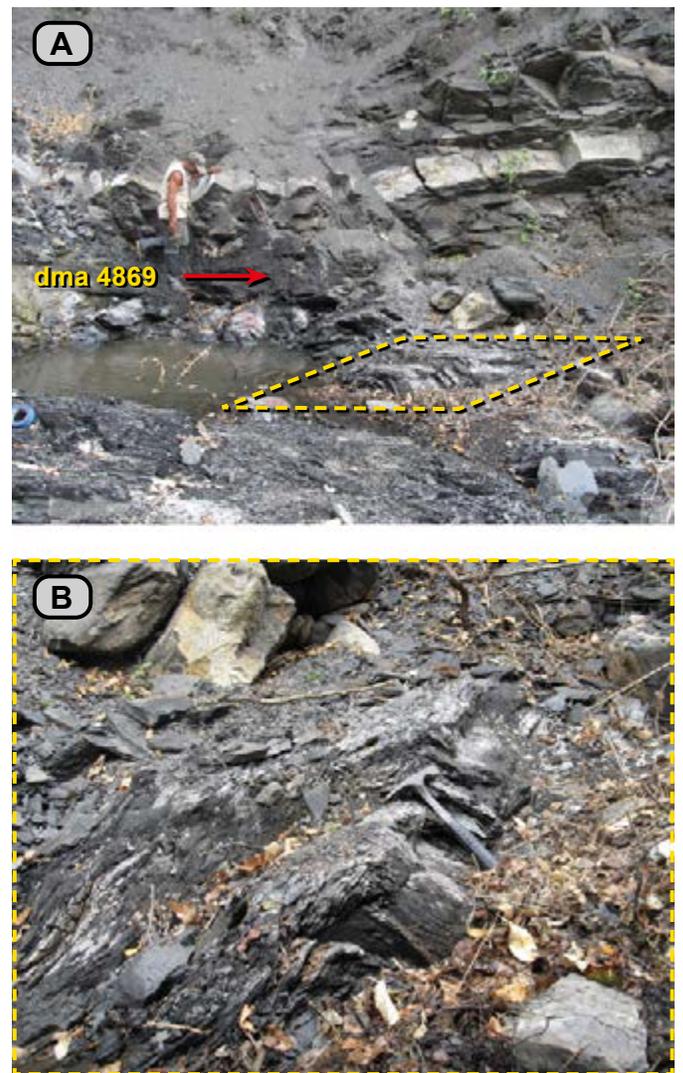


Figura 70. A) *Mudstone* arcillosos calcáreos laminados con materia orgánica en intervalos de hasta 6 m, con esporádicas capas medianas de calizas *mudstone*. En la parte inferior del afloramiento (recuadro de líneas amarillas) se nota un repliegue (metro 251-256). B) Ampliación del recuadro de la fig. (A) para mostrar los repliegues pequeños (metro 252).

las, en general orientadas ópticamente, que Pettijohn (1975) denomina *extinción en conjunto*, y 2) Intervalos con textura lenticular en donde la arcilla con extinción en conjunto dibuja lentes (fig. 71).

Los intervalos descritos están compuestos por tapices microbianos de tonos pardo claro y oscuro; en ellos se reconoce textura porosa, con espacios muy pequeños que se distribuyen como una malla de tamiz; la arcilla está adherida a los tapices y forma una superficie abiótica (Konhauser 1998).

Los bioclastos se presentan en proporciones variables, desde 1% hasta 4%: a) conchillas de foraminíferos planctónicos con tamaños de hasta 60 μm; b) intraclastos de algas *Dasycladaceas*; c) restos de conchas de amonitas, d) foraminíferos bentónicos, y e) cuerpos circulares con diámetro de 50 μm, reemplazados por un único cristal de calcita, rodeados por un anillo de cristales subrectangulares (quistes de dinoflagelados calcáreos).

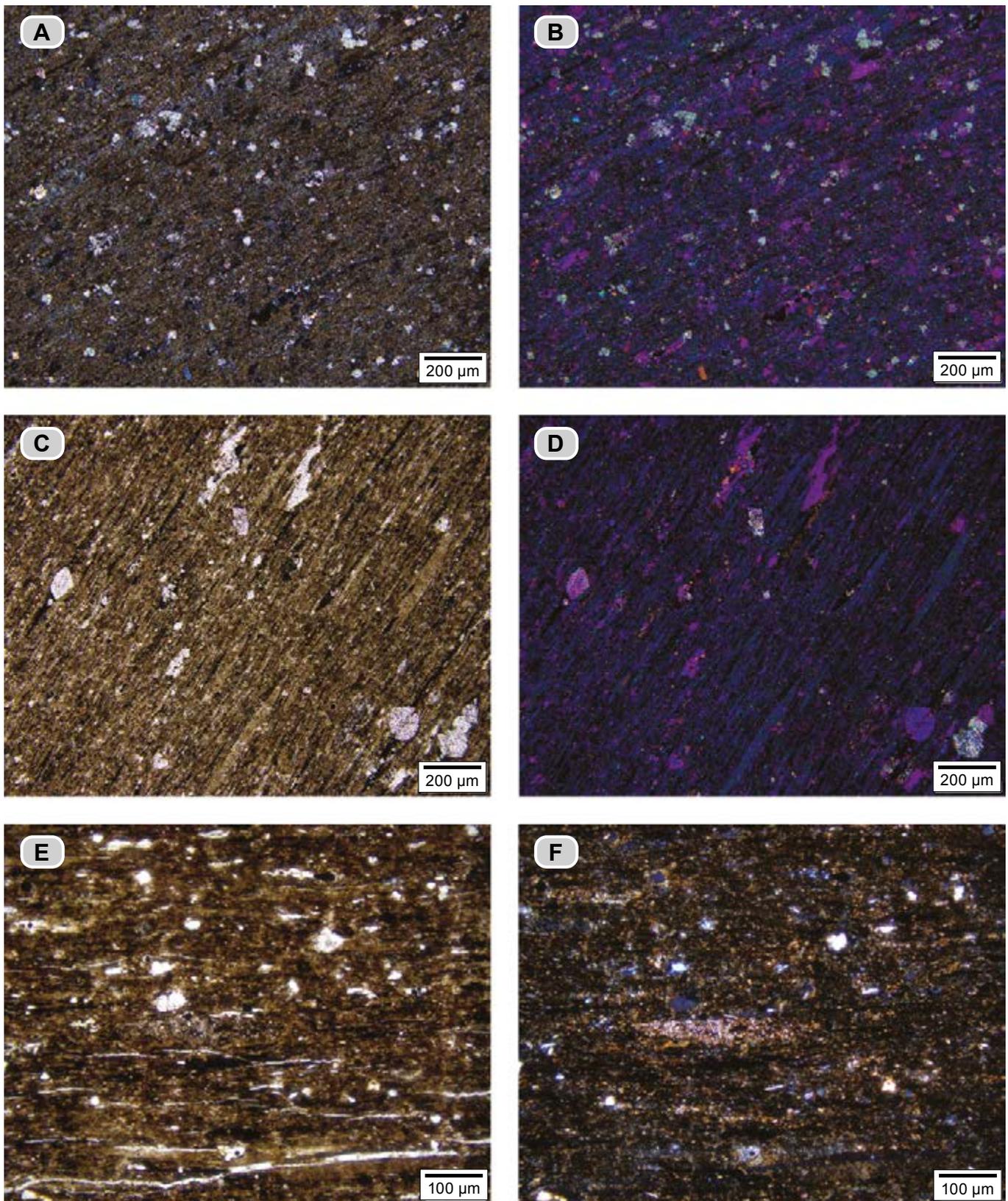


Figura 71. *Mudstone* arcilloso calcáreo con materia orgánica (dma 4823); en el microscopio se trata de un *bindstone* con arcillas y materia orgánica, en intervalos que presentan textura lenticular y pulverulenta. **A)** Se observan láminas de tapices microbiales con arcilla adherida de fino hábito micáceo. **B)** La misma sección delgada que en **A**, vista con nicols cruzados y lámina de yeso (compensador 1λ), para resaltar la presencia de arcillas en tono azul; la calcita, dependiendo del corte, aparece en tono violeta. **C y D)** Se presenta otro sector de la placa con texturas lenticulares; hay presencia de cristales rómbicos de calcita y materia orgánica en laminillas y motas. **E y F)** Con mayor detalle destaca la textura porosa de tamiz; materia orgánica en motas, fragmentos de cuarzo e intraclasto de algas *Dasycladaceas* en el centro de la fotografía.

Se observan además cristales de calcita con formas rómbicas, individuales o maclados; en ocasiones muestran desarrollo de cristales de calcita a partir de un centro (**fig. 72**).

En las secciones delgadas **dma 4848** y **dma 4829** hay presencia de dos generaciones de yeso (3%-7%); la primera corresponde a cristales con crecimiento *popcorn*, de color pardo amarillento, y la segunda (**fig. 72**) a cristales de hábito acicular-radial, desarrollado sobre los yesos de la primera generación.

Particularmente en la sección delgada **dma 4856** se observan, además, varios fragmentos fósiles sin diferenciar rellenos de hidrocarburo.

B) *Bindstone* con arcillas, materia orgánica y fragmentos terrígenos (**dma 4822**) con textura pulverulenta, se observan los tapices microbiales como láminas continuas a discontinuas y se reconocen por su textura porosa; son espacios muy pequeños que se distribuyen como una red y conforman una malla de tamiz. La arcilla se adhiere a los tapices y se interpreta como material atrapado que forma una superficie abiótica (Konhauser 1998); alterna con láminas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (microbialitas). También se observan intraclastos y peloides compuestos por algas *Dasycladaceas* (**fig. 73**).

Hay presencia de fragmentos de diferente naturaleza (3%-7%): **a)** terrígenos (4%) de cuarzo, micas detríticas y, en menor proporción, caolinita; **b)** conchillas de foraminíferos (2%), con textura desde 40 μm hasta 60 μm , rellenos de hidrocarburo, y, menos frecuente, foraminíferos planctónicos con textura de 100 μm y con sus cámaras rellenas de cristales de calcita; **c)** cuerpos circulares y achatados con tamaños de 30-40 μm , rellenos de hidrocarburos (1%), con un anillo de cristales de calcita subrectangulares, y **d)** cristales rómbicos de carbonato de calcio únicos o formando maclas.

La materia orgánica se observa como motas y laminillas. También se reconoce la presencia de hidrocarburo relleno de espacios intrapartículas e intergranulares.

C) *Bindstone* con arcilla y materia orgánica, de textura laminada y lenticular (**dma 4833, dma 4841, dma 4843, dma 4862, dma 4867 y dma 4869**), constituidos por: **1)** Intervalos laminares separados por laminillas de materia orgánica, conformados por juegos de láminas ondulosas, paralelas, predominantemente continuas, de tapices microbiales con la arcilla adherida. **2)** Intervalos laminares constituidos por juegos de láminas, ondulosas de: **a)** tapices microbiales con arcilla adherida, y **b)** láminas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (**fig. 74**).

La arcilla que se adhiere a las láminas con textura porosa de tamiz (tapices microbiales) tiene un fino hábito micáceo y extingue en conjunto; según Konhauser (1998), estos agregados arcillosos forman una superficie abiótica.

Hay presencia de intraclastos y de cuerpos peloidales de algas *Dasycladaceas* (**fig. 75**). También se reconocen: **a)** conchillas de foraminíferos planctónicos, distribuidas en dos poblaciones, de entre 60 μm y 120 μm ; **b)** ammonitellas con textura de arena fina; **c)** conchillas de foraminíferos bentónicos, **d)** intraclastos de algas *dasycladaceas*, **e)** cuerpos circulares rellenos de hidrocarburos, y **f)** menos frecuentes quistes dinoflagelados calcáreos (**fig. 76**).

Los fragmentos detríticos son de moscovita y cuarzo. Se observan cristales de carbonato de calcio de forma rómbica.

La materia orgánica se presenta en motas y laminillas discontinuas que en ocasiones separan las diferentes láminas de tapices microbiales. Los hidrocarburos rellenan fósiles y espacios interlaminares.

Es de destacar que en las secciones delgadas **dma 4843** y **dma 4862** se identifica yeso en cristales de color pardo amarillento, con bordes irregulares, arriñonados, con forma de roseta.

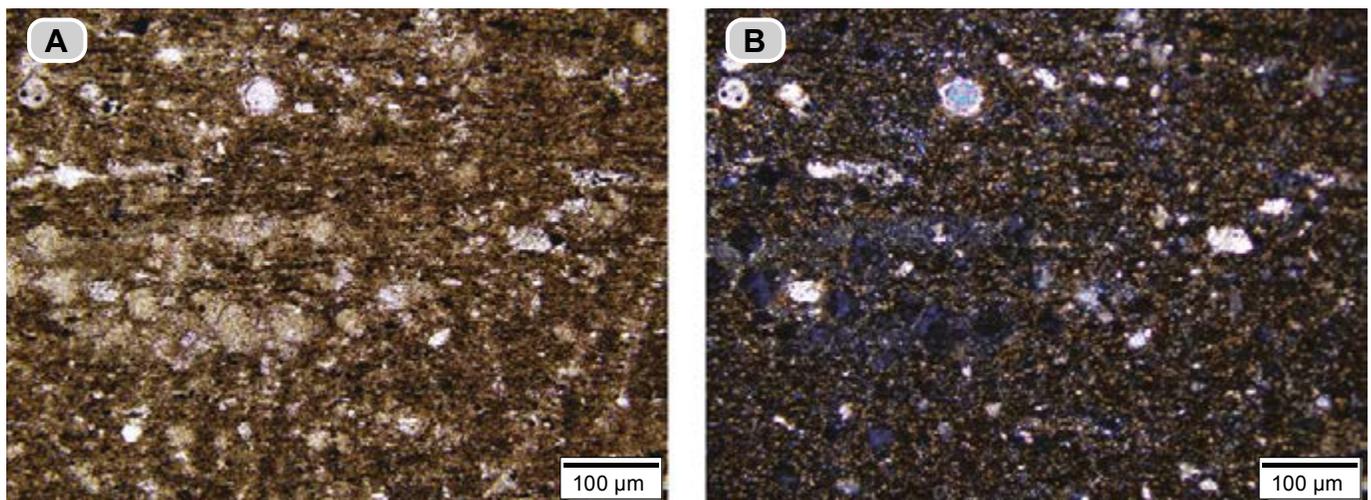


Figura 72. *Mudstone* arcilloso calcáreo con materia orgánica (**dma 4848**), en el microscopio se identifica como *bindstone* con arcillas y materia orgánica. **A)** Tapices microbiales con arcilla adherida. Nótese la presencia de cristales de yeso (tonos pardo-amarillentos claros), restos de conchillas de foraminíferos planctónicos de 60 μm y cuerpos circulares con anillo de cristales de calcita subrectangulares (quistes de dinoflagelados calcáreos). **B)** La misma fotografía de **A**, tomada con nicoles cruzados: el yeso toma colores grises de primer orden.

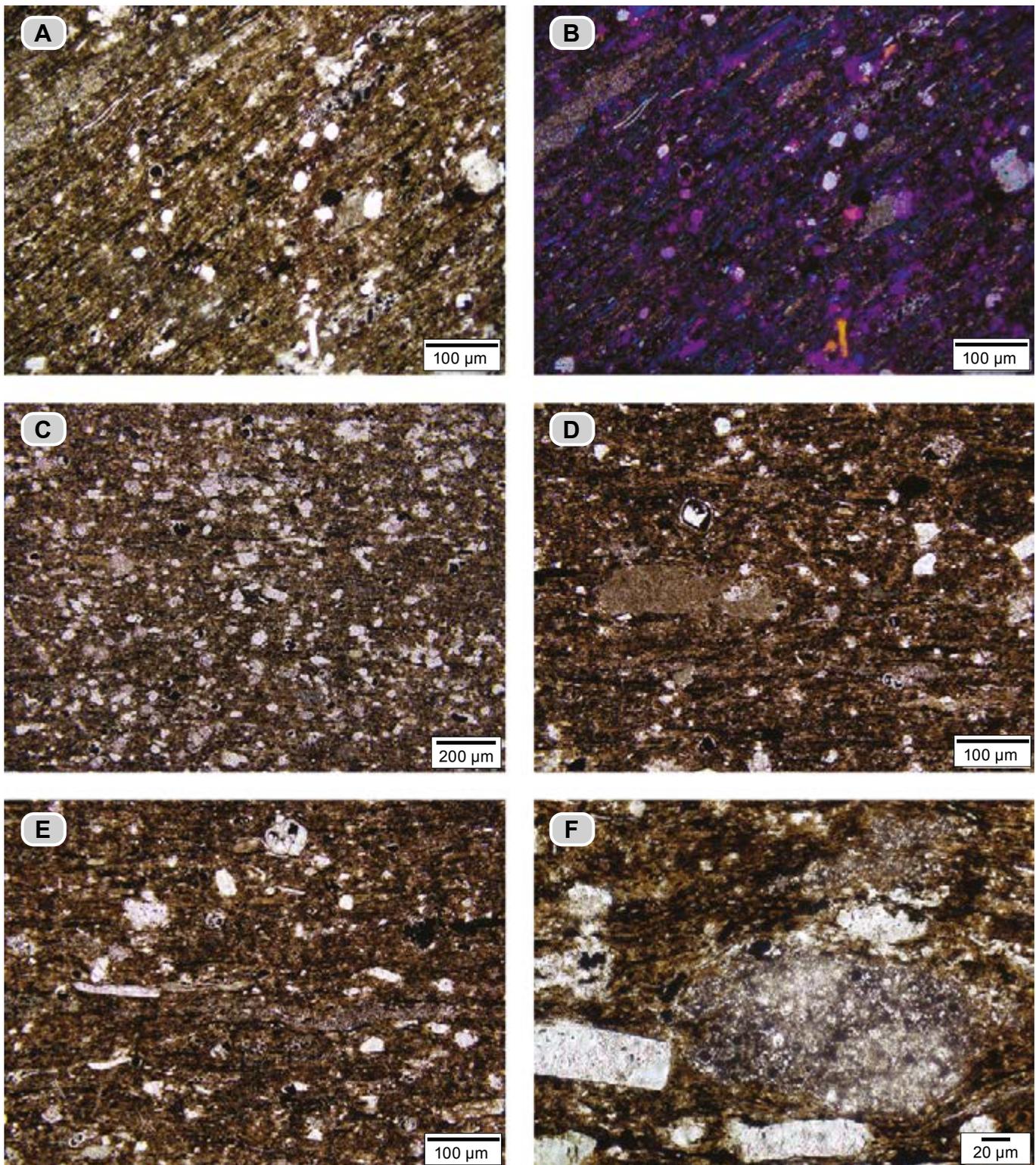


Figura 73. *Mudstone* arcilloso calcáreo con materia orgánica y terrígenos (**dma 4822**); en el microscopio se identifica como *bindstone* con arcillas, materia orgánica y terrígenos con textura limo. **A y B)** Alternancia de láminas de tapices microbiales con arcillas y láminas biomineralizadas por calcita microcristalina; hay presencia de fragmentos de cuarzo, mica detrítica, caolinita, conchillas de foraminíferos y cuerpos circulares y achatados rellenos de hidrocarburo con un anillo de cristales de calcita subrectangulares (quistes de dinoflagelados calcáreos). **B)** Fotografía tomada con compensador de 1λ y nicoles cruzados para mostrar la presencia de arcilla, que destaca con tono azul. Nótese los intraclastos de algas *Dasycladaceas*. **C)** Se observan cristales rómbicos de calcita, cuarzo, caolinita, moscovita, conchillas de foraminíferos planctónicos ($40\ \mu\text{m}$) y piritita. **D)** Con mayor aumento se observan tapices microbiales con arcilla adherida, intraclastos de algas *Dasycladaceas* y laminillas de materia orgánica. **E)** Se observan fragmentos de cuarzo y mica detrítica, así como conchillas de foraminíferos planctónicos e intraclastos laminares de algas *Dasycladaceas*. **F)** Detalle de un sector de esta misma sección delgada con intraclastos de algas *Dasycladaceas*; en el centro destaca un intraclasto de algas *Dasycladaceas* rodeado por tapices microbiales; nótese como los tapices microbiales se deforman alrededor del intraclasto.

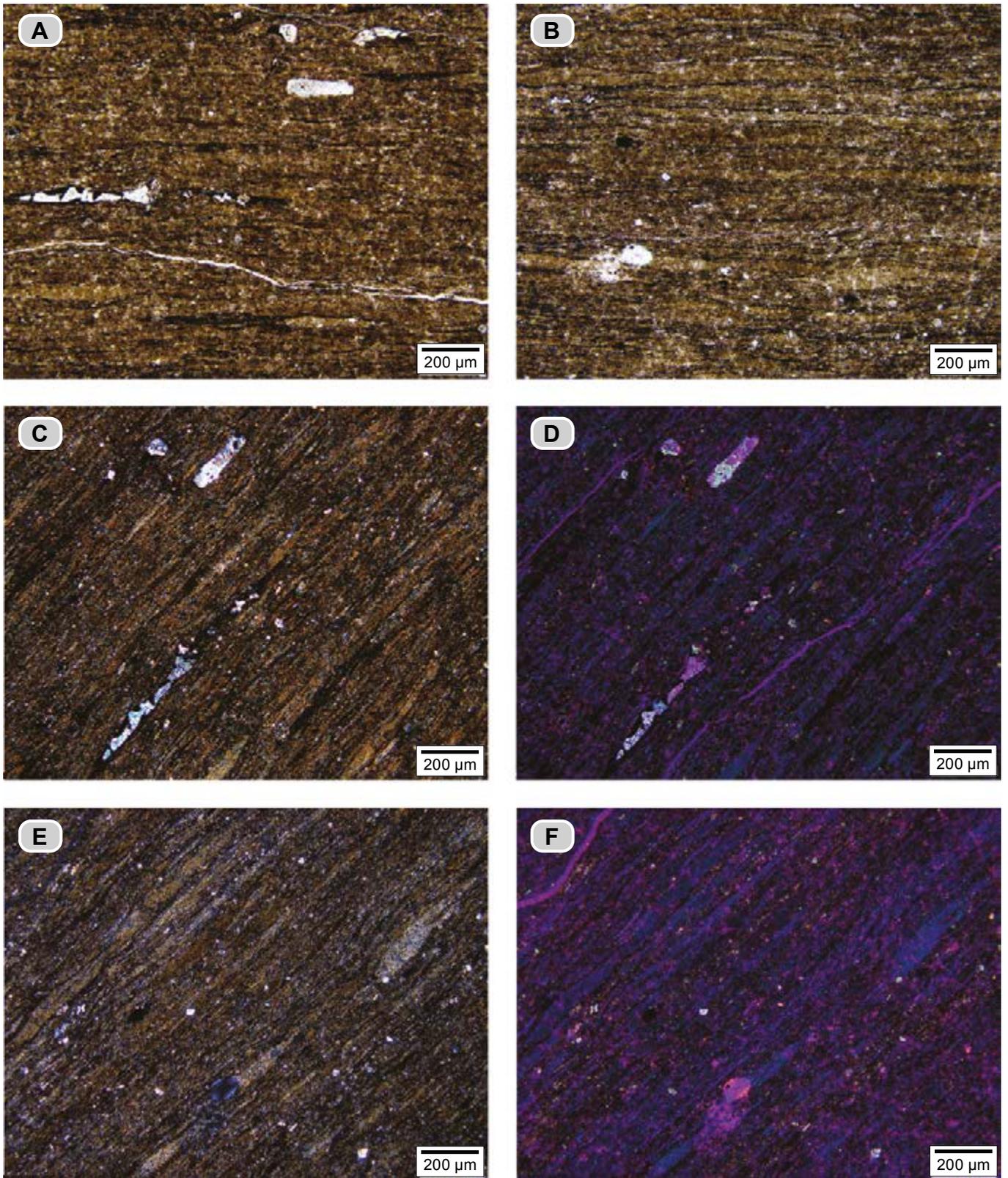


Figura 74. *Mudstone* arcilloso calcáreo con materia orgánica (dma 4841); en el microscopio es un *bindstone* con arcillas y materia orgánica, de textura laminar. **A y B)** Láminas de tapices microbiales con arcilla (pardo claro), separadas por laminillas de materia orgánica oscuras y láminas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (pardo oscuro). **C y D)** En otro sector de la sección delgada se observan los conjuntos de láminas de tapices microbiales con arcilla adherida, separadas por laminillas de materia orgánica; en **D** la misma fotografía se toma girando la platina 45°, insertando el compensador 1λ y con nicoles cruzados: la arcilla toma tono azul por elongación positiva; nótese un fragmento fósil no identificado rodeado de hidrocarburos. **E y F)** Otro sector de la misma sección delgada, con alternancia de láminas onduladas y plano-paralelas de tapices microbiales con arcilla adherida, laminillas de materia orgánica y tapetes microbiales biomineralizados por calcita microcristalina. El fino hábito micáceo de la arcilla se nota en **F**.

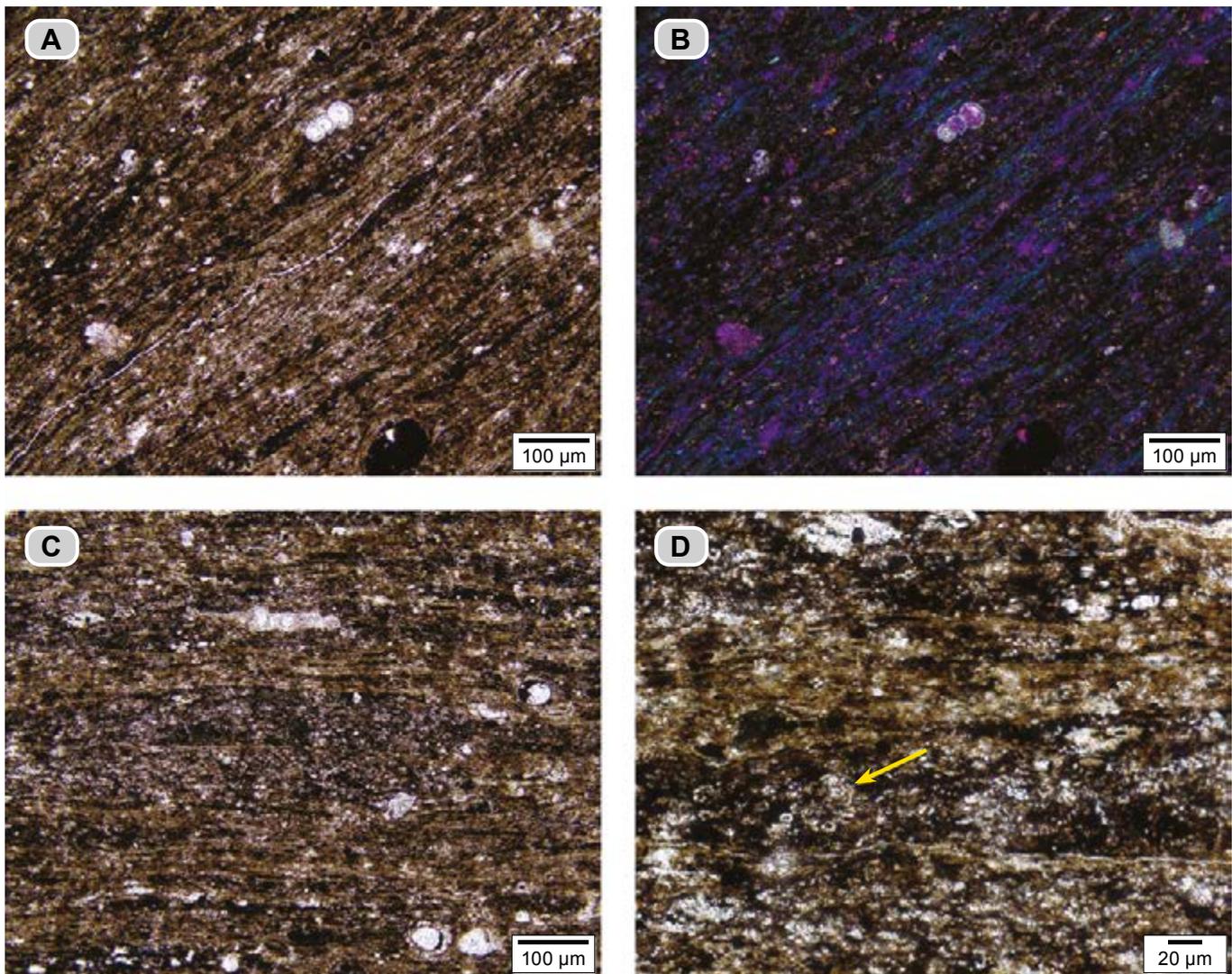


Figura 75. *Mudstone* arcilloso calcáreo con materia orgánica (**dma 4833**); en el microscopio es un *bindstone* con arcillas y materia orgánica. **A)** Intervalos laminares levemente ondulados en los que alternan tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (pardo oscuro) y tapices microbiales con arcillas adheridas (pardo claro), que definen textura lenticular y pulverulenta; nótese las laminillas negras de materia orgánica. **B)** La misma fotografía que en **A** con inserción del compensador 1A y nicoles cruzados: la arcilla toma color azul. En esta ocasión destacan los intervalos laminares con arcilla adherida de fino hábito micáceo en el centro, mientras que en las partes inferior y superior se observan en mayor porcentaje tapices microbiales con calcita microcristalina. **C)** Laminación suavemente ondulosa y subparalela de tapices microbiales con arcilla (pardo claro); nótese en la parte central de la figura un intraclasto ahusado de agregados de algas *Dasycladaceas*. Nótese también cortes de micelios? con cristales de calcita y rellenos de hidrocarburos. **D)** Ampliación del intraclasto de la figura **C**, para observar los restos de algas *Dasycladaceas* (flecha amarilla).

Las calizas *mudstone* grises oscuras (N3-N5) se presentan en capas delgadas a gruesas (hasta 60 cm), con formas planas paralelas, aunque en ocasiones engrosan y adelgazan a modo de montículos unidos (**fig. 77**). Como impresiones es común observar sobre las superficies S_0 impresiones y restos de amonitas, bivalvos y gasterópodos.

En el microscopio se reconocen dos estadios de recristalización:

A) Con textura porfiroide por neomorfismo (**dma 4821**), compuesta por cristales de calcita (55%) de hasta 120 μm , que forman rosetas con tamaño de hasta 500 μm entrelazadas por tapices microbiales con arcilla adherida (45%) (**fig. 78**); se interpretan como calcita producto de recristalización a partir de rosetas de anhidrita (Flügel 2010, lámina 125, fig. 1-2).

B) *Bindstone* recristalizados (microbialitas) (**dma 4836** y **dma 4871**), con estadio de recristalización bajo (tipo I), en los que la laminación original se conserva (**fig. 78**). Se observa, en alternancia: **1)** tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina con recristalización incipiente, de tono pardo claro, en láminas discontinuas por estrujamiento; **2)** formas lenticulares de tonos pardo oscuro a rojizo, constituidos por microbialitas en las que se reconocen formas orgánicas con textura de tamiz, enmascaradas por materia orgánica, y **3)** láminas claras (blancas) discontinuas, ondulosas, compuestas por un agregado de cristales de calcita espar con tamaño 5-12 μm .

Hay presencia de cristales de calcita anhedrales con tamaños entre 6-15 μm , lo que se interpreta como disgregación

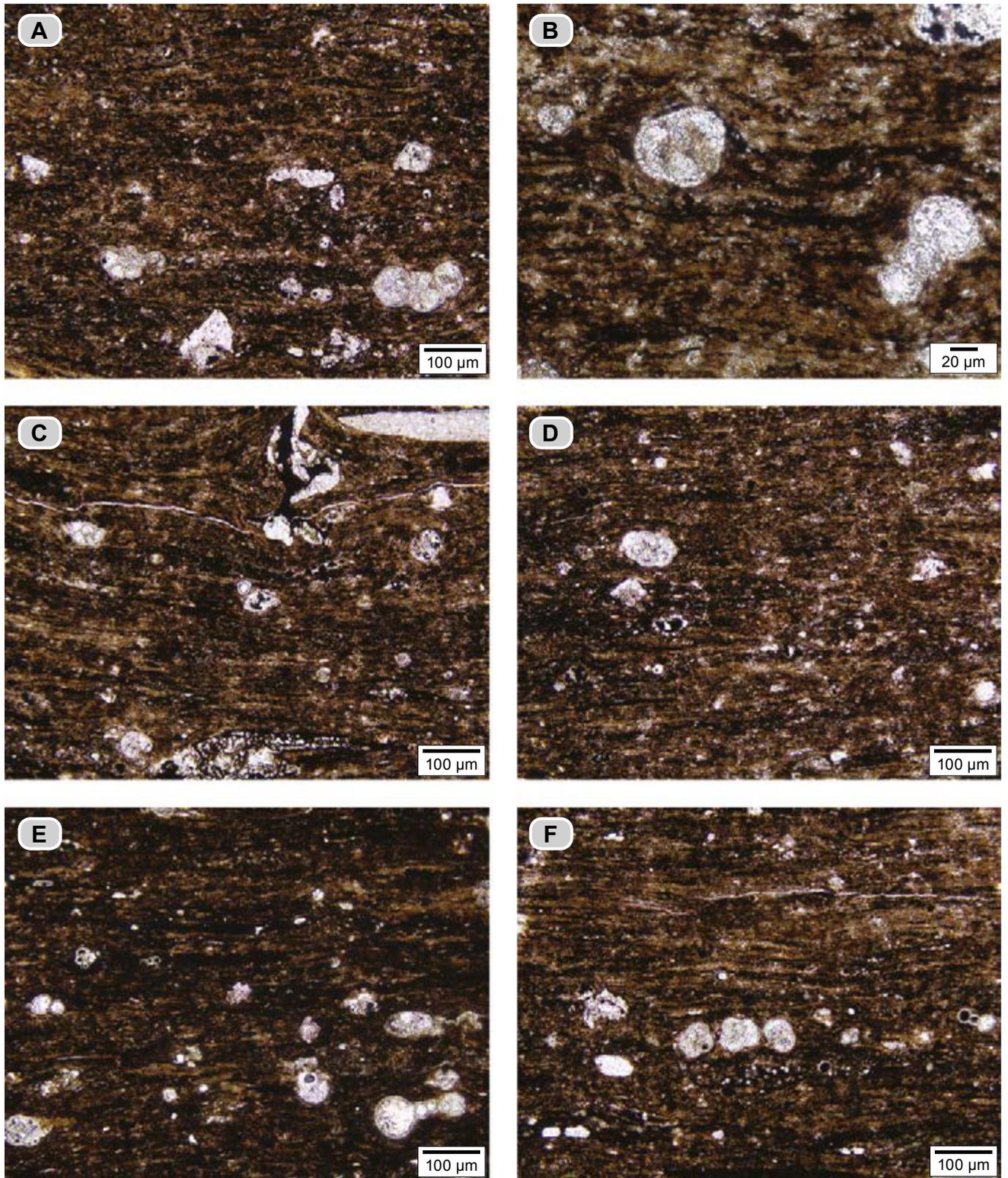


Figura 76. *Mudstone* arcilloso calcáreo con materia orgánica (dma 4833); en el microscopio es un *bindstone* con arcillas y materia orgánica. **A)** Se presentan conchillas de foraminíferos en dos texturas: arena muy fina y fina (mayores que 100 μm) y textura limo grueso (30-60 μm), envueltos por tapices microbiales con arcilla adherida, también se observan laminillas de materia orgánica. **B)** Ampliación de otro sector de la misma sección delgada para mostrar la disposición de las conchillas de foraminíferos planctónicos y la acomodación a ellas de los tapices microbiales. **C)** Tapices microbiales afectados por la migración de hidrocarburos: en la parte central superior se observa un domo por inyección de hidrocarburos, algunas conchillas de foraminíferos y quistes de dinoflagelados calcáreos. **D, E y F)** Nótese las conchillas de foraminíferos con texturas de limo grueso (30-60 μm), recubiertas por tapices microbiales y materia orgánica en laminillas. En algunos de los foraminíferos se observan sus cámaras rellenas de hidrocarburo. En **E)** se observa una amonita en la parte inferior derecha.

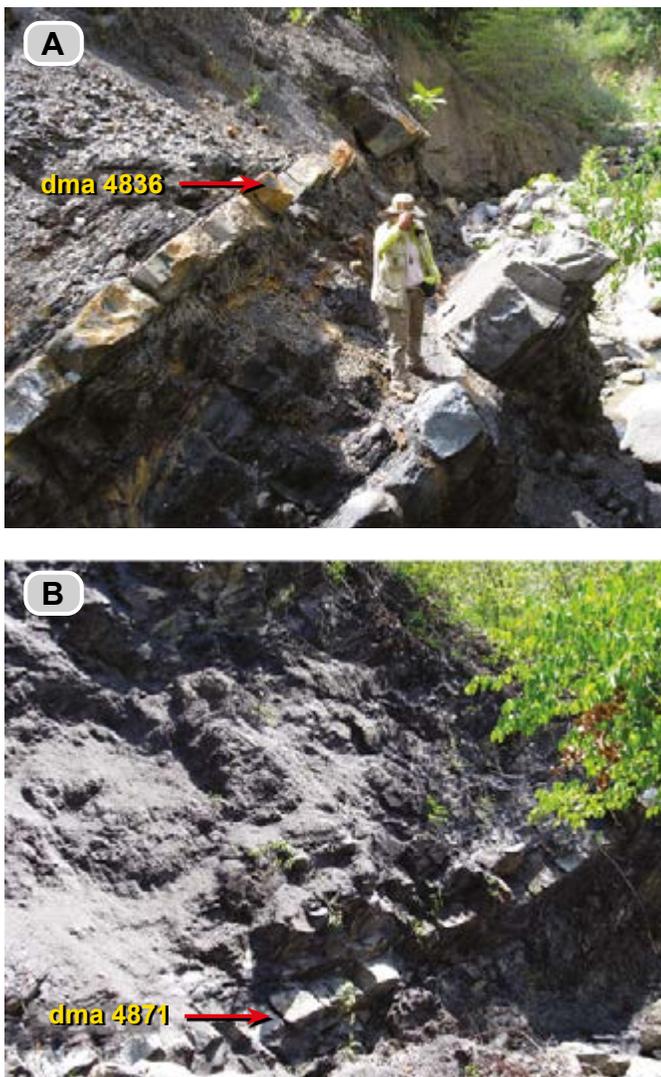


Figura 77. Calizas *mudstone* del intervalo estratigráfico J en capas que generan resalte con las siguientes características: **A)** La capa inferior se adelgaza y engrosa, a modo de montículos, mientras que la capa superior tiene base y techo plano paralelo (metro 224-227). **B)** Capa de forma plana-paralela (metro 249).

de láminas preexistentes. La materia orgánica se observa en laminillas; hay hidrocarburos relleno espacios interlaminares y fragmentos fósiles. Entre los restos fósiles se reconocen (**fig. 79**): **a)** conchillas de foraminíferos planctónicos con tamaños entre 100-150 μm ; **b)** conchillas de ammonitellas con tamaños de 200-250 μm ; **c)** ostrácodos; **d)** cuerpos circulares de 30 a 40 μm , con relleno de calcita e hidrocarburos en ocasiones concentrados, interpretados como cortes de micelios; y **e)** restos de algas *Dasycladaceas*. La pirita se presenta en cristales octaédricos y hay trazas de fragmentos de cuarzo.

Intervalo estratigráfico K (255-270 m). Se localiza entre los $\Delta 51$ y $\Delta 47$ de la polygonal; en este intervalo persiste la abundancia de las arcillas, a la par que aumenta el contenido de material calcáreo y las rocas adquieren mayor competencia (**fig. 80**). En la parte media de este intervalo, entre los metros 263-264, hay una capa delgada de caliza *packstone* (**dma 4883**), con forma tabular (**fig. 80**).

Alternan paquetes de *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N3), y calizas *mudstone* dispuestas en capas delgadas y medianas. Localmente afloran *mudstone* calcáreos con materia orgánica.

Los *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica se diferencian del segmento anterior por ser más compactos, presentan laminación plana paralela, partición en esquirlas y lajas; afloran formando paquetes de 2 m a 6 m (**fig. 80**).

En este intervalo las concreciones calcáreas están alineadas y paralelas a S_0 ; tienen formas esféricas, elipsoidales, de trompo e irregulares, con ϕ variable: 35 cm, 20 cm, hasta 15 cm.

Las calizas *mudstone* grises (N3-N5) que dan resalte topográfico presentan dos expresiones morfológicas: **I)** calizas en capas gruesas (60 cm), con adelgazamientos y abombamientos que producen un aspecto arrosariado, y **II)** capas con superficies planas paralelas.

En este intervalo se presentan deformaciones estructurales locales (**fig. 81**): la primera en el metro 260, con 30 cm de tramo deformado entre dos capas que no están deformadas; se aprecia una serie de fracturas discontinuas que rompen la roca con una fábrica de rombos. El segundo tramo deformado se observa a partir del metro 265, con las siguientes características: **a)** varias direcciones de fracturamiento; **b)** por sectores el material es deleznable; **c)** repliegues, y **d)** brecha que corta la estratificación con espesor variable, desde 10 a 5 cm, en donde se embeben fragmentos que alcanzan hasta 3 cm.

En el microscopio, los *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica se identifican así:

A) *Bindstone* con arcillas y materia orgánica, de textura pulverulenta y menos frecuente lenticular (**dma 4874**), (**fig. 82**); se caracterizan por: **a)** láminas de tapices microbiales con arcillas de fino hábito micáceo que extinguen en conjunto, lo que Konhauser (1998) interpretó como material atrapado, que forma superficies abióticas; la presencia de arcillas de fino hábito micáceo que forman esta superficies en el presente estudio se denomina textura pulverulenta, y **b)** láminas lenticulares de micrita con recristalización incipiente, en donde se alcanzan a distinguir formas orgánicas que asemejan un tamiz; se reconocen fragmentos de algas *Dasycladaceas*. La materia orgánica se presenta en hilos o laminillas.

Hay presencia de varios tipos de bioclastos: **a)** foraminíferos planctónicos con textura limo (hasta de 60 μm) y menos frecuente bentónicos; **b)** cuerpos circulares en cuyo interior se observa un único cristal de calcita, rodeado por un anillo oscuro, a su vez circundado por cristales de calcita con terminaciones triangulares (quistes de dinoflagelados calcáreos). De manera aleatoria aparecen cristales rómbicos de calcita (**fig. 82**).

B) *Bindstone* con arcillas y materia orgánica (**dma 4877**), de textura laminar; las láminas son suavemente onduladas y

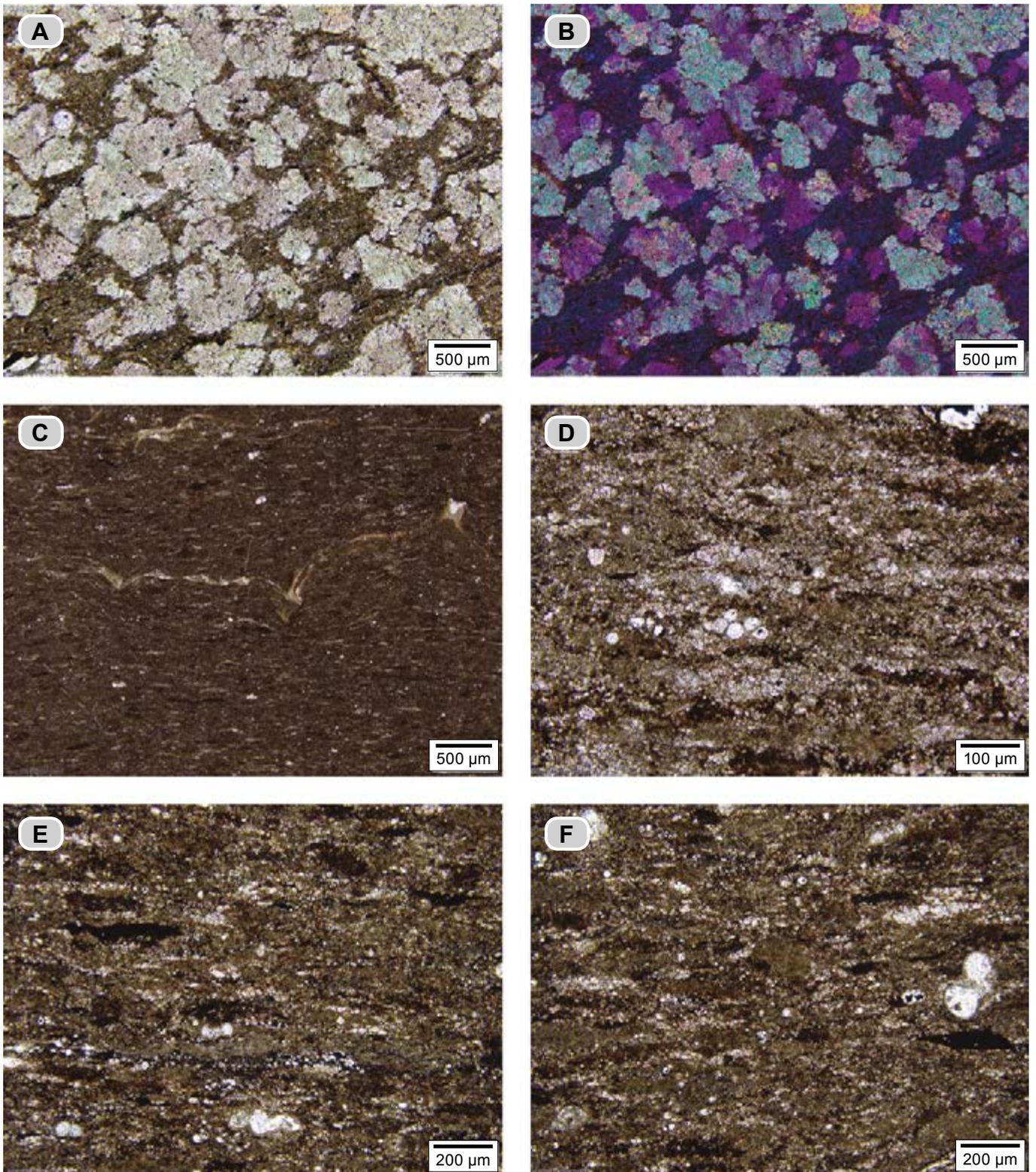


Figura 78. Texturas en las calizas *mudstone* del intervalo estratigráfico J. **A)** Textura porfiroide (**dma 4821**): son rosetas de yeso recrystalizadas en calcita (color blanco); el material de tono pardo corresponde a tapices microbiales con arcilla. **B)** La misma fotografía que en **A** con nicols cruzados y compensador 1λ para que las arcillas adheridas a los tapices microbiales resalten en tono azul oscuro entre las rosetas. **C, D, E y F)** *Bindstone* con recrystalización baja, en donde se reconoce la textura original (**dma 4836**). **C)** Tapices microbiales biomineralizados con calcita microcristalina (tono pardo); se alternan con lentes de tapices microbiales (tono pardo oscuro), formas laminares constituidas por cristales de calcita con tamaños de hasta 12 μm (color blanco); y peloides de micrita (tono pardo oscuro rojizo); nótese el remanente de una concha de amonita? en el centro de la sección delgada. **D)** Con mayor aumento se reconocen: **a)** tapices microbiales recrystalizados que se observan como formas laminares y lenticulares de color blanco; **b)** láminas estrujadas discontinuas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina; nótese la recrystalización incipiente responsable del tono pardo claro, y **c)** láminas irregulares de microbialitas de color pardo oscuro enmascaradas por materia orgánica y pirita. En **(F)** nótese los foraminíferos planctónicos con cámaras rellenas de calcita.

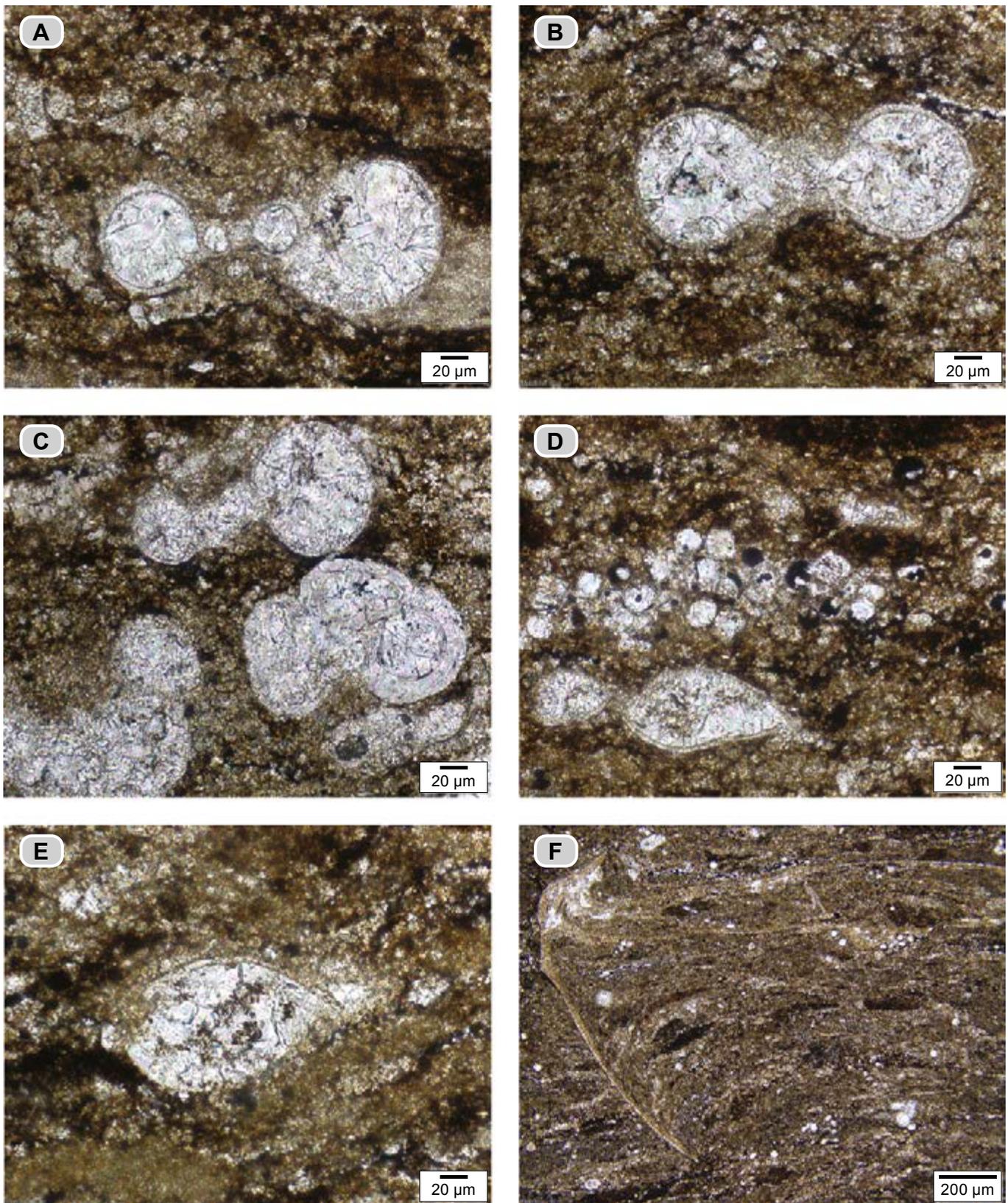


Figura 79. Caliza *mudstone* (dma 4836); en el microscopio se identifica como *bindstone* con recristalización. **A y B)** Conchillas de amonitas recubiertas por tapices microbiales biomineralizados con calcita microcristalina y materia orgánica; nótese el relleno de las cámaras por cristales de calcita. **C)** Conchillas de foraminíferos planctónicos con sus cámaras rellenas por cristales de calcita; en la parte superior de la fotografía aparece una conchilla de amonita. **D)** Tapices microbiales con biomineralización de calcita; hay presencia de cuerpos circulares agrupados con tamaños de hasta 20 µm, rellenos de calcita espar e hidrocarburos, que podrían representar cortes transversales de micelios o elementos reproductores de algas; nótese la presencia de un ostrácodo. **E)** Presencia de ostrácodo relleno con cristales de calcita. **F)** Fragmento fósil que produce deflexión en la laminación original de los tapices microbiales.



Figura 80. Vistas de afloramientos del intervalo estratigráfico K (metro 255-258). **A)** Aspecto compacto en los metros inferiores de los *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica (metro 255-257). **B)** En los *mudstone* arcillosos calcáreos, la meteorización del carbonato de calcio resalta la laminación plano-paralela (metro 258). **C)** *Mudstone* calcáreo arcilloso con una delgada capa de *packstone* (**dma 4883**) y caliza *mudstone* en capa mediana de tono blanco que engrosa y adelgaza (metro 262-265).



Figura 81. *Mudstone* arcilloso calcáreo con deformación localizada: **A)** Deformación señalada por el martillo, se aprecian 30 cm con láminas retorcidas (metro 260). **B)** Segundo tramo deformado; la roca se observa finamente fracturada y deleznable (metro 266). **C)** Brecha en franja oblicua al S_0 ; la roca está triturada en fragmentos angulares de hasta de 3 cm (metro 266).

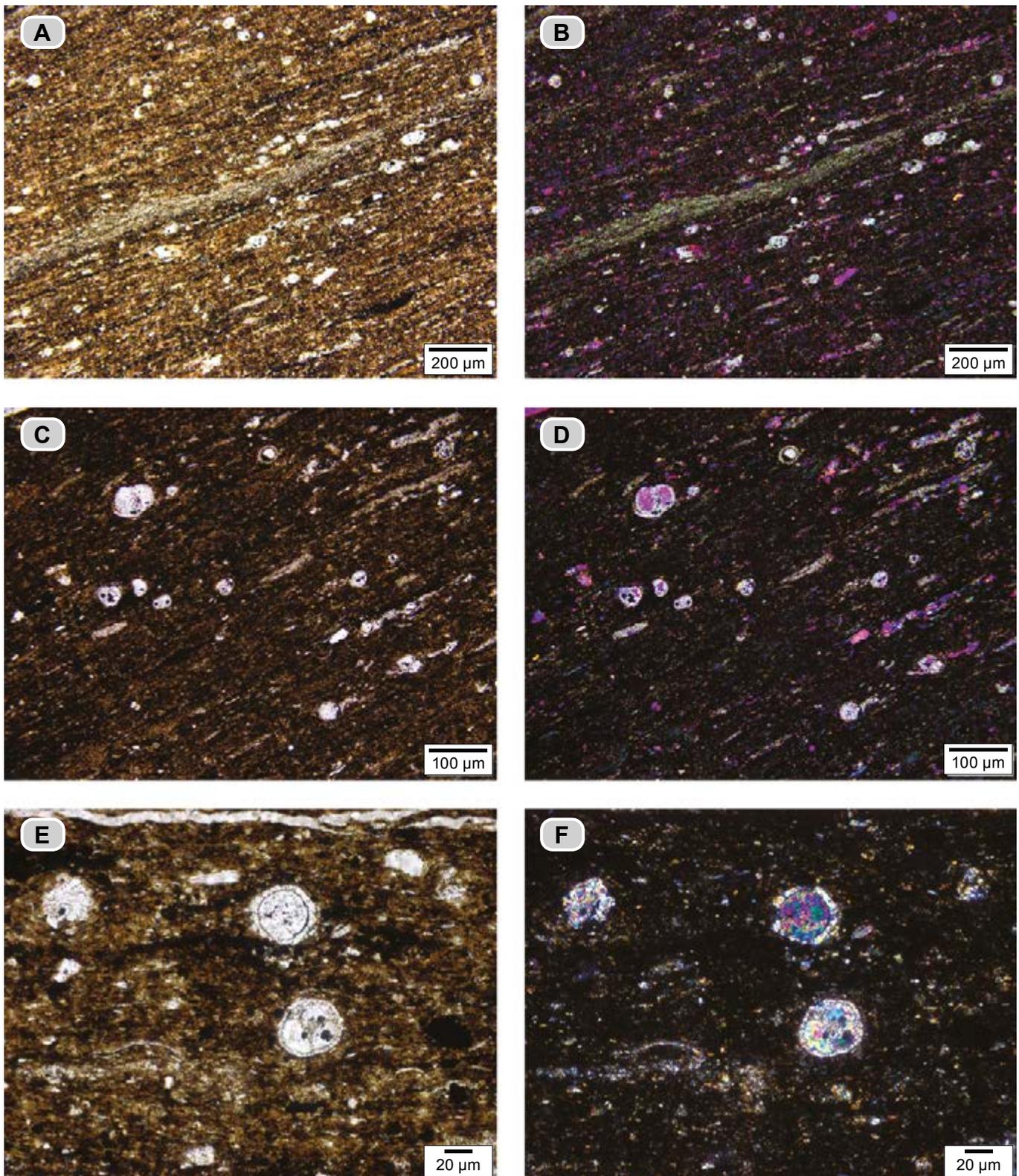


Figura 82. *Mudstone* arcilloso calcáreo (dms 4874); en el microscopio es un *bindstone* con arcillas y materia orgánica. **A)** Láminas de tapetes microbiales (tono pardo) con textura pulverulenta, acompañadas por laminillas de materia orgánica y una lámina lenticular de un tapete microbial con biomineralización por calcita microcristalina en el centro de la figura. **B)** Fotografía de **A**, tomada con compensador 1λ y nicoles cruzados, en la que la arcilla con textura de fino hábito micáceo extingue en conjunto y toma tono azul. **C)** Con mayor aumento se distingue la materia orgánica en laminillas y en motas, y conchillas de foraminíferos planctónicos? con dos poblaciones: una de 40-60 μm, y la segunda de 100-120 μm y foraminíferos bentónicos? **D)** Fotografía del mismo sector que en **C**, tomada con compensador 1λ y nicoles cruzados, en donde la presencia de arcillas es resaltada con tono azul. **E)** Detalle de los tapetes microbiales que deja ver sus láminas onduladas, la presencia de materia orgánica y conchillas de foraminíferos planctónicos de 40 μm; nótese un cuerpo circular de único cristal con anillo de cristales subrectangulares: quiste de dinoflagelado calcáreo. **F)** La misma fotografía tomada con nicoles cruzados.

pueden distinguirse: **1)** intervalos de láminas levemente onduladas de dos tipos de tapices (**fig. 82**), las microbialitas y los tapices microbiales con arcilla adherida, y **2)** intervalos compuestos por lentes de tapices microbiales con arcilla adherida (**fig. 83**). La materia orgánica se presenta en laminillas interpuestas en los tapices microbiales.

Los fósiles (1%) presentes están representados por cuerpos circulares con dos anillos; el primero es oscuro, y el segundo está conformado por cristales de calcita aciculares (quistes de dinoflagelados calcáreos). También hay presencia de pirita framboidal como mineral traza.

En el microscopio, los *mudstone* calcáreos con materia orgánica se identifican como *bindstone* con materia orgánica (microbialita) (**dma 4886**). Se trata de tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (pardo oscuro) que alternan con formas lenticulares de micrita con recristalización incipiente, que por sectores deja ver la textura de tamiz, y se trataría de tapices microbiales (pardo amarillento) (**fig. 84**), acompañados de: **a)** cuerpos circulares con dos anillos: el primero es oscuro y es rodeado por un anillo conformado por cristales de calcita subrectangulares o aciculares (quistes de dinoflagelados calcáreo). Se reconocen cristales rómbicos de carbonato (dolomita), y **b)** foraminíferos planctónicos con tamaños desde 25 μm hasta 60 μm .

La delgada capa de caliza *packstone* (**dma 4883**), ya mencionada, en el microscopio se identifica como biomicrita, está laminada y se reconocen dos láminas: hacia la base es biomicrita empaquetada, y hacia el techo biomicrita rala (**fig. 85**). La lámina inferior presenta textura *packstone*, los bioclastos alcanzan textura de guijos; en general aparecen paralelos al S_0 y entre ellos se reconocen restos de algas filoideas, bivalvos, de restos de amonitas y fragmentos de huesos, estos últimos reemplazados por cristales de espar y pirita. La lámina superior es una biomicrita rala textura *wackestone*, y en general los bioclastos tienen menores tamaños; como en la lámina anterior, los bioclastos más abundantes son fragmentos de algas filoideas. Esta delgada capa se interpreta como una tormentita.

Hay cristales cúbicos de pirita y además materia orgánica e hidrocarburos que rellenan restos fósiles y espacios intergranulares.

Intervalo estratigráfico L (270-288 m). Se localiza entre los puntos $\Delta 48$ - $\Delta 46$ de la poligonal y se caracteriza por el incremento del material calcáreo. Se diferencian tres conjuntos, de los cuales el Conjunto L2 (medio) genera resalte topográfico; está constituido por calizas *mudstone* laminadas, localmente bioturbadas, dispuestas en capas medianas a gruesas. Los conjuntos L1 (inferior) y L3 (superior) forman entrantes en el perfil topográfico, consisten en *mudstone* calcáreos con materia orgánica y *mudstone* arcillosos con materia orgánica, respectivamente.

Conjunto L1 (270-277 m). Genera entrante en el perfil topográfico. Este conjunto se puede subdividir en dos paque-

tes; el inferior es más arcilloso que el superior, calcáreo, y están separados por una capa gruesa de caliza *mudstone* (**fig. 86**). El paquete inferior son *mudstone* arcillosos con materia orgánica (**dma 4888**), mientras que es superior son *mudstone* calcáreos con materia orgánica (**dma 4892**); son de tonos grises oscuros (N3) y forman intervalos de hasta 4 m, con laminación fina, plana paralela. La caliza *mudstone* que separa estos dos paquetes es gris oscura (N3), por meteorización adquiere tono café pálido amarillento (10YR 6/2); muestra adelgazamiento (40 cm) y engrosamiento (70 cm) hasta adquirir apariencia arrosariada.

En el microscopio los *mudstone* arcillosos con materia orgánica (**dma 4888**) corresponden a *bindstone* con arcillas y materia orgánica, que presenta intervalos laminares (**figs. 87 E y 87 F**), diferenciados del modo siguiente:

Intervalos con textura lenticular: son tapices microbiales con arcilla adherida que definen formas de lentes (tono pardo claro), alternan con tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina y enmascarados por materia orgánica (tono pardo oscuro). La materia orgánica también se presenta a modo de laminillas e hilos paralelos a S_0 .

Intervalos con textura laminar, son tapices microbiales con arcilla adherida que definen láminas muy delgadas, alternan con hilos y laminillas de materia orgánica paralelos a S_0 .

Intervalos con textura pulverulenta se observan láminas de tapices microbiales con arcilla adherida con extinción en conjunto, que alterna con lentes de tapetes microbiales biomineralizados por calcita microcristalina.

Hay presencia de terrígenos, representados por fragmentos de cuarzo y mica detrítica con textura limo, que se presentan en diferentes proporciones; en la mayoría de las láminas la proporción es de 1%, y en una lámina alcanzan 7,5%. También se observa glauconita y moscovita detrítica.

En ambos intervalos hay presencia de cristales de calcita con formas rómbicas (1%) y de pirita cúbica dispersa (1%).

En el microscopio, los *mudstone* calcáreos con materia orgánica (**dma 4892**), se identifican como *bindstone* con materia orgánica (microbialita): se trata de tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina. La materia orgánica forma laminillas que separan los tapices. Los fósiles (7,5%) son conchillas de foraminíferos de texturas muy finas (30-40 μm), quistes de dinoflagelados calcáreos y escasos ostrácodos. Los fragmentos detríticos son cuarzo y mica detrítica con textura limo (**figs. 87 A, B, C y D**).

En la caliza *mudstone* (**dma 4890**) que separa los paquetes superior e inferior ya descritos, el microscopio deja ver textura porfiroide por neomorfismo. Destacan rosetas calcificadas de anhidrita (**fig. 88**) en mosaico de cristales, con tamaños individuales de hasta 120 μm . Las rosetas se interpretan como recristalización de calcita a partir de rosetas de yeso.

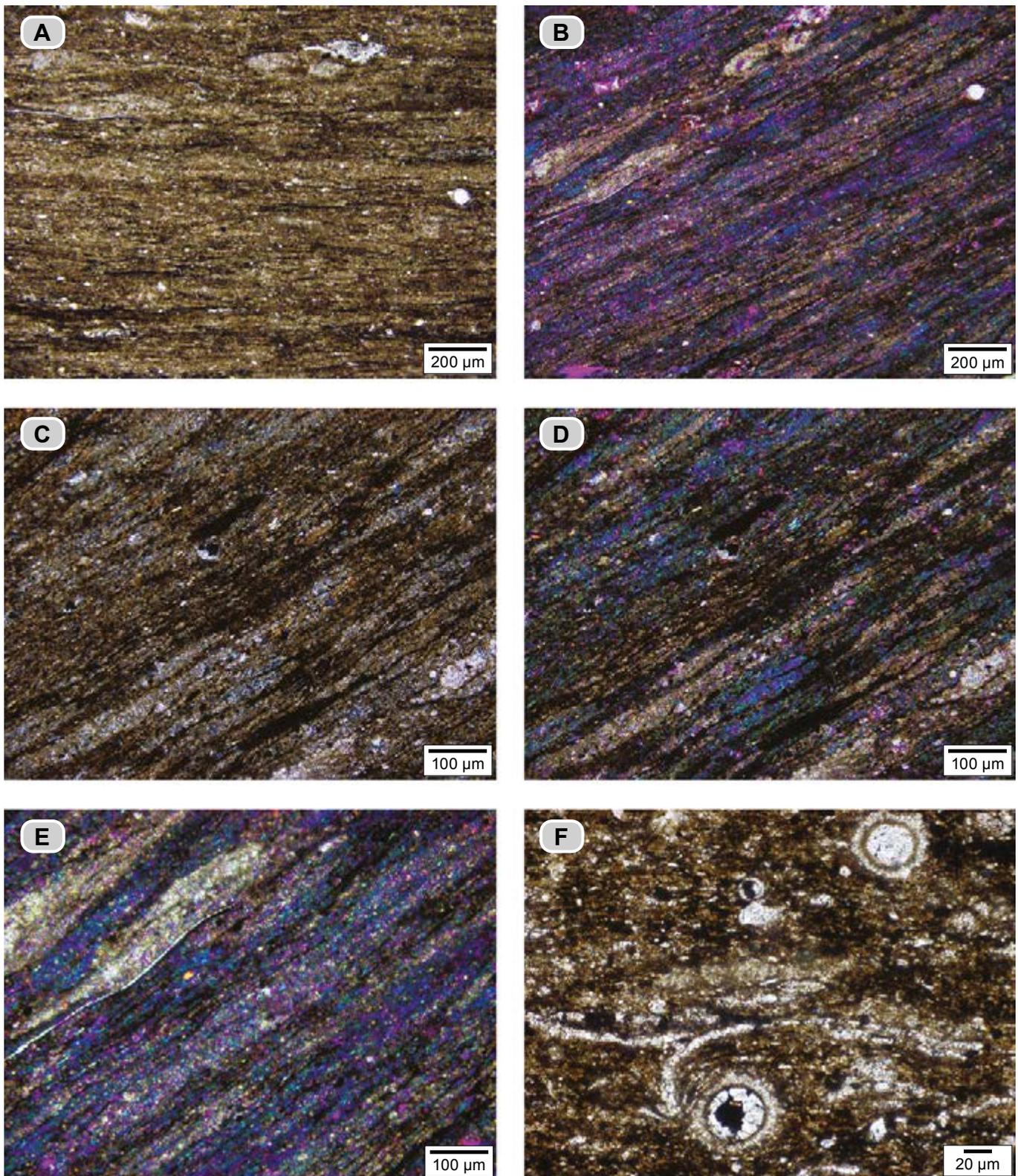


Figura 83. *Mudstone* arcilloso calcáreo (dma 4877); en el microscopio es un *bindstone* laminado. **A)** Se observan láminas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (tono pardo claro) y láminas de tapices microbiales con arcilla adherida (tono pardo oscuro) que definen una textura laminar suavemente ondulosa y lenticular. **B)** Fotografía de **A** tomada con compensador 1λ y nicoles cruzados, en la que se ve claramente la alternancia de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina y tapices microbiales con arcillas que toman tono azul. **C)** En la misma sección delgada se observa textura lenticular entre láminas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina y láminas con arcilla adherida. **D)** Fotografía de **C** tomada con compensador 1λ y nicoles cruzados, donde las arcillas toman tono azul; destaca la laminación por composición. **E)** Detalle para destacar las láminas de tapices microbiales, biomineralizados por calcita microcristalina y con arcilla adherida separadas por materia orgánica en laminillas. **F)** Con mayor aumento se observan las microbialitas y cuerpos circulares con dos anillos; el primero es oscuro, y el segundo está compuesto de cristales de calcita aciculares (quistes de dinoflagelados calcáreos).

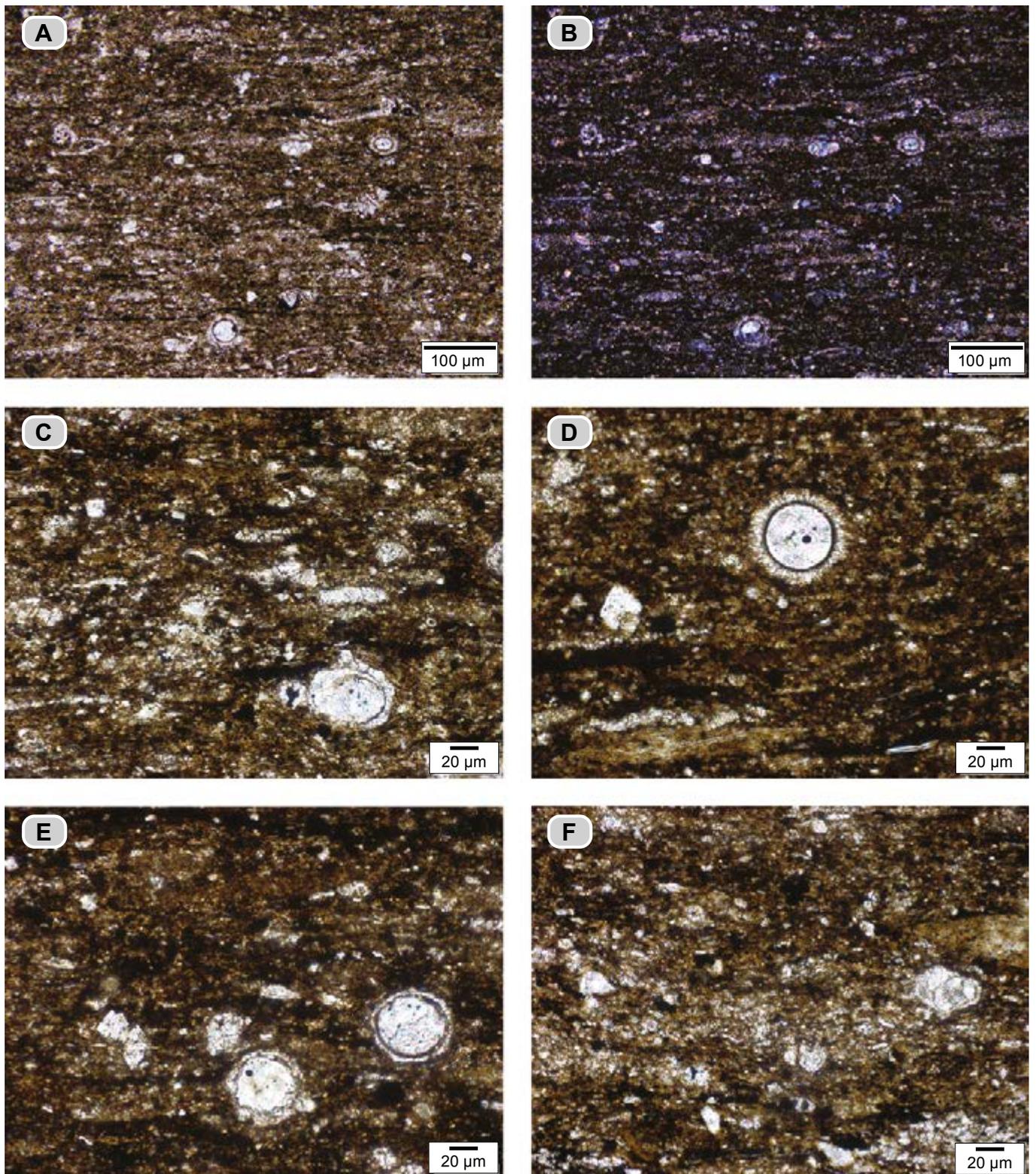


Figura 84. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica (**dma 4886**); en el microscopio identificado como *bindstone* con materia orgánica. **A)** Láminas onduladas de tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (tono pardo), alterna con materia orgánica en motas y laminillas, y de lentes de tapices biomineralizados y con recristalización incipiente (tono pardo claro). **B)** La misma fotografía que en **A**, tomada con nicols cruzados. **C)** Con mayor aumento se observa la textura porosa que semeja un tamiz (tapices microbiales) con motas de materia orgánica y cuerpo circular con una estructura interna concéntrica con prominencias en su periferia (quiste de dinoflagelado calcáreo). **D)** Toma con mayor detalle para ilustrar el cuerpo circular con dos anillos; el primero es oscuro y está rodeado por un anillo de cristales de calcita aciculares (quiste de dinoflagelado calcáreo). **E)** Nótese la presencia de cuerpos circulares similares a **D**, con el anillo exterior de cristales de calcita subrectangulares (quistes de dinoflagelados calcáreos). **F)** Textura porosa o de tamiz de los tapices microbiales; nótese la presencia de una conchilla de foraminífero bentónico.

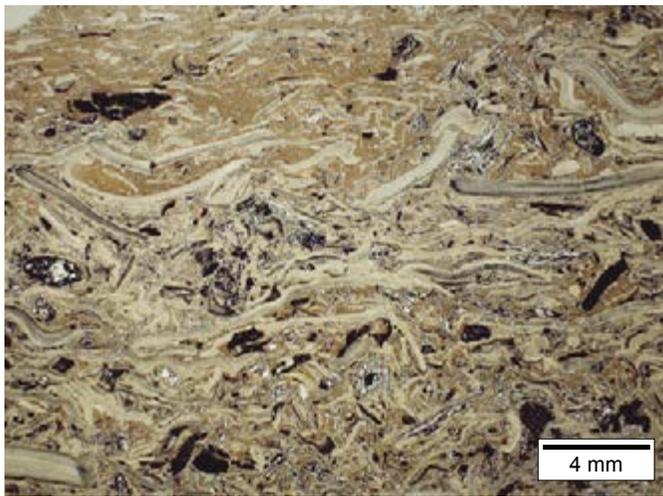


Figura 85. Sección delgada de la caliza (**dma 4883**), interpretada como tormentita, en la que se diferencian dos láminas: la inferior con textura *packstone* y predominio de restos de algas filoideas, y la superior con textura *wackestone*. La matriz en ambas láminas es micrita recristalizada.



Figura 86. *Mudstone* arcilloso con materia orgánica (**dma 4888**) y *mudstone* calcáreo con materia orgánica (**dma 4892**), de tonos grises oscuros, separados por una caliza *mudstone* (**dma 4890**) dispuesta en capa que se engrosa lateralmente (metro 273-274).

Conjunto L2 (277-283 m). Genera resalte en el perfil topográfico. Muestra en el tramo inferior calizas *mudstone* laminadas, en capas gruesas y medianas, con formas plano paralelas, mientras que en el tramo cuspidal afloran *mudstone* calcáreos con materia orgánica de aspecto macizo que gradan a calizas *mudstone* nodulares (**fig. 89**).

En las calizas *mudstone* la laminación varía de delgada a mediana, plana paralela, continua, resaltada en superficie expuesta por presentar tonos grises oscuros (N2) y grises claros (N6) (**fig. 89**).

En el microscopio las calizas *mudstone* (**dma 4893** y **dma 4897**), dejan ver láminas claras que corresponden a *bindstone* recristalizados, mientras que las láminas oscuras corresponden a *bindstone* con materia orgánica.

En el microscopio las láminas claras están constituidas por cuerpos laminares ondulosos discontinuos; internamente están constituidos por mosaicos de cristales de calcita espar (10-20 μm) interpuestos con hojuelas de tapices microbiales con materia orgánica de tonos oscuros (**fig. 90**).

Las láminas oscuras están constituidas por tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (microbialita); hay presencia abundante de cristales de calcita anhedrales (hasta de 12 μm), como resultado de la disgregación de láminas claras preexistentes (**fig. 90**).

Se reconocen los siguientes restos fósiles: **a)** cuerpos circulares con diámetro de 20 μm , que en ocasiones se concentran y dibujan lentes; **b)** cuerpos circulares con un centro de cristal único de calcita rodeado por los siguientes anillos: con un anillo segmentado y constituido por cristales de calcita, por un anillo ocráceo, por dos anillos cada uno constituido por cristales subrectangulares de calcita y por un anillo de cristales de calcita rectangulares que generan bordes rectos; estos cuerpos corresponden a quistes de dinoflagelados calcáreos (Reháková 2000), **c)** conchillas de foraminíferos planctónicos de tamaños de hasta 60 μm , y **d)** restos de ostrácodos y de fragmentos de bivalvos de 150 μm (**fig. 90**). La materia orgánica se observa como motas.

En el microscopio, en las calizas *mudstone* nodulares (**dma 4895**) (metro 281) se observan relictos de laminación como efecto de la bioperturbación. Los sectores claros están constituidos por cuerpos laminares, mientras que en los sectores oscuros se observan tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina, acompañados de materia orgánica (**fig. 91**).

Hay presencia de fragmentos de escamas de peces, ostrácodos y de bivalvos con diferentes orientaciones. Se siguen observando los siguientes fósiles: **a)** foraminíferos planctónicos de hasta 60-70 μm ; **b)** quistes de dinoflagelados calcáreos. Son cuerpos circulares calcáreos con tamaños de 20-40 μm , y varios tipos anillos: unos son segmentados, otros con un o dos anillos constituidos por cristales de calcita; **c)** cuerpos con forma de fríjol con tamaños de hasta 80 μm , reemplazados por cristales de calcita radiales a partir de un semicírculo: *microcodium*, y **d)** cuerpos circulares de hasta 80 μm reemplazados por cristales de calcita espar.

También se presentan granos de cuarzo, peloides de glauconita y moscovita en proporciones menores del 1%; además, cristales rómbicos de calcita.

Los *mudstone* calcáreos macizos con materia orgánica en el microscopio, corresponden a *bindstone* con materia orgánica (**dma 4894**), y los *mudstone* arcillosos con materia orgánica (**dma 4896**) corresponden a *bindstone* con arcillas y materia orgánica.

La muestra **dma 4894** corresponde a tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina (microbialitas) (**fig. 92**); se reconoce la textura porosa de tamiz, que alterna con algunas laminillas de tapices microbiales con arcilla adherida. Hay presencia de fragmentos de cristales anhedrales de calcita espar de hasta 15 μm , interpretados

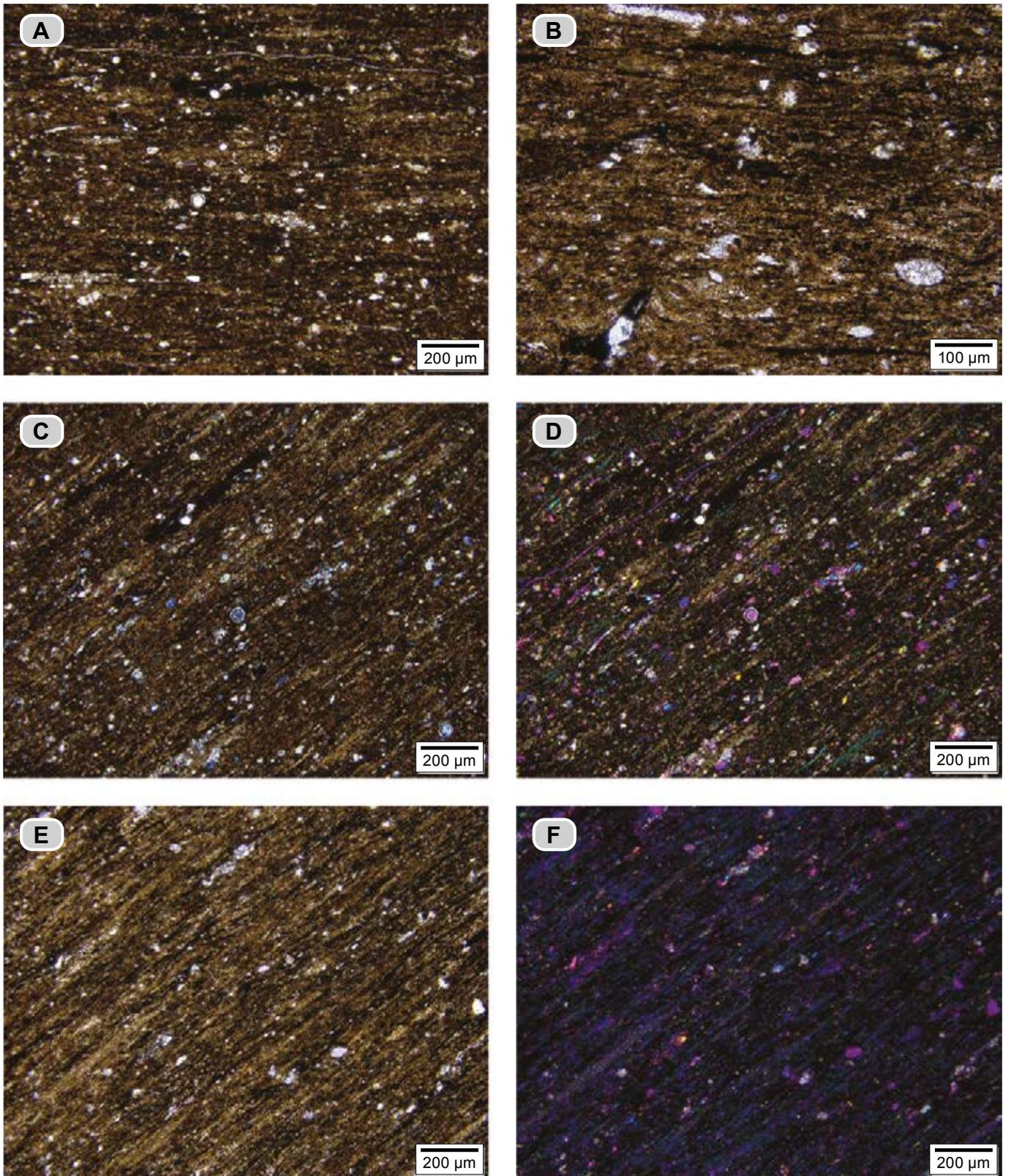


Figura 87. A, B, C y D) *Mudstone* calcáreo con materia orgánica (dma 4892); en el microscopio se identifica como un *bindstone* con materia orgánica. A) Se observan tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (tonos pardos), materia orgánica en laminillas y motas. B) Ampliación de otro sector de la sección delgada, que muestra en el extremo inferior izquierdo del cuadro la inyección de hidrocarburos y en extremo inferior derecho un foraminífero bentónico. C y D) Se observan tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (tonos pardos), con materia orgánica en laminillas y como motas (tonos negros); de manera subordinada se presentan lentes, donde la arcilla se adhiere; D Se toma la fotografía con nicoles cruzados y compensador 1λ, y en azul se resalta la presencia de arcilla. E y F) *Mudstone* arcilloso con materia orgánica (dma 4888), en el microscopio es un *bindstone* con arcillas y materia orgánica; se observan tapices microbiales con arcilla adherida de textura lenticular; al girar la platina a 45°, con nicoles cruzados y el compensador 1λ, la arcilla toma tono azul.

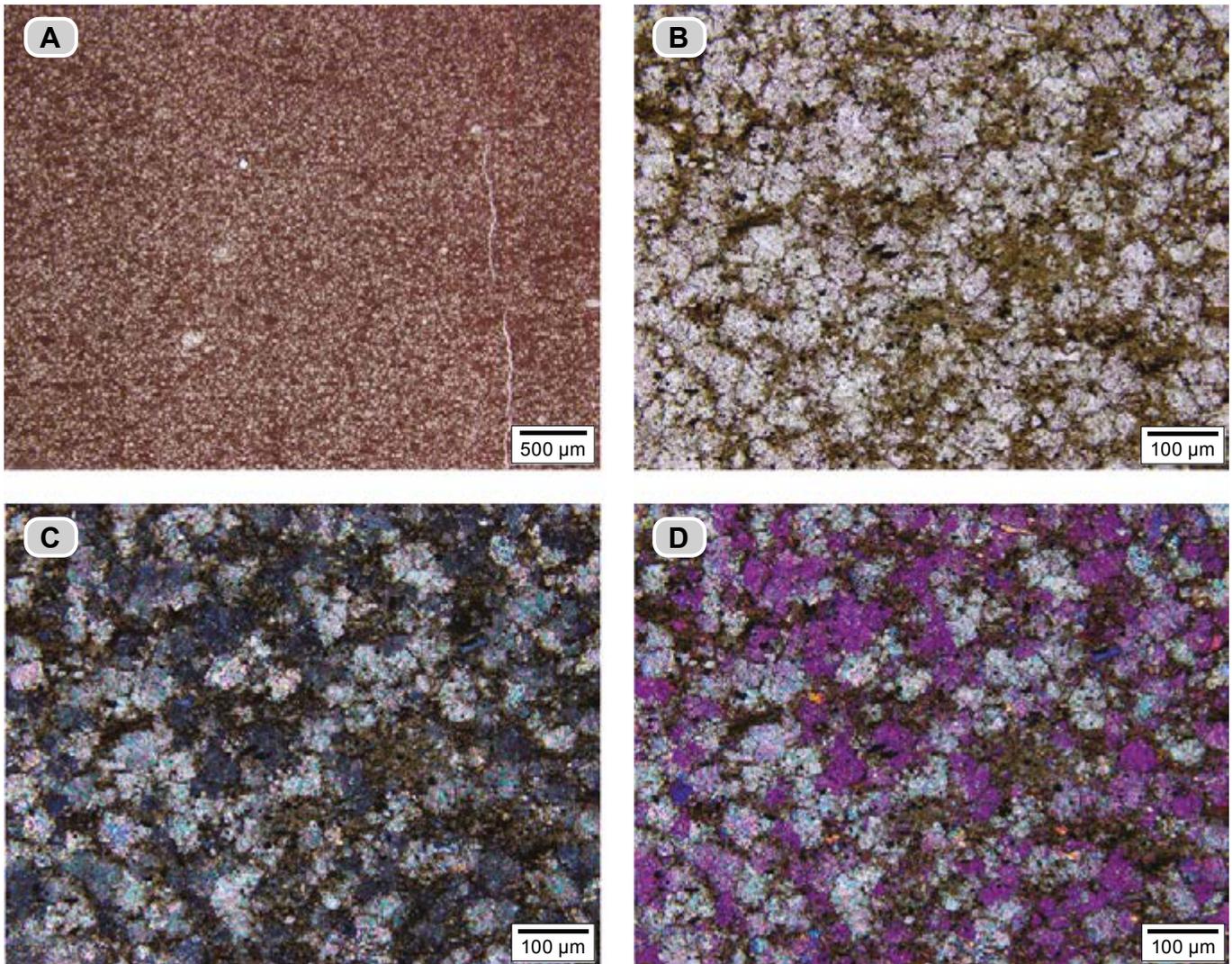


Figura 88. A, B, C y D) Caliza *mudstone* (dma 4890). Está constituida por agregados de cristales conocidos como rosetas calcificadas de anhidritas. Los distintos tonos de color muestran cómo los cristales de calcita tienen diferentes cortes cristalográficos.

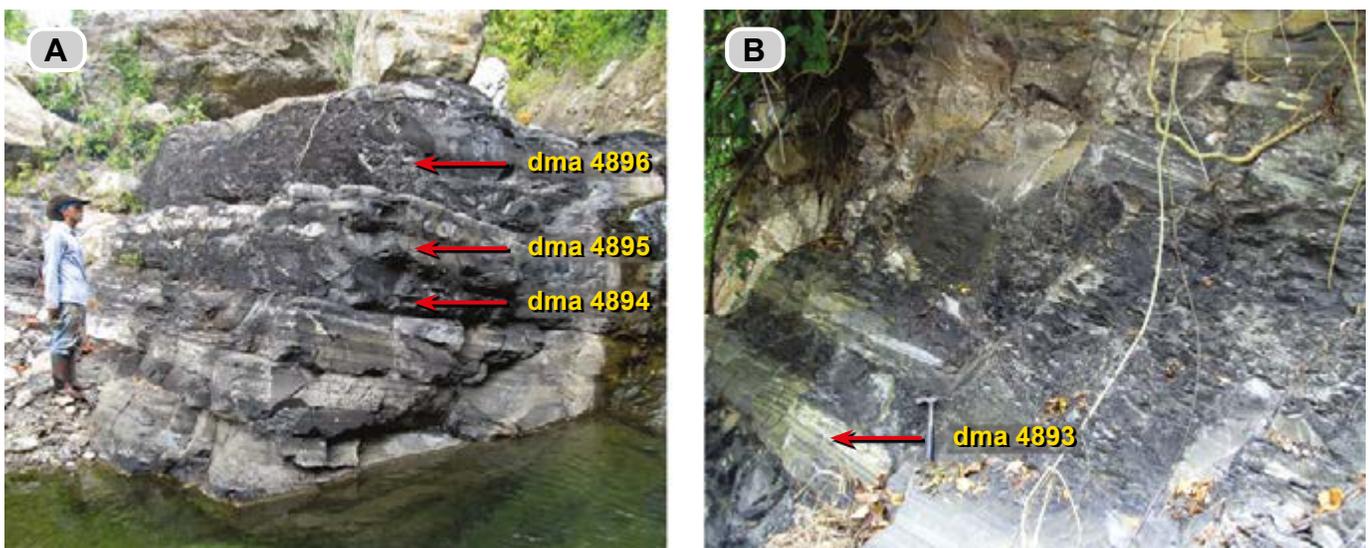


Figura 89. A) Calizas *mudstone* en capas muy gruesas, en las que destaca la laminación plana paralela. En la parte superior del afloramiento, nótese las capas nodulares (dma 4895); las capas que no muestran laminación son *mudstone* calcáreos con materia orgánica (metro 280-284, $\Delta 47-\Delta 46$). **B)** Detalle del intervalo de las rocas laminadas; nótese cómo la meteorización resalta la laminación y la partición en esquirlas de los *mudstone* calcáreos con materia orgánica (metro 277-279, $\Delta 47-\Delta 46$).

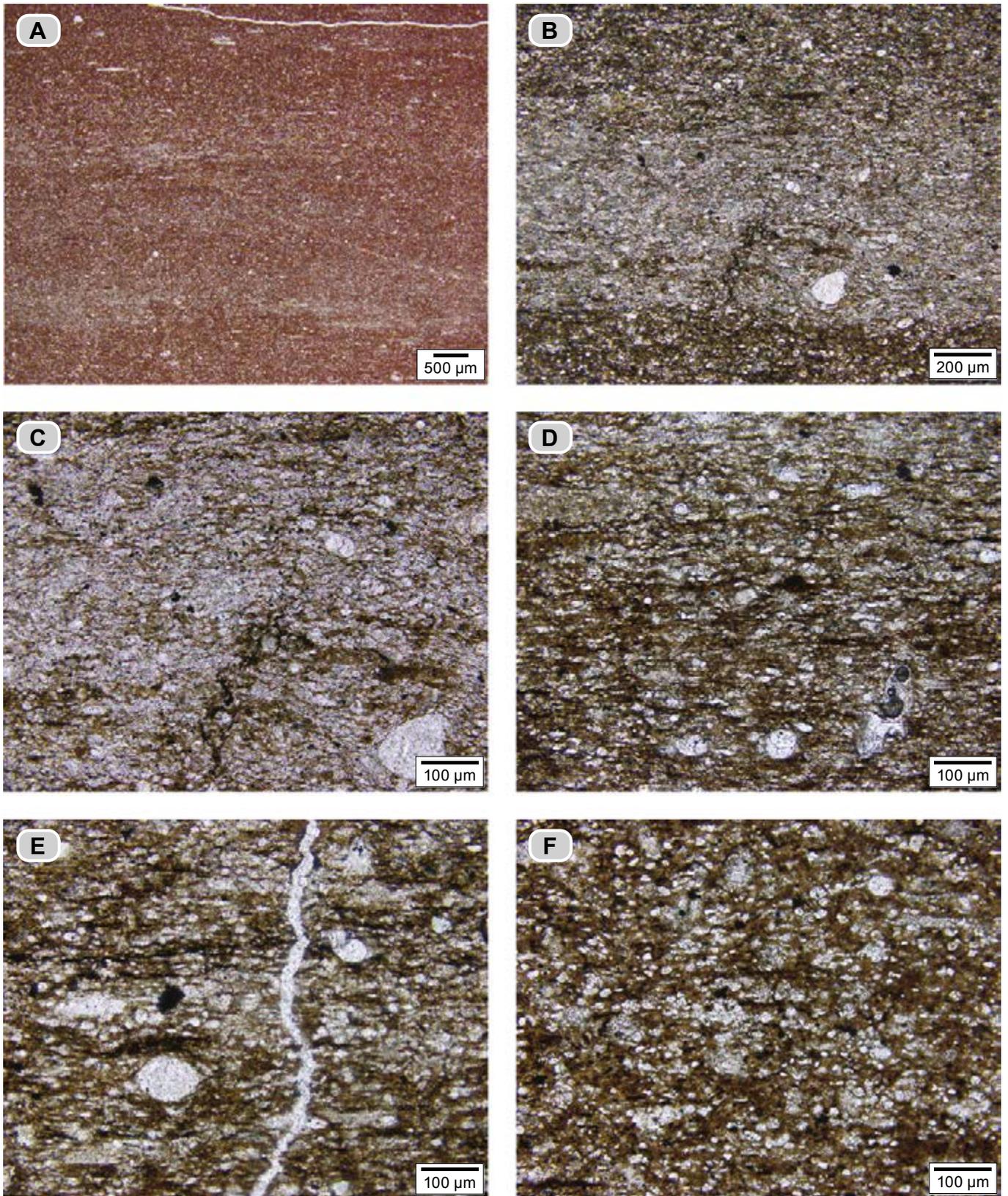


Figura 90. Caliza *mudstone* laminada (dma 4893). **A)** Laminación repetitiva en la que se destacan parejas de láminas clara-oscura; la lámina clara presenta recristalización. **B)** Análisis microscópico de una lámina clara: parte central de la figura formada por cuerpos laminares ondulados, constituidos por cristales de calcita de hasta 20 μm ; nótese la inyección de hidrocarburos en forma de hilos. **C)** La misma lámina que en **B**, con mayor aumento para resaltar la inyección contorsionada de hidrocarburos. **D, E y F)** Detalles de una lámina oscura: en **D** nótese la presencia de conchillas de foraminíferos planctónicos paralelos a S_0 y una conchilla de gasterópodo oblicuo a S_0 . **E y F)** Nótese los tapetes microbiales con biomineralización de calcita microcristalina, y los cristales de calcita de hasta 12 μm , disgregados de las láminas claras preexistentes.

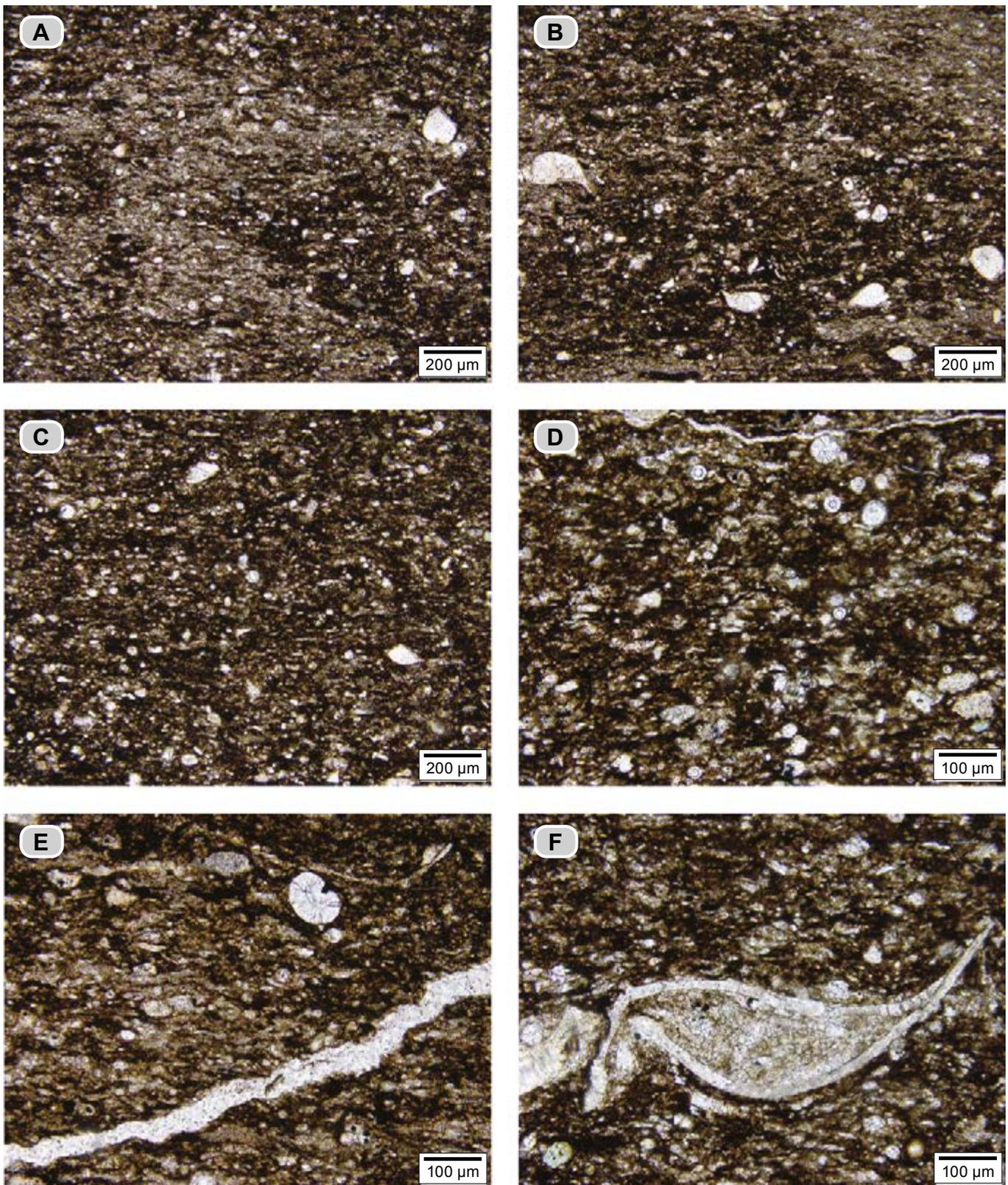


Figura 91. Caliza *mudstone* bioturbada (*dma 4895*); en el microscopio se trata de un *bindstone* bioturbado con materia orgánica. **A y B)** Se observan fantasmas de bioturbación y laminación relictas. Los sectores claros están constituidos por fragmentos laminares y en los sectores oscuros se reconocen tapices microbiales; nótese las conchillas de ostrácodos en varias posiciones. **C)** Sector oscuro: son tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina; hay presencia de materia orgánica en motas y formando caminos. Nótese ostrácodos y quistes de dinoflagelados calcáreos. **D)** Con mayor aumento se observan los tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina con materia orgánica, fragmentos de cristales de calcita interpretados como productos de disgregación de otras láminas, y entre los fósiles se reconocen cuerpos circulares calcáreos: quistes de dinoflagelados calcáreos. **E)** Se observa un cuerpo con forma de frijol reemplazado por fragmentos de cristales de calcita que crecen en forma radial en torno a un centro: *microcodium*. **F)** Nótese la concha de un ostrácodo con relleno de calcita espar.

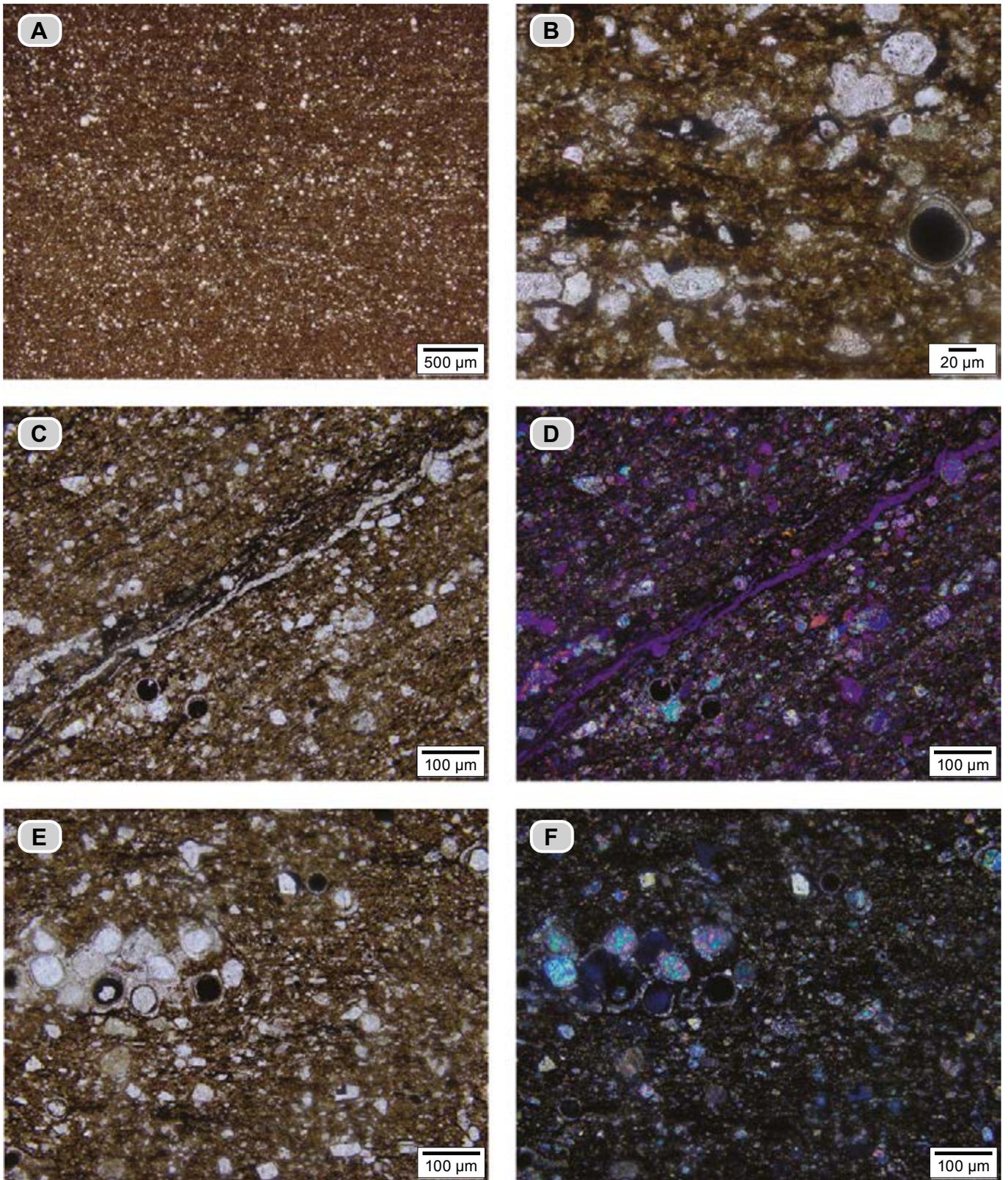


Figura 92. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica (dma 4894); en el microscopio se identifica como *bindstone* con materia orgánica (microbialitas). **A)** Aspecto general de los tapices microbiales; los elementos blancos corresponden a fragmentos de cristales de calcita; la materia orgánica se dispone en laminillas discontinuas paralelas a S_0 . **B)** Con mayor aumento se observan los fragmentos de carbonatos, lentes y laminillas de materia orgánica y cuerpo circular achatado relleno de hidrocarburos con anillos compuestos por cristales aciculares de calcita. **C)** Tapices microbiales con biomineralización de calcita microcristalina alternan con laminillas de tapices con arcilla adherida. **D)** La misma fotografía que en **C**, pero tomada con compensador de 1λ y nicoles cruzados: la arcilla resalta y toma un tono azul. **E)** Con mayor aumento se observan cuerpos circulares, en ocasiones achatados agrupados, rellenos de hidrocarburos o calcita como un único cristal, rodeados por anillos constituidos por cristales aciculares de calcita. **F)** Fotografía de **E** tomada con nicoles cruzados.

como producto de disgregación de láminas claras preexistentes. Se observa materia orgánica en láminas muy delgadas discontinuas (asemejan hilos) y en motas.

Entre los bioclastos se identifican: **a)** cuerpos circulares, en ocasiones achatados, con tamaños alrededor de 50 μm , rellenos de hidrocarburos o de cristal único de calcita, con uno o dos anillos de cristales aciculares de calcita; en ocasiones se observan estos cuerpos reunidos a modo de panal y unidos por cemento de calcita espar (**figs. 92 E y F**), y **b)** foraminíferos planctónicos? (30-60 μm). Hay presencia de cristales rómbicos de calcita. Fragmentos de glauconita de hasta 1% y de trazas de cuarzo y moscovita.

En el microscopio, el *mudstone* arcilloso con materia orgánica (**dma 4896**), se identifica como *bindstone* con arcillas y materia orgánica. Está compuesto por láminas de tapices microbiales con arcilla adherida, con textura lenticular y pulverulenta; la materia orgánica se presenta en laminillas y también se observan fragmentos disgregados de cristales de calcita. Entre los fósiles se reconocen foraminíferos planctónicos con tamaños de 40-60 μm , quistes de dinoflagelados calcáreos y entre los fragmentos terrígenos hay presencia de cuarzo y moscovita, como minerales traza.

Conjunto L3 —techo— (284-288 m). De este conjunto solo afloran los dos metros inferiores, representados por *mudstone* calcáreos con materia orgánica, separados por un tramo cubierto de 16 m de espesor, hasta encontrar los primeros afloramientos de la Formación Tablazo en la quebrada La Paja. Al comparar este conjunto con este mismo contacto en la quebrada La Molinilla, localizada 10 km al norte de esta sección, se observa que solo 5 de los 16 metros pertenecerían a la Formación La Paja.

Contactos

El contacto entre las formaciones La Paja y la infrayacente Rosa Blanca es neto, plano paralelo e inconforme en la región de Los Santos (véase Etayo-Serna y Guzmán 2019). En la quebrada La Paja, los metros cuspidales de la Formación Rosa Blanca son calizas *wackestone* y *packstone* de bivalvos *Ceratostreon bous-singaultii* (ORBIGNY, 1842, *sensu* Dietrich 1938), con tamaños desde 2 hasta 6 cm, dispuestas en capas muy gruesas (**fig. 93**). El contacto con la Formación La Paja está cubierto; sin embargo, el cambio brusco de litologías revela el cambio neto entre las dos unidades, ya que en la Formación la Paja las primeras rocas observadas son calizas *mudstone* recristalizadas en alternancia con *mudstone* calcáreos con materia orgánica.

El contacto superior de la Formación La Paja es transicional a la Formación Tablazo (metros inferiores); este contacto corresponde a un rasgo geomorfológico entre el valle que dibuja la Formación La Paja y la cornisa que generan las rocas de la Formación Tablazo. Los metros cuspidales de la Formación La Paja se componen de *mudstone* arcillosos con materia orgánica (conjuntos L1 y L3), entre ellos interpuestos 6 metros de calizas *mudstone* laminadas que constituyen el conjunto L2. El contacto se marca en la base de un paquete estratigráficamente superior de 53 m (Segmento estratigráfico I de la Formación Tablazo), que litológicamente es similar al conjunto L2.

En la vía nueva que parte de la población de Lebrija hacia San Vicente de Chucurí, en el cruce con la quebrada La Molinilla (N:1.279.751, E:1.085.505, Z:527), se observan los 25 m superiores de la Formación La Paja en contacto con la Forma-



Figura 93. Metros cuspidales de la Formación Rosa Blanca: calizas *wackestone* y *packstone* de bivalvos. Río Sogamoso (N:1.269.685, E:1.082.400, Z:211).

ción Tablazo. De la misma manera que en la sección tipo, en la Formación La Paja se presentan tres conjuntos; dos de ellos generan entradas en el perfil topográfico, mientras que el conjunto intermedio genera saliente (**fig. 94**), y la Formación Tablazo se reconoce por el mismo paquete potente de calizas *mudstone* que generan salientes.



Figura 94. Contacto entre las Formaciones La Paja y Tablazo en el puente sobre la quebrada La Molinilla (N:1.279.751, E:1.085.505, Z:527). Nótese en los metros cuspidales de la Formación La Paja un conjunto intermedio que genera resalte (esquina inferior izquierda), similar en litología y presentación a las rocas basales de la Formación Tablazo.

Posición cronoestratigráfica

Por Fernando Etayo-Serna

El segmento estratigráfico I representa parte del piso Barremiano: Zona de *Nicklesia dumasiana* y Subzona de *Gerhardtia provincialis*; las Zonas superiores del Barremiano no están representadas, ni las Zonas basales del Aptiano inferior.

La base del segmento II (Intervalo A) incluye representantes de los géneros de amonitas *Procheloniceras* y *Cheloniceras*, que en la bioestratigrafía conocida del Cretácico de Colombia indicarían la parte alta del Aptiano inferior. Los intervalos B y C representarían la parte superior del Aptiano inferior. El Intervalo E (conjuntos 1 y 2), por registrar la presencia de *Dufrenoyia* se toma como base del Aptiano superior; el resto del intervalo E, así como el segmento III, representaría el Aptiano superior.

El segmento IV y la parte inferior del segmento V (base del intervalo estratigráfico J), por la presencia de *Riedelites* y *Stoyanowiceras*, representarían el techo del Aptiano superior. Los intervalos J, K y L del segmento V representarían el Albiano inferior, por la presencia de *Douvilleiceras* y *Neodeshayesites*.

Ambientes de depósito

En la sección tipo de la Formación La Paja la base misma está cubierta (3 m). Sin embargo, los primeros estratos fueron estudiados en la región de Los Santos (hacia las minas El Carrancho), allí, estos estratos se depositan sobre un paleosuelo reportado en la Formación Rosa Blanca por Etayo-Serna y Guzmán (2019); en el metro basal de la Formación La Paja se reconocen láminas de calizas *mudstone* de tonos grises y rojizos, además de yesos, lo que sugiere hacia el oriente de la sección tipo condiciones tipo *sabkha*. González y Espinosa (2012) reportan la presencia de sales de potasio producidas en un ambiente evaporítico.

En la sección tipo, desde los primeros metros se observa alternancia entre un elemento litológico blando y un elemento litológico duro.

En los diferentes segmentos estratigráficos el elemento litológico blando corresponde a *mudstone* calcáreos con materia orgánica, y en él se reconoce una textura porosa (tamiz), que se interpreta como tapices microbiales que inducen la mineralización por medio de la precipitación de carbonato de calcio. Este proceso se conoce como *biomineralización* (Stal, Gemerden y Krumbein 1985; Krumbein et al. 2003), que permite la litificación de los tapices microbiales —microbialitas— (Burne y Moore 1987; Noffke y Awramik 2013). Según Bose y Chafetz (2009), los tapices microbiales se conservan en ambientes desde intermareales hasta supramareales inferiores.

El elemento litológico duro (genera saliente en el perfil topográfico) corresponde a una caliza *mudstone*, que siempre presenta recristalización en varios grados. El grado más alto no permite diferenciar texturas originales, pero en el grado más bajo se observan interlaminaciones claras y oscuras, estas últimas con las mismas características petrográficas de los *mudstone* calcáreos con materia orgánica, mientras que las láminas claras son cuerpos laminares ondulados y con formas de techos agudos, internamente constituidos por un agregado de cristales de calcita; respuesta a la recristalización.

Esta alternancia de láminas claras y oscuras se ha interpretado de la siguiente manera: las láminas oscuras son tapices microbiales litificados bajo el nivel del agua, mientras que las láminas claras representan la recristalización de los tapices microbiales en condiciones subaéreas, es decir, cuando el nivel del agua retrocede, las superficies quedan expuestas y se recristalizan. Esta situación es frecuente en zonas supramareales (**fig. 95**). Esta interpretación microscópica puede ser similar a las características macroscópicas observadas, es decir, la alternancia de los elementos litológicos blandos y duros, indicarían oscilaciones marginales del nivel del mar.

La presencia abundante de cuerpos con formas de intraclastos, peloidales y láminas discontinuas de estructuras algáceas (*Dasycladaceas*), que pululan a profundidades de aguas

marinas de menos 10 m (Berger 2006), sugieren que los estratos que contienen estas algas se formaron en ambientes someros, de intermareales a supramareales. También se observan cuerpos circulares que se han interpretado como órganos reproductores de grupos de algas?

En la petrografía se observaron cristales euhedrales cúbicos reemplazados por yeso y calcita, así como cristales dispuestos a modo de tolva, lo que recuerda la precipitación de cristales de sal llamados *hopper cristal* en salmueras (Robertson 1991).

En el segmento II continúa la alternancia de los dos elementos litológicos, y entre los *mudstone* es posible reconocer algunas características que permiten inferir ambientes costeros a supramareales:

a) Yesos con dos presentaciones: nodulares resedimentados que conforman láminas muy delgadas, o yeso en láminas que alternan con láminas de materia orgánica (véase Noffke et al. 1996 y Warren 2006).

b) Lentes y láminas de calcita fibrosa que indican exposición de tapices desecados de algas (Horodysky, Bloeser y Vonder Haar 1977), luego reemplazados por calcita fibrosa (Forero y Sarmiento 1984). Al desecarse, los cuerpos microbiales forman pequeños montículos que, al ser cortados, van a producir una forma plano-convexa (lentes).

c) Estructuras centimétricas a modo de cúpulas generadas por el ascenso de burbujas de gases producidos en los tapices microbiales (Bose y Chafetz 2009).

La asociación de las características enunciadas sugiere, para las rocas de los segmentos I y II, medios de depósito supramareales a intermareales-submareales (**fig. 95**).

En los segmentos III y V persisten los *mudstone* (elemento blando) con las siguientes características: **a)** tapices microbiales con materia orgánica; **b)** presencia de elementos reproductores de algas?, y **c)** quistes dinoflagelados calcáreos (Reháková 2000).

La presencia de los minerales del grupo de las arcillas y su fino hábito micáceo sugiere acción eólica que favoreció su adherencia a los tapices microbiales como una superficie abiótica (Konhauser 1998).

Las calizas *mudstone* (elemento duro) son similares a las calizas *mudstone* de los segmentos inferiores, tanto a nivel macroscópico como microscópico. Además, se observan rosetas de anhidrita calcificadas que se producen en depósitos de ambientes supramareales (Flügel 2010).

En el segmento IV, el intervalo I3, destaca porque en su parte inferior presenta laminación plano paralela, las rocas están recrystalizadas, hay presencia de ostrácodos, quistes de dinoflagelados calcáreos y órganos reproductoras de algas, características que sugieren ambientes intermareales a supramareales. En la parte superior la bioturbación se da por raicillas que destruyen la laminación, lo que sugiere ambientes cercanos a la exposición subaérea (Kristensen y Rabenhorst 2015).

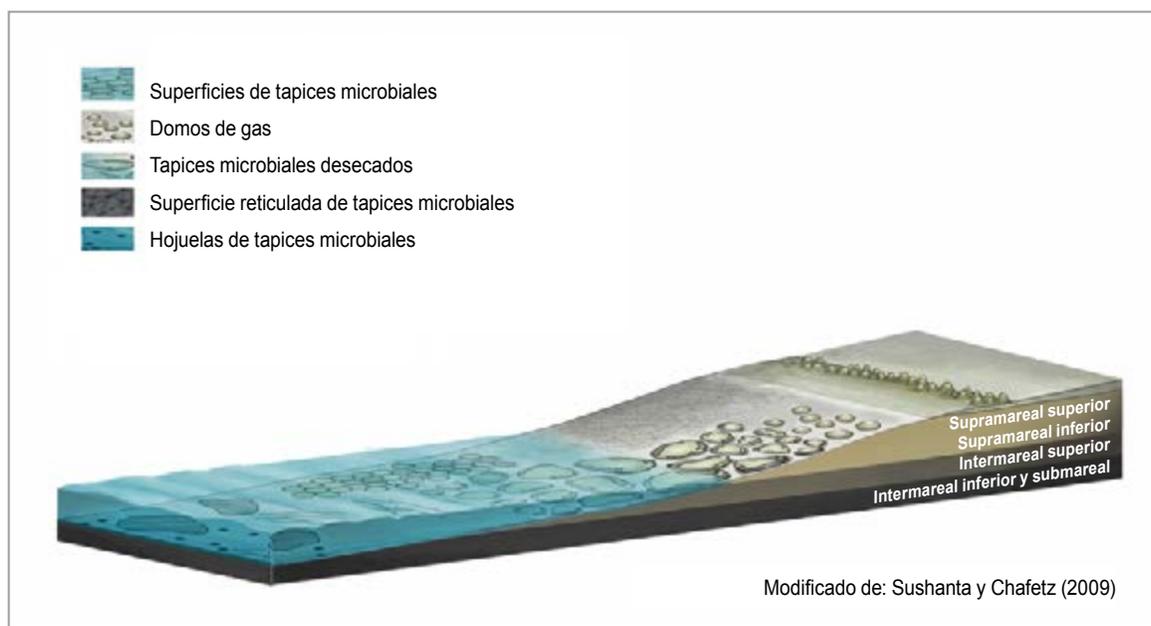


Figura 95. Diagrama esquemático que ilustra el medio de depósito de la Formación La Paja. Los *mudstone* calcáreos con materia orgánica (*bindstone* con materia orgánica) se formarían en la región intermareal superior; la recrystalización de estos para formar calizas *mudstone* (*bindstone* recrystalizados) se haría en las regiones intermareal superior a supramareal inferior. La presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa que corresponden a cortes verticales de tapices microbiales desecados (*mat-crack polygon*) y las superficies de domos de gases (*sieve-like surface*) tendrían su desarrollo en las regiones ubicadas desde intermareal superior a supramareal inferior.

En los *mudstone* presentes en la totalidad de la Formación La Paja destaca la presencia de materia orgánica y de hidrocarburos que rellenan espacios intersticiales.

En relación con la materia orgánica para un intervalo Aptiano inferior, Gaona, Florentin y Etayo-Serna (2013) en la región de Curití, con base en isótopos estables de C y O, reportan contenidos altos de materia orgánica asociados al nivel de anoxia denominado *OAE-1a*.

La presencia constante de materia orgánica en las rocas de esta formación y la asociación de esta con los tapices microbiales sugieren que la Formación La Paja es una potencial roca generadora de hidrocarburos.

Sección estratigráfica detallada de la Formación La Paja. Sección tipo (quebrada La Paja)

En orden ascendente.

| | |
|------------------|-----------------------|
| Espesor (m)..... | Espesor acumulado (m) |
|------------------|-----------------------|

Formación Rosa Blanca

Capas cuspidales

Wackestone calcáreo de bivalvos con tamaños de 4-6 cm, grises (N7-N8), en capa muy gruesa plana paralela (**fig. 96**).

| | |
|-------|-------------|
| 1,2 m | 1,2 m |
|-------|-------------|

Packstone calcáreo de bivalvos con tamaños de 1-2 cm, de color gris (N4), en capas muy gruesas, plana paralela (**fig. 96**).

| | |
|-------|-------------|
| 1,2 m | 2,4 m |
|-------|-------------|

Wackestone calcáreo de bivalvos con tamaños de 1-2 cm, de color gris (N7-N8), en capa muy gruesa, plana paralela (**fig. 96**).

| | |
|-------|-----------|
| 1,6 m | 4 m |
|-------|-----------|

Formación La Paja. Sección tipo

Véase el anexo 2 (columna estratigráfica)

Segmento estratigráfico I (0-73 m)

Tramo cubierto 1. Incluye las capas basales de la Formación La Paja.

| | |
|-----|-----------|
| 3 m | 3 m |
|-----|-----------|

Siguen calizas *mudstone* grises oscuras (N3), en capas desde gruesas hasta medianas, planas paralelas; a veces sus bases tienen ondulaciones. Estas rocas generan resalte en el perfil topográfico; se intercalan con *mudstone* calcáreos grises oscuros (N3), en capas medianas que dibujan entradas en el perfil topográfico (**fig. 97**).

| | |
|-------|-------------|
| 2,4 m | 5,4 m |
|-------|-------------|



Figura 96. A) Capas cuspidales de la Formación Rosa Blanca. *Packstone* y *wackestone* de bivalvos con textura de guijo. Afloramiento ubicado en la orilla sur del río Sogamoso, a 156 metros al este de la desembocadura de la quebrada La Paja (Δ116). **B)** El bivalvo corresponde a *Ceratostreon boussingaultii* (ORBIGNY, 1842 *sensu* Dietrich 1938).



Figura 97. Primer afloramiento de la Formación La Paja en la sección tipo. Alternancias de calizas *mudstone* con capas de formas planas paralelas, separadas por *mudstone* calcáreos con materia orgánica (metro 9-11).

Tramo cubierto 2

3,5 m **8,9 m**
 Sigue caliza *mudstone* gris oscura (N3), en capa gruesa con forma plana paralela.

40 cm **9,3 m**

Mudstone calcáreo gris oscuro (N3), con laminación plana paralela, en capa delgada con forma plana paralela.

10 cm **9,4 m**

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), con laminación plana paralela, en capa gruesa con su base ondulosa. En el microscopio (**dma 5196**) se ve que está constituida por fragmentos de textura fina de microbialitas. (**fig. 18**).

60 cm **10 m**

Mudstone calcáreo gris oscuro (N3), con laminación plana paralela, en capa delgada con forma plana paralela.

10 cm **10,1 m**

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), en capa gruesa con forma plana paralela.

40 cm **10,5 m**

Mudstone calcáreo gris oscuro (N3), con laminación plano paralela, con concreciones calcáreas elipsoidales e irregulares y ϕ máximo de 30 cm, en el que se encontraron amonitas en volumen (**dma 5199**).

70 cm **11,2 m**

Tramo Cubierto 3

39 m **50,2 m**

Siguen *mudstone* calcáreos con materia orgánica, con laminación plana paralela, de color gris oscuro (N3). Se observan fragmentos de material vegetal y hay yeso secundario superficial (**fig. 97**). En el microscopio (**dma 5020**) se identifica como *bindstone* con materia orgánica (microbialitas), con peloides de algas *Dasycladaceas* (**fig. 21**).

40 cm **50,6 m**

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), compacta, en capa gruesa, con su base plano paralela y su techo con engrosamientos y adelgazamientos, a modo de montículos unidos (**figs. 98 y 99**). En el techo aparecen fracturas rellenas de calcita dispuestas en echelon con dirección E-W. En el microscopio (**dma 5021**), se identifica como *bindstone* con recristalización (microbialita recristalizada) (**fig. 22**).

1 m **51,6 m**

Mudstone calcáreo gris oscuro (N3), con materia orgánica y laminación plano paralela.

10 cm **51,7 m**

Caliza *mudstone* gris (N3), en capa que muestra en su base y techo adelgazamientos y engrosamientos, y define una capa



Figura 98. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica localizado por debajo de la línea amarilla discontinua; por encima de la misma se presenta una caliza *mudstone* en la que el techo tiene engrosamiento y adelgazamiento, lo que define una capa tipo montículo (metro 51-52).



Figura 99. Aspecto general de las formas que presentan las capas de calizas *mudstone*. La 1 y la 2 muestran engrosamiento y adelgazamiento (montículos), y la 3 es una capa con forma plano-paralela (metro 51-53, $\Delta 98$).

con forma de nódulos unidos (montículos), con las siguientes dimensiones: largo: 2 m, ancho: 70 cm, y grosor: 2 m.

70 cm **52,4 m**

Caliza *mudstone* maciza, gris oscura (N3), en capa gruesa, con forma plana paralela.

35 cm **52,75 m**

Mudstone calcáreo gris oscuro (N3), con materia orgánica y laminación plano paralela. Hay presencia de bivalvos, amonitas y restos de peces (dientes de tiburón).

1,2 m **53,95 m**

Tramo cubierto 4

19 m **73 m**

Nota: en las figuras, la flecha indica la posición de la muestra con sección delgada.

Segmento estratigráfico II (73-116 m)

Intervalo estratigráfico A (73-80 m)

Mudstone calcáreo con materia orgánica, con laminación plana paralela, color gris oscuro (N3-N4), en capa mediana,

de forma plana paralela, con concreciones calcáreas elipsoidales, redondeadas e irregulares, con ϕ máximo de 20 cm.

40 cm 73,4 m

Caliza *mudstone* gris en paquete de 40 cm que genera resalte en el perfil topográfico (fig. 100), integrada por capas medianas y delgadas, planas paralelas, con laminación plana paralela. Hay amonitas y bivalvos como impresiones sobre las superficies de estratificación (S_0). En el microscopio (dma 5023), se identifica como un *bindstone* (microbialita) con recristalización en un grado bajo, en donde se preserva la laminación original. Alternan conjuntos de láminas claras y oscuras; además, hay peloides e intraclastos con restos de algas *Dasycladaceas* (fig. 26).

50 cm 73,9 m

Mudstone calcáreo con materia orgánica, de color gris, con laminación plana paralela (figs. 100 y 101); se observan

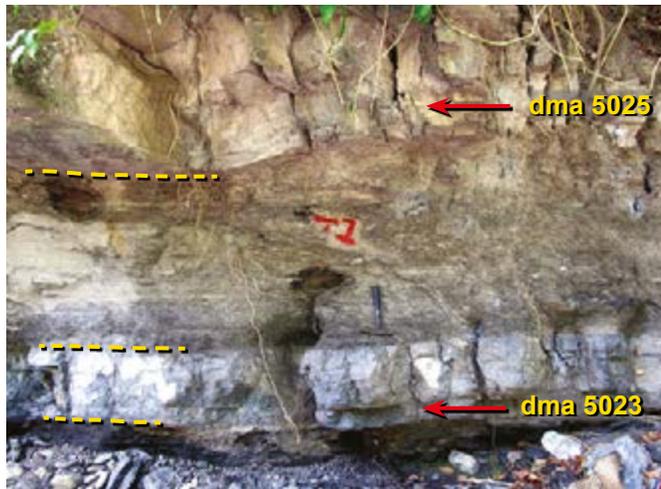


Figura 100. Intercalaciones de calizas *mudstone* en capas gruesas que generan resalte en el perfil topográfico, con *mudstone* calcáreos con materia orgánica en un intervalo de hasta 1.20 m. Se observan espacios dejados por las concreciones calcáreas (metro 73-77).

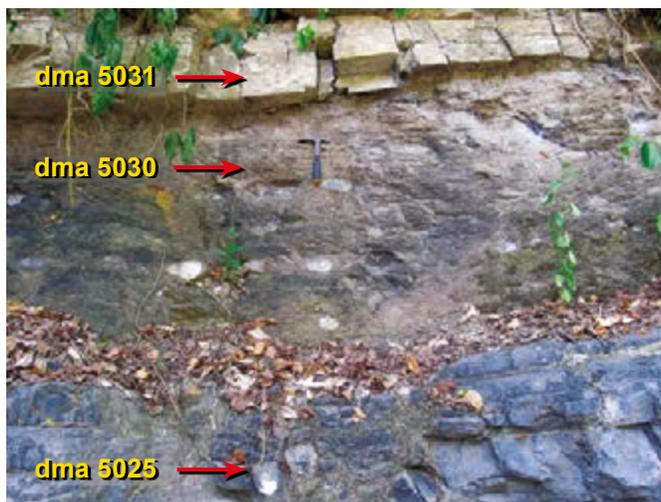


Figura 101. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica entre calizas *mudstone*. Nótese en la capa inferior la superficie superior con adelgazamientos y engrosamientos que generan montículos (metro 76-78).

concreciones calcáreas elipsoidales e irregulares, con ϕ máximo entre 20 cm y 25 cm, y suelen contener amonitas. Hay presencia de lentes de calcita fibrosa.

1,20 m 75,1 m

Caliza en capa gruesa; muestra ensanchamiento y adelgazamiento y adquiere un aspecto tipo montículo (fig. 100); tiene laminación muy fina, ondulosa, en ocasiones dentellada. Esta capa varía lateralmente a un *mudstone* calcáreo con materia orgánica (fig. 27). Hay presencia de concreciones calcáreas con ϕ máximo entre 20 cm y 25 cm. En el microscopio (dma 5025) es un *bindstone* recristalizado (microbialita recristalizada) (fig. 28) con grado de recristalización medio.

90 cm 76 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica, de tono gris oscuro (N3), con laminación plana paralela. Son ricos en concreciones calcáreas de formas elipsoidales e irregulares (figs. 101 y 102), con ϕ máximo de 20-25 cm; contienen amonitas y bivalvos en volumen, en ocasiones piritizados. Por la variación litológica que tiene la capa infrayacente, de caliza *mudstone* a un *mudstone* calcáreo con materia orgánica, se conforma lateralmente un paquete que alcanza un espesor de 3 m. En el microscopio (dma 5030) se identifica como un *bindstone* con materia orgánica (microbialita) (fig. 23); se observan



Figura 102. (A) *Mudstone* calcáreos con materia orgánica en alternancias con calizas *mudstone* en capas delgadas a medianas (metro 77-82). (B) Detalle donde destacan concreciones calcáreas elipsoidales y subsféricas del techo del intervalo estratigráfico A (metro 78).

láminas irregulares de restos de algas *Dasycladaceas* y cristales de yeso que reemplazan la halita.

1,1 m 77,1 m

Caliza *wackestone* gris oscura (N3), en una capa media con adelgazamiento y engrosamiento (fig. 101), que adquiere forma de montículo. En el microscopio (dma 5031) se identifica como *bindstone* recristalizado —microbialita— (fig. 29) con grado de recristalización medio y lentes de restos de algas *Dasycladaceas*.

40 cm 77,5 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica, laminados, tono gris oscuro (N5), compactos. Es notoria la presencia de concreciones calcáreas ricas en amonitas, con ϕ máximo desde 10 cm hasta 30 cm; tienen formas elipsoidales, subesféricas e irregulares (fig. 102). Hay presencia de lentes de calcita fibrosa.

3 m 80,5 m

Intervalo estratigráfico B (80-86 m)

Mudstone arcilloso calcáreo con materia orgánica, en paquetes de hasta 60 cm, con laminación plana paralela y de colores grises oscuros (N5). Alternan con esporádicas calizas *mudstone* gris oscuro (N5), en capas delgadas con formas plano paralelas (fig. 103). La presencia de concreciones cal-



Figura 103. (A) *Mudstone* calcáreos grises con materia orgánica. (B) Detalle de la laminación plana-paralela resaltada por tonos gris oscuro (N3) y gris claro (N5) (metro 83).

cáreas elipsoidales es menor, con ϕ máximo entre 10 cm y 15 cm. En ocasiones, en el núcleo de ellas hay restos de troncos de madera. Hay presencia de lentes de calcita fibrosa.

4,5 m 85 m

Tramo cubierto 5

1 m 86 m

Intervalo estratigráfico C (86-91 m)

Mudstone calcáreos arcillosos con materia orgánica, grises oscuros (N3), con laminación plana paralela; destaca la presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa, paralelas a la estratificación, de hasta 3 cm de grosor y con longitudes entre 3 cm y 6 cm (fig. 104).

1,2 m 87,2 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), con a) lentes y láminas de calcita fibrosa paralelas a la estratificación, y b) concentraciones de nódulos de yesos alineados que conforman una franja de 2 cm de espesor (fig. 104).

30 cm 87,5 m

Mudstone calcáreos arcillosos con materia orgánica, grises oscuros (N3), con lentes y láminas de calcita fibrosa (fig. 104).

40 cm 87,9 m



Figura 104. *Mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica separados por caliza *mudstone* en capa con adelgazamiento y engrosamiento, que dibujan montículos. Hay presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa (señaladas por flechas amarillas superiores) y una franja de yesos nodulares señalada por flechas amarillas inferiores (antigua confluencia del camino que partía del puente El Tablazo hacia la quebrada La Paja, hoy en día inundado) (metro 87-89, Δ85).

Caliza *mudstone* en capa que muestra adelgazamientos y engrosamientos, que producen nódulos unidos a modo de montículos (fig. 105), cuyas dimensiones mayores observadas son estas: largo, 5 m; profundidad, 2,7 m; grosor, 1 m. Está compuesta por alternancias de dos conjuntos: (I) conjuntos de láminas medianas de aspecto homogéneo, de color gris claro (N6), y (II) conjuntos de láminas medianas conformadas por láminas muy delgadas, ligeramente onduladas, de colores gris muy claro (N8), gris rosado naranja (5YR 7/2) y gris oscuro (N3) (fig. 105). En el microscopio, el conjunto de láminas homogéneas (I) (dma 4889) se identifica como



Figura 105. A) Caliza *mudstone* laminada con forma de montículo (metro 88-90). **B)** Detalle de la figura A; nótese el conjunto de láminas homogéneas ligeramente onduladas de color gris claro (N8) y los conjuntos de lámina de colores grises oscuros (N4) y grises rosado naranja (5YR 7/2).

bindstone recristalizado, y en el conjunto de láminas de varios colores (II) (**dma 4990**) se reconocen *bindstone* con materia orgánica con texturas originales (tonos oscuros) y *bindstone* recristalizados (tonos grises claros) (**fig. 37**).

1 m 88,9 m

Mudstone calcáreos arcillosos con materia orgánica, grises oscuros (N3), laminados (**fig. 106**). Destaca la presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa (**fig. 107**); estas formas se han interpretado como tapices microbiales desecados. En vista de planta resaltan cuerpos discoidales a modo de cúpula (domos de gases), acompañados por agregados de cristales de yeso secundarios superficiales que dibujan círculos o rosetas. Las concreciones calcáreas tienen formas elipsoidales y de trompo, con dimensiones de ϕ máximo de 12, 20 y 30 cm, que se presentan hacia la parte superior de esta capa. Con la lupa se observan foraminíferos planctónicos. En el microscopio se identifican como *bindstone* con materia orgánica y arcillas (**dma 4993**) (**figs. 34 y 35**).

2,2 m 91,1 m



Figura 106. *Mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica (metro 90-93), cuyo espesor corresponde a la altura del geólogo.



Figura 107. A) *Mudstone* calcáreos arcillosos con lentes y láminas de calcita fibrosa (tapices microbiales desecados). **B)** *Mudstone* calcáreos con materia orgánica y lentes de calcita fibrosa rodeando la concreción (metro 90).

Intervalo estratigráfico D (91-92 m)

Calizas *mudstone* grises oscuras (N4), en capas delgadas y medianas, con formas que van desde planas paralelas a suavemente onduladas (**fig. 108**), intercaladas con capas delgadas de *mudstone* calcáreos arcillosos. Forman un paquete que sobresale en el cauce de la quebrada. Son frecuentes las concreciones calcáreas elipsoidales, con diámetro de ϕ mayor, entre 10 y 30 cm (**fig. 109**), y en ellas son comunes las amonitas en volumen. En el microscopio (**dma 4996**) se identifican como *bindstone* con materia orgánica (microbialita), con recristalización incipiente y abundante presencia de foraminíferos planctónicos (**fig. 40**).

1 m 92,1 m

En el metro 92, y restringida a esta parte de la secuencia estratigráfica, la sucesión aparece afectada por una pequeña falla inversa con desplazamiento de 2 m en el eje de una estructura anticlinal.



Figura 108. (A) Intervalo estratigráfico D. Son calizas *mudstone* en capas delgadas separadas por láminas de *mudstone* calcáreos con materia orgánica (metro 90-92). (B) Con mayor detalle se observan las calizas *mudstone* en capas delgadas alternadas con *mudstone* calcáreos con materia orgánica en láminas.



Figura 109. Concreciones calcáreas elipsoidales con ϕ de 30 cm (metro 91-92).

Intervalo estratigráfico E (92-116 m)

Conjunto E1 (92-99 m)

Mudstone calcáreos con materia orgánica, grises oscuros (N3-N5), con laminación plano paralela y presencia abundante de cristales de yeso secundarios superficiales que forman rosetas. Alternan con capas muy delgadas de calizas *mudstone* grises oscuras (N3). Las concreciones calcáreas son elipsoidales con diámetro ϕ de 12 cm.

1,50 m 93,5 m

Tramo cubierto 6

2,5 m 96 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica, grises oscuros (N3, N5) (**fig. 110**). Hay presencia de lentes de caliza fibrosa; además, hacia el tope abundan cristales de yeso secundarios superficiales en forma de rosetas. Concreciones calcáreas de formas elipsoidales con ϕ máximo entre 15 cm y 30 cm.

2,8 m 98,8 m



Figura 110. *Mudstone* calcáreos con materia orgánica del Conjunto E (metro 97-100, $\Delta 81-\Delta 79$).

Conjunto E2 (99-102 m)

Caliza *mudstone* que sobresale en el afloramiento por formar saliente. Es una capa gruesa con forma plano paralela, compuesta por un conjunto de láminas gruesas de caliza *mudstone* gris clara (N6) y *mudstone* calcáreo laminado con materia orgánica, gris oscuro (N2); estas estructuras se interpretan como biogénicas de tipo tapices microbiales.

60 cm **99,4 m**

Mudstone calcáreos con materia orgánica grises oscuros (N3) (**dma 5005**). En el microscopio se trata de *bindstone* con materia orgánica (**fig. 42**). En afloramiento hay presencia de **a)** lentes de calcita fibrosa; **b)** laminación plana paralela muy fina de colores grises (N3-N5), amarillos pálidos 10YR 8/6) y verdosos (5GY 7/2) (**dma 5006**) (**fig. 111**); y **c)** cristales de yeso superficiales de color blanco (secundario), asociados a formas de cúpulas (domos de gases) (**fig. 112**). En el microscopio (**dma 5006**), las láminas de colores grises son de materia orgánica asociada a pirita, mientras que las láminas pardas y amarillentas están constituidas por cristales de yeso que crecen de modo perpendicular a S_0 . (**fig. 45**).

1,2 m **100,6 m**



Figura 111. Conjunto E2. Caliza *mudstone* en capa mediana hacia la parte superior. Infrayaciéndola se observa *mudstone* calcáreo con materia orgánica. Obsérvense en la parte superior láminas de colores grises, amarillos pardos y verdes (metro 99-101, Δ81-Δ79).



Figura 112. Cristales de yeso que recubren cuerpos circulares. Son cúpulas producidas por ascenso de burbujas de gas (metro 100).

Caliza *mudstone* gris clara (N6) en una capa delgada con forma plana paralela (**fig. 113**).

20 cm **100,8 m**

Mudstone calcáreo gris oscuro con láminas plano paralelas y con lentes de calcita fibrosa.

20 cm **101 m**

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), en una capa delgada de forma arrosariada.

15 cm **101,15 m**

Mudstone calcáreo arcilloso, laminado, gris oscuro (N3) (**fig. 113**). Hay presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa, además de agregados de cristales de yeso secundarios a modo de rosetas, de color blanco, superficiales.

65 cm **101,70 m**

Caliza *mudstone* que sobresale en el afloramiento por formar un resalte en el perfil topográfico: es una capa gruesa con adelgazamientos y engrosamiento, compuesta por conjuntos de láminas ligeramente onduladas, en ocasiones dentelladas, de caliza *mudstone* laminadas de color gris oscuro (N4) y calizas *mudstone* homogéneas de color gris claro (N7). Estas estructuras se interpretan como biogénicas de tipo tapices microbiales (**fig. 113**). Hay presencia de concreciones calcáreas ricas en amonitas, alineadas con la inclinación de la estratificación.

40 cm **102,1 m**



Figura 113. *Mudstone* calcáreos con materia orgánica, grises, laminados, con presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa (metro 100-102); alternan con capas delgadas de caliza *mudstone* de forma arrosariada.

Conjunto E3 (102-116 m)

Mudstone calcáreos con materia orgánica, grises oscuro (N5) (**fig. 114**), con láminas y lentes de calcita fibrosa (**fig. 115**). Se intercalan con calizas *mudstone* en esporádicas capas delgadas que en ocasiones se adelgazan y adquieren un aspecto arrosariado. Las concreciones calcáreas son elipsoi-



Figura 114. Conjunto E. Tanto la parte inferior como la superior están compuestas por *mudstone* calcáreos con materia orgánica y presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa (señaladas por flechas amarillas); la capa que da resalte en la parte inferior de la fotografía es una caliza *mudstone* con laminación plana-paralela, que destaca por los tonos gris oscuro (N4) y gris claro (N7), similares a capas conformadas por tapices microbiales (metro 101-104 m).



Figura 115. *Mudstone* calcáreos grises oscuros con lentes de calcita fibrosa (metro 110).

dales con ϕ máximo de 30 cm, alineadas, paralelas a S_0 ; al partirlas despiden fuerte olor a hidrocarburos.

6,7 m 108,8 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica, grises oscuros (N3), con laminación plana paralela (fig. 116). Hay presencia de lentes y láminas de calcita fibrosa, así como agregados de cristales de yeso secundarios superficiales, de color blanco, a modo de coronas (rosetas). Las concreciones calcáreas son esferoidales, discoidales o irregulares, con ϕ entre 15 cm y 30 cm (figs. 116 y 117). Las amonitas son abundantes en las concreciones calcáreas y en la roca. En el microscopio (dma 4965) se identifican como *bindstone* con materia orgánica. Hay peloides de micrita e hidrocarburos relleno de espacios intersticiales (fig. 51).

3,6 m 112,4 m

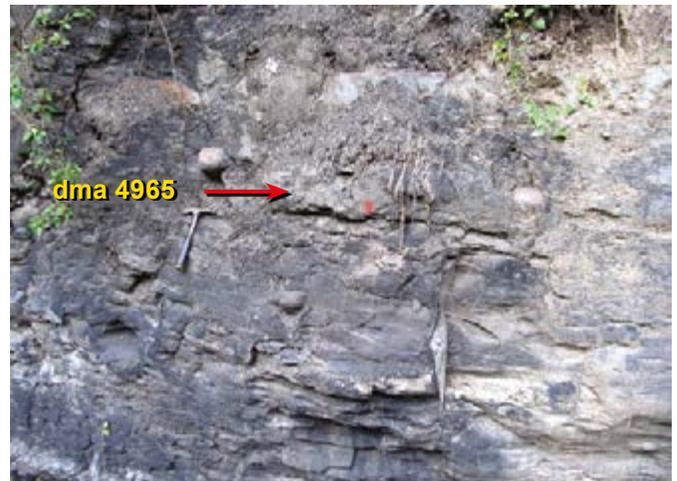


Figura 116. *Mudstone* calcáreos con materia orgánica, grises oscuros (N2), con presencia de concreciones calcáreas elipsoidales (metro 112-114).



Figura 117. *Mudstone* calcáreo con materia orgánica y concreciones calcáreas elipsoidales (metro 112-113). Obsérvese la caliza *mudstone* con contacto inferior dentellado.

Caliza *mudstone* gris (N4) en capa mediana; el techo de la capa es plano paralelo y la base tiene contorno dentellado (fig. 117). Se observan restos de materia vegetal, además de concreciones calcáreas irregulares, en ocasiones ricas en amonitas. En el microscopio, (dma 4967) se identifica como un *bindstone* recristalizado con bioclastos (fig. 54). Los fragmentos están dispuestos en varias orientaciones.

25 cm 112,65 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica, con laminación plana paralela (fig. 118). Se observan láminas negras (N1), grises (N3) y blancas (N9); persisten las láminas y lentes de calcita fibrosa, impresiones de amonitas y bivalvos, en ocasiones piritizados. También hay presencia de concreciones calcáreas discoidales con ϕ máximo de 6 cm, que se encuentran alineadas. En el microscopio (dma 4975), los *mudstone* calcáreos se identifican como *bindstone* con materia orgánica, conformados por láminas gruesas y delgadas, con presencia de hidrocarburos y peloides de micrita (fig. 52).

1,20 m 113,85 m

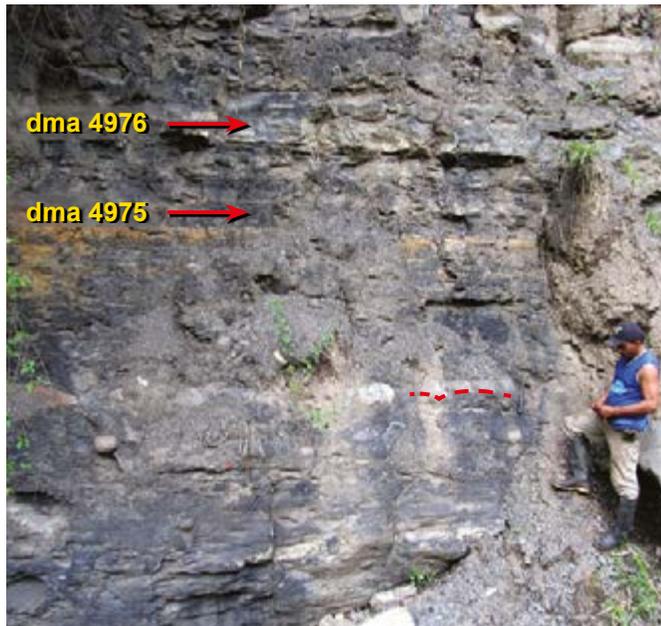


Figura 118. *Mudstone* calcáreos con materia orgánica en intervalos de hasta 1.40 m. Alternan con calizas *mudstone* que resaltan en el perfil topográfico y en ocasiones tienen contacto inferior dentellado (línea roja punteada) (metro 112-114).

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), en capa delgada, plana paralela, que por sectores se adelgaza y engrosa y presenta su contacto superior dentellado. Hay concreciones calcáreas irregulares y esferoidales con ϕ entre 9 cm y 30 cm (fig. 119). En el microscopio (dma 4976), es un *bindstone* con recristalización, de tipo bajo, que preserva la laminación (fig. 55).

30 cm 114,15 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica, grises oscuros (N3), con láminas y lentes de calcita fibrosa; tiene concreciones calcáreas discoidales con ϕ máximo entre 20 cm y 30 cm.

1,7 m 115,9 m



Figura 119. *Mudstone* calcáreos grises oscuros con laminación plano-paralela. Alternan con capas delgadas a medianas de caliza *mudstone* gris clara (metro 113-117).

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), con adelgazamientos y engrosamientos hasta producir una capa arrosariada. En la superficie superior hay concreciones calcáreas con formas entre irregulares y esferoidales (fig. 120).

30 cm 116,2 m



Figura 120. Concreciones calcáreas entre irregulares y esferoidales (metro 116).

Segmento estratigráfico III (116-193 m)

Intervalo estratigráfico F (116-119 m)

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica, laminación plana paralela, de color gris oscuro (N3) (fig. 121).

1,2 m 117,4 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), en capa gruesa, con forma plano paralela, que lateralmente se engrosa y adelgaza hasta adquirir forma de montículos. En el microscopio (dma 4979), se identifica como *bindstone* (microbialita) (fig. 56).

40 cm 117,8 m

Mudstone arcillosos calcáreos de colores grises (N3), con laminación plano paralela, con concreciones calcáreas elongadas cuyo ϕ máximo varía entre 30 cm y 40 cm (fig. 121). En la parte inferior también se presentan concreciones calcáreas esféricas, con formas de peonza e irregulares, con ϕ máximo de 70 cm.

13 m 119,1 m



Figura 121. *Mudstone* arcillosos calcáreos con concreciones calcáreas de gran tamaño. Longitud máxima: 70 cm (metro 116-118 Δ 74- Δ 75).

Intervalo estratigráfico G (119-175 m)

Incluye el *tramo cubierto* 7

56 m 175 m

Intervalo estratigráfico H (175-193 m)

Siguen *Mudstone* arcillosos con materia orgánica, grises (N4), con laminación plana paralela; contienen amonitas y bivalvos enteros o fragmentados, acumulados paralelos a S_0 ; hay cristales de yeso secundarios superficiales. En el microscopio se identifican como *bindstone* con arcilla y materia orgánica (microbialita) (dma 4907), con textura laminada y lenticular (fig. 58).

6 m 181 m

Mudstone arcillosos con materia orgánica, laminados, grises oscuros (N4); presentan yeso en cristales secundarios superficiales y concreciones calcáreas elipsoidales con ϕ mayor de 30 cm.

3 m 184 m

Mudstone arcillosos con materia orgánica grises oscuros (N4), en capas medianas y delgadas, finamente laminadas, deleznales, con presencia de yeso en cristales secundarios superficiales. Las rocas muestran deformación: bloques romboidales, cuya diagonal no es superior a 10 cm.

1,3 cm 185,3 m

Mudstone arcillosos con materia orgánica, calcáreos, grises oscuros (N4-N5), con abundantes amonitas, bivalvos y gasterópodos, en ocasiones piritizados. Se intercalan esporádicamente con calizas *mudstone* que se presentan en capas delgadas de aspecto arrosariado.

3 m 188,3 m

Mudstone arcillosos. Se observa deformación con repliegues y arreglo en bloques romboidales.

1 m 189,3 m

Mudstone arcillosos con materia orgánica grises oscuros (N3), levemente calcáreos, con laminación plana paralela, ricos en amonitas y bivalvos. Las concreciones calcáreas tienen ϕ máximo de 15 cm. También hay presencia de yeso en cristales secundarios superficiales. En el microscopio (dma 4915), es un *bindstone* con arcilla y materia orgánica (microbialita) (fig. 59).

3,7 m 193 m

Segmento estratigráfico IV (193-216 m)

Conjunto I1 (193-196 m)

Caliza *mudstone* de tonos gris oscuro (N3) y gris claro (N5), con laminación plana paralela; por meteorización adquiere tonos blancos (N8) y amarillos (10YR 8/2). Las láminas claras son muy finas, mientras que las oscuras son milimétricas.

30 cm 193,3 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3). En capa tiene adelgazamientos y engrosamientos y adquiere aspecto monticular (fig. 122). En los montículos, las láminas son planas, paralelas, delgadas y se destacan por su color blanco amarillento (10YR 8/2) y gris oscuro (N3). También se observan concreciones piritosas con dimensiones en ϕ máximo de hasta 35 cm. En el microscopio (dma 4918), es un *bindstone* laminado con recristalización incipiente (microbialita) (fig. 61).

30-60 cm 193,9 m



Figura 122. Conjunto I1. Alternancia de calizas *mudstone* laminadas en la parte baja del conjunto I1, mientras que en la margen derecha, aguas arriba, afloran las rocas de los conjuntos I2, I3 e I4 (metro 193-210. Δ 55- Δ 56).

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), con laminación plana paralela resaltada por colores blancos (N8), amarillos (10YR 8/2) y grises (N3). Hay presencia de concreciones calcáreas, subesferoidales, con ϕ entre 2 cm y 10 cm. En el microscopio (**dma 4919**), se observa menor recristalización que en la roca que la infrayace. Se reconocen intervalos laminares; los claros se identifican como microbialitas y las láminas oscuras se identifican como tapices microbiales con arcilla adherida (**fig. 61**).

1,8 m 195,7 m

Conjunto I2 (196-201 m)

Tramo cubierto 8

60 cm 196,3 m

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica grises oscuros (N3), con laminación plana paralela, que se parten en esquirlas pequeñas. Concreciones calcáreas entre subesféricas y elipsoidales con ϕ máximo de 30 cm (**fig. 123**). En el microscopio (**dma 4927**) se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialita) (**fig. 63**). En este conjunto destacan dos calizas *mudstone* en capas delgadas, una de las cuales es lenticular con base dentellada, mientras la segunda presenta límites planos paralelos.

4,7 m 201 m



Figura 123. *Mudstone* arcillosos con fisibilidad fina en contacto con calizas *mudstone* del Conjunto I3, que se les superponen (metro 198-205).

Conjunto I3 (201-207 m)

Caliza *mudstone* en capa gruesa (35 cm), con forma plana paralela y laminación entre muy delgada y gruesa, acentuada por los colores: láminas gris claro-blancas (N8) y láminas grises (N4), que superficialmente presenta tono amarillo-naranja (10YR 6/6, 10YR 8/6). Pasa gradualmente a *mudstone* arcilloso calcáreo (**fig. 124**). En el microscopio las láminas oscuras (**dma 4931**) se identifican como *bindstone* con recristalización incipiente (microbialita), y las láminas de color claro se identifican como *bindstone* recristalizados (**fig. 65**).

60 cm..... 201,6 m

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica, grises oscuros (N2); en el microscopio (**dma 4932**), se identifican como *bindstone* con arcillas (microbialita) (**fig. 66**).

30 cm 201,9 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), con laminación muy fina, plana paralela. Superficialmente adquiere tono amarillo-naranja (10YR 6/6, 10YR 8/6).

60 cm 202,5 m

Mudstone arcilloso calcáreo con materia orgánica, gris oscuro (N2), con láminas muy finas planas paralelas, que superficialmente toman color amarillo-naranja (10YR 6/6, 10YR 8/6).

60 cm 203,1 m

Caliza *mudstone* en capa gruesa con forma plana paralela, con laminación delgada a gruesa, acentuada por los colores: láminas blancas (N8) y láminas grises (N4). Superficialmente toman tono amarillo-naranja (10YR 6/6, 10YR 8/6) (**fig. 124**).

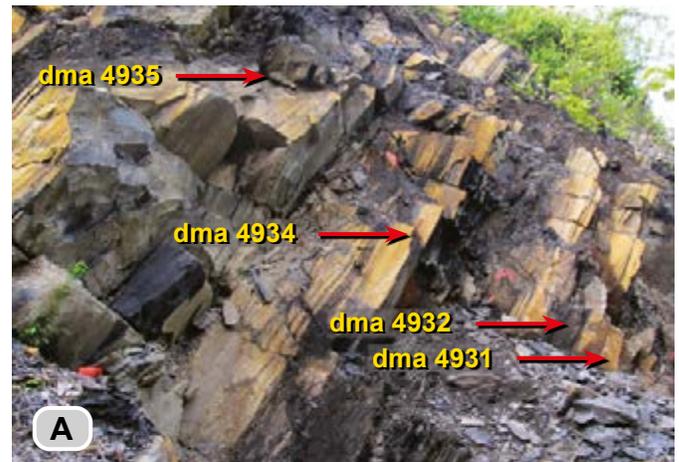


Figura 124. A) Calizas *mudstone* en capas gruesas y medianas separadas por *mudstone* calcáreos arcillosos con materia orgánica en capas medianas. Hacia la parte superior del afloramiento se observa una caliza *mudstone* bioturbada en capa muy gruesa (metro 200-205). **(B)** Detalle del paso de una caliza *mudstone* laminada a un *mudstone* arcilloso calcáreo laminado; la laminación es plano-paralela, está resaltada por tonos gris claro, blanco y gris oscuro; ambas rocas tienen una pátina amarillenta (metro 203).

En el microscopio (**dma 4934**) las láminas claras se identifican como *bindstone* recristalizados (microbialitas recristalizadas), y las láminas oscuras corresponden a *bindstone* con materia orgánica (microbialitas) (**fig. 65**).

90 cm 204, m

Caliza *mudstone* gris oscura (N2), en capa gruesa, con forma plano paralela; se observa bioturbación moderada con moteamiento y relictos de la laminación (**fig. 124**). En el microscopio (**dma 4935**), es un *bindstone* bioturbado con moteamiento indistinto (**fig. 67**).

1,5 m 205,5 m

Mudstone arcilloso calcáreo con materia orgánica, de tono gris oscuro (N2), con láminas muy finas, planas paralelas, que superficialmente tienen color amarillo-naranja (10YR 6/6, 10YR 8/6) y se parten en esquivras finas.

60 cm 206,1 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3). Superficialmente tiene coloración naranja-amarilla (10YR 6/6). Está constituida por tres capas medianas planas paralelas que forman un paquete. Presenta bioturbación entre moderada y alta. Bajo el microscopio (**dma 4936**), es un *bindstone* bioturbado.

90 cm 207 m

Conjunto I4 (207-216 m)

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N2), con láminas muy finas planas paralelas y fina fisibilidad.

1,40 m 208,4 m

Caliza *mudstone* de color gris oscuro (N3), en capa mediana, con forma plana paralela, laminación fina y media, con venillas de calcita que la atraviesan. Bajo el microscopio (**dma 4937**), las láminas claras son *bindstone* con recristalización (microbialita recristalizada) (**fig. 68**), y las láminas oscuras son *bindstone* con materia orgánica y menor recristalización (microbialita).

30 cm 208,7 m

Mudstone arcillosos levemente calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros y laminación plana paralela.

1,3 m 210 m

Tramo cubierto 9

6 m 216 m

Segmento Estratigráfico V (216-288 m)

Intervalo estratigráfico J (216-255 m)

Mudstone arcillosos calcáreos, grises oscuros, con presencia de abundantes impresiones y restos de bivalvos y amonitas, además de hojuelas de moscovita de 1 mm.

20 cm 216,2 m

Caliza *mudstone* de color gris oscuro (N3), en capa mediana, plana paralela, que genera resalte en el perfil topográfico. Hay abundantes amonitas, bivalvos y gasterópodos dispuestos paralelamente a S_0 . Las concreciones calcáreas son irregulares, con ϕ de 10 a 60 cm. Superficialmente tiene coloración gris parduzca (5YR 4/1) (**fig. 125**). Bajo el microscopio, en (**dma 4821**), se observan remanentes de los tapices microbiales con arcilla adherida e interpuestos cristales de calcita neoformados a partir de rosetas de yeso (**fig. 78**).

20 cm 216,4 m



Figura 125. A) Capa mediana de caliza *mudstone* en cuya superficie superior se observan concreciones calcáreas de formas irregulares. **B)** Concreción elipsoidal con amonitas, bivalvos y gasterópodos (metro 216).

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica de color gris oscuro (N4-N3). Presentan concreciones calcáreas discoidales con ϕ de 30 cm. Hay presencia abundante de amonitas como impresiones sobre las superficies S_0 (**fig. 126**). Bajo el microscopio (**dma 4822**), se trata de *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialita). Contiene abundantes fragmentos (hasta 5%) de terrígenos (cuarzo y moscovita) (**fig. 73**).

1,20 m 217,6 m



Figura 126. Intervalo de *mudstone* arcillosos calcáreos con materia orgánica (metros 217 a 225, Δ56).

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica, de tono gris oscuro (N4-N3), moscovíticas (menores de 1 mm) ricas en amonitas (**fig. 126**). Bajo el microscopio (**dma 4823**), se trata como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialita) (**fig. 71**), con texturas lenticular y pulverulenta.

3 m 220,6 m

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica. Se parten en esquistos alargados, ricos en amonitas. Bajo el microscopio (**dma 4828**) se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialita), con texturas lenticular y pulverulentas.

1,5 m 222,1 m

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N3), con laminación plana paralela (**fig. 127**) y presencia de concreciones calcáreas con formas elipsoidales, discoidales y de trompo, con ϕ de 60 a 20 cm, en ocasiones alineadas y están paralelas a la superficie S_0 . Se observa laminación mediana y gruesa, que está determinada por la composición, debido a la mayor o menor presencia de materia orgánica; así, se destacan láminas oscuras y claras. Cristales secundarios superficiales de yeso forman rosetas. En el microscopio (**dma 4829**), se identifican como *bindstone* con arcilla y materia orgánica (microbialita) con texturas pulverulenta y lenticular.

2,10 m 224,2 m



Figura 127. A) *Mudstone* arcillosos con materia orgánica (metros 220 a 225). **B)** Detalle del recuadro amarillo de la figura A, en donde resaltan las concreciones calcáreas elipsoidales. **C)** Detalle de la laminación y de una concreción calcárea con forma de trompo.

Caliza *mudstone* gris oscura (N3-N4). Por meteorización toma colores pardos (5YR 4/1). Forma una capa con superficies planas paralelas, aunque por sectores muestra engrosamientos y adelgazamientos que configuran montículos (fig. 128). Hay presencia abundante de impresiones de amonitas paralelas a S_0 .

60 cm 224,8 m

Mudstone arcilloso calcáreo con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N5), con laminación plano paralela. Hay presencia abundante de amonitas a modo de impresiones. Las concreciones calcáreas son elipsoidales con ϕ de 15 cm. En el microscopio (dma 4833), se trata de *bindstone* con intervalos laminares: a) de tapices con arcilla adherida y textura laminada, y b) de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina (figs. 75 y 76).

1,8 m 226,6 m



Figura 128. A) Capas de caliza *mudstone* (resaltan en el perfil topográfico) separadas por paquetes de *mudstone* arcillosos calcáreos con materia orgánica. Las capas de caliza se adelgazan, engrosan y adquieren aspecto de montículo. La capa superior de caliza *mudstone* cambia de monticular a plana-paralela (metros 224 a 228, $\Delta 53$). **B)** Molde de amonita en la superficie superior de la capa inferior con forma de montículo (metros 224 a 225).

Caliza *mudstone* gris oscura (N3) dispuesta en capa mediana a modo de montículos (fig. 128). Bajo el microscopio (dma 4836), es un *bindstone* con recristalización baja (microbiallyta recristalizada), en el que se reconoce la laminación original. Hay presencia de foraminíferos planctónicos con tamaños entre 100 y 150 μm (figs. 78 y 79).

40 cm 227 m

Mudstone arcillosos con materia orgánica, levemente calcáreos, de color gris oscuro (N4), con laminación delgada plana paralela, parte con forma de lápices y lajas. Hay presencia abundante de amonitas enteras o fragmentadas, y bivalvos sobre las superficies S_0 , que en vista de perfil se observan como lentes dentellados de color blanco (fig. 129). Hay concreciones calcáreas elipsoidales con ϕ de 15 cm. Se presentan cristales de yeso secundario con forma de roseta y pirita en lentes. Bajo el microscopio (dma 4841), se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbiallyta) de textura laminar (fig. 74).

4,5 m 231,5 m



Figura 129. A) *Mudstone* arcillosos con materia orgánica, levemente calcáreos. Los restos de conchas de amonitas en corte se observan como rastros blanquecinos. **B)** Concentración de fragmentos fósiles de diversos tamaños y grupos, paralelos a S_0 (metro 230).

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuro (N2) (**fig. 130**), con amonitas a modo de impresiones y cristales de yesos superficiales en forma de rosetas. Bajo el microscopio (**dma 4843**), se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialita) con texturas laminar y lenticular.



Figura 130. *Mudstone* arcillosos calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros que alternan con una capa delgada, plana-paralela, de caliza *mudstone*, resaltada entre líneas amarillas discontinuas (metros 231 a 234, Δ52-Δ53).

2 m 233,5 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N4), en capa delgada, plano paralela, que resalta en el perfil topográfico (**fig. 130**). Con el microscopio (**dma 4844**), se observan remanentes de los tapices microbiales con arcilla adherida y cristales de calcita neoformados a partir de rosetas de yeso.

10 cm 233,6 m

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica (N3-N5) (**fig. 131**). Presentan restos de bivalvos, gasterópodos y amonitas; en ocasiones, en corte los restos de conchas de amonitas se observan como rastros blanquecinos. Hay presencia de concreciones calcáreas elipsoidales con ϕ de 15 cm y cristales de yeso secundarios en rosetas de 2 a 3 mm.

3,90 m 237,5 m

Mudstone arcillosos con materia orgánica levemente calcáreos, de tonos grises oscuros (N4), con laminación plana paralela (**fig. 131**) y lentes y capas lenticulares de caliza *mudstone*.



Figura 131. *Mudstone* arcillosos calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros, entre los que se intercala una capa delgada de caliza *mudstone* (señalada por la base del martillo) (metros 238 a 240).

Abundante presencia de amonitas como impresiones en las superficies de acumulación. También se observan cristales secundarios superficiales de yeso con forma de rosetas de 1 a 2 mm. Bajo el microscopio, los arcillosos (**dma 4848**), se identifican como *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialita), con textura pulverulenta.

1,5 m 239 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), en capa delgada plano paralela.

8 cm 239,8 m

Mudstone arcillosos calcáreos grises oscuros (N3-N4), levemente calcáreos, con presencia de yesos secundarios superficiales formando rosetas y concreciones elipsoidales con ϕ de 15 a 20 cm. Hay abundante presencia de amonitas como impresiones en las superficies S_0 (**fig. 131**).

2,4 m 242,2 m

Mudstone arcillosos grises oscuros (N2), afectados por dos sistemas de fracturas que producen bloques entre cuadrangulares y romboidales. Hay presencia de material plástico (salbanda) en una banda de 6 cm paralela a la estratificación (**fig. 132**).

1 m 243,2 m



Figura 132. A) Intervalo de *mudstone* arcillosos; las partes inferior y superior no presentan deformación, mientras que en la parte central la deformación se expresa a partir de bloques entre cuadrangulares y romboidales (metros 241 a 243), ampliados en la figura. B) Nótese la franja de salbanda atravesada por el lápiz (metro 242,5).

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), en capa mediana, plano paralela.

30 cm 243,1 m

Mudstone arcillosos grises oscuros (N3), con laminación plana paralela, en que se interponen capas delgadas lenticulares de calizas *mudstone* grises oscuras (N3). Hay presencia de concreciones calcáreas con forma de trompo, con ϕ 40 cm, y cristales superficiales secundarios superficiales de yeso con forma de rosetas de 2 a 3 mm.

1,2 m 244,3 m

Calizas *mudstone* grises oscuras (N3) que conforman un paquete de capas delgadas y medianas, planas paralelas, algunas con adelgazamientos y engrosamientos, separadas por láminas de *mudstone* arcillosos calcáreos con impresiones de amonitas.

90 cm 245,3 m

Mudstone arcillosos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N5), levemente calcáreos (fig. 133). Se observan pirita y cristales superficiales de yeso secundario, que se hacen más abundantes en los 40 cm superiores. Las amonitas y los bivalvos aparecen como impresiones sobre las superficies S_0 .



Figura 133. Aspecto de los *mudstone* arcillosos con materia orgánica (metros 245 a 246).

Bajo el microscopio, la parte inferior del paquete (dma 4856) corresponde a *bindstone* con arcilla y materia orgánica (microbialita). Se observan rellenos de hidrocarburos en espacios irregulares y fragmentos de fósiles. Hacia el techo la roca (dma 4862), presenta menos bioclastos, persisten los hidrocarburos relleno espacios y la materia orgánica en laminillas y motas (fig. 134).

3 m 248,3 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), forma un paquete de capas delgadas planas paralelas continuas (fig. 134). La presencia de impresiones de amonitas es frecuente sobre las superficies de estratificación. Hay concreciones calcáreas esferoidales con ϕ de 10 a 15 cm.

50 cm 248,8 m



Figura 134. Caliza *mudstone* que desarrolla pendiente estructural hacia la quebrada La Paja. En ella se observa gran cantidad de impresiones de amonitas. Suprayaciendo la capa se presenta un paquete de *mudstone* arcillosos con materia orgánica (dma 4867) (metros 249 a 252, $\Delta 50-\Delta 51$).

Mudstone arcillosos grises oscuros (N5), con laminación plana paralela. Se observan abundantes impresiones de amonitas sobre las superficies de acumulación (S_0), que en ocasiones están piritizadas y deformadas en una dirección preferencial. Bajo el microscopio (dma 4867), se interpretan como *bindstone* con arcillas, materia orgánica (microbialita) e hidrocarburos como relleno. Se presentan dos intercalaciones de caliza *mudstone* en capas delgadas con formas plano paralelas.

2,8 m 251,6 m

Mudstone arcillosos calcáreos grises oscuros (N5), con laminación plana paralela y partición en esquiras pequeñas (fig. 135), ricos en impresiones de amonitas sobre las superficies de acumulación S_0 . Se observan concreciones calcáreas elipsoidales e irregulares, en ocasiones alineadas y paralelas a la superficie S_0 , con ϕ de 35 a 15 cm; con menor frecuencia son piritosas. Localmente se observa deformación a pequeña escala: varios sistemas de fracturas que producen bloques conjugados con forma de rombo y replegamientos (metro 252). Bajo el microscopio (dma 4869), se trata de *bindstone* laminados con intervalos de microbialitas e intervalos de microbialitas con arcilla adherida.

3,0 m 254,6 m



Figura 135. *Mudstone* arcillosos grises oscuros del tope del intervalo estratigráfico J, infrayacientes a la caliza *mudstone*, que resalta en el perfil topográfico. Por debajo de la muestra dma 4869 se observa deformación estructural por repliegues (metros 253 a 256).

Caliza *mudstone* gris oscura en capa mediana plana paralela. Bajo el microscopio (**dma 4871**), se identifica como un *bindstone* en estadio I de recristalización, en el que se reconoce la textura original: alternan microbialitas con láminas recristalizadas y láminas no recristalizadas.

40 cm 255 m

Intervalo estratigráfico K (255-270 m)

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N5), con laminación plana paralela. Abundan las impresiones de amonitas y bivalvos sobre las superficies de estratificación. La roca se vuelve más dura por el aumento de la biomineralización en los tapices microbiales. Las concreciones calcáreas son subesferoidales con ϕ de 15 cm. Bajo el microscopio (**dma 4874**), es un *bindstone* con láminas de: microbialitas con materia orgánica y microbialitas con arcilla adherida (**fig. 82**).

4,9 m 259,9 m

A partir del metro 260 se observa un sector deformado (30 cm) donde la roca pierde cohesión, presenta aspecto retorcido e internamente se rompe en pequeños rombos. Este fenómeno ocurre entre dos capas paralelas no deformadas (**fig. 136**).

30 cm 260,2 m



Figura 136. Sector con deformación de 30 cm entre *mudstone* arcillosos con materia orgánica (flecha amarilla) (metros 259 a 262).

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N4), con laminación delgada plana paralela (**figs. 136 y 137**); se observan algunas concreciones calcáreas de formas esferoidales, elipsoidales, discoidales y de trompo, con dimensiones de ϕ de 45 a 15 cm. Hay venas de calcita que cortan la estratificación. Bajo el microscopio (**dma 4877**), son *bindstone* con texturas laminadas. Hay láminas de tapices microbiales biomineralizados por calcita microcristalina y láminas de tapices microbiales con arcilla adherida. (**fig. 83**).

3,30 m 263,5 m

Caliza *packstone* gris oscura (N3), en capa muy delgada con forma plana paralela. Hay concentraciones de bioclastos (**fig. 137A: dma 4883**). Con el microscopio se la interpreta como una biomicrita empaquetada conformada mayormente

por fragmentos de algas y otros elementos no identificados. Hacia el techo se observa decrecimiento en tamaño y en abundancia de los bioclastos (**fig. 85**).

5 cm 263,55 m

Mudstone calcáreos arcillosos grises oscuros (N4), con laminación plana paralela continua.

90 cm 264,45 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), con concentraciones locales de restos de bivalvos centimétricos. La capa se engrosa y adelgaza lateralmente (**fig. 137B**).

30 cm 265,25 m

Mudstone calcáreos arcillosos grises oscuros (N3), con laminación plana paralela (**fig. 137**). Bajo el microscopio (**dma 4886**), son *bindstone* con materia orgánica (microbialita) (**fig. 84**).

30 cm 265,55 m



Figura 137. A) *Mudstone* calcáreos arcillosos con laminación plano-paralela y concreciones calcáreas de formas diversas. La capa de caliza, señalada con flecha, y el número (**dma 4883**) es un *packstone*. La capa superior de caliza (**dma 4884**) es un *mudstone* con concentraciones por sectores de bivalvos (flecha amarilla) (metros 261 a 265). **B)** Detalle de la caliza *mudstone* superior para mostrar la concentración local de bivalvos (inocerámidos) y amonitas (**dma 4884**).

Caliza *mudstone* gris oscura (N4), en capa delgada plana paralela.

8 cm 265,63 m

Mudstone calcáreos arcillosos, grises oscuros (N3), con laminación plano paralela.

60 cm 266,23 m

Mudstone calcáreos grises oscuros (N3), deformados en un sector de 4 m, en donde se observan las siguientes características (fig. 138):



Figura 138. A) *Mudstone* calcáreos deformados por fracturas discontinuas con disposición romboidal, que enmascaran la estratificación (metros 268 a 270). B) Ampliación del recuadro amarillo de la figura A (metro 268).

Fracturas discontinuas que se intersetan en arreglo romboidal.

2 m 268,23 m

Situación similar a 1, pero con replegamientos atravesados por venillas de calcita.

1 m 269,23 m

Presencia de una franja de 10 a 40 cm, brechada, dispuesta paralela y oblicua a S_0 .

1 m 270,23 m

Intervalo estratigráfico L (270-288 m)

Conjunto L1 (270-277 m)

Mudstone arcillosos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N3), con laminación plana paralela y partición en lajas, con impresiones de amonitas (fig. 139A). Bajo el microscopio (dma 4888), se trata de *bindstone* con arcilla y materia orgánica, con textura pulverulenta y lenticular.

3,4 m 273,4 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3) que muestra adelgazamientos (40 cm) y engrosamientos (70 cm), y adquiere una forma arrosariada (fig. 139B). Por meteorización adquiere un tono café pálido amarillento y verdoso (10YR 6/2, 10Y 6/2). Hay impresiones de amonitas sobre la superficie de estratificación. Con el microscopio (dma 4890), se observa una textura porfiróide; son rosetas de yeso calcificadas (fig. 87) se interpretan como producto de recristalización a partir de rosetas de anhidritas (Flügel 2010, lámina 125, figs. 1-2).

60 cm 274 m

Mudstone calcáreos grises oscuros (N3), con laminación plana paralela y partición en lajas (fig. 139B). Con el microscopio



Figura 139. A) *Mudstone* arcillosos laminados (metros 270 a 272). B) Caliza *mudstone* con tono superficial café pálido-verde oliva pálido; la capa se adelgaza y engrosa; resalta en el perfil topográfico. Se presenta entre *mudstone* calcáreos con materia orgánica, laminados, grises, y *mudstone* arcillosos con materia orgánica (metros 273 a 275).

pio (**dma 4892**) se identifican como *bindstone* con materia orgánica (microbialita) (**fig. 86**).
 2,7 m 276,7 m

Conjunto L2 (277-283 m)

Caliza *mudstone* gris oscura (N4), que por meteorización desarrolla pátina de color gris amarillento (5Y 8/1); laminación entre fina y mediana, plano paralela, resaltada por los colores: láminas grises oscuras (N4) y láminas grises claros (N6) (**fig. 140**). Con el microscopio (**dma 4893**), las láminas oscuras se identifican como *bindstone* con materia orgánica, mientras que las láminas claras son *bindstone* recristalizados (**fig. 89**).
 25 cm 276,95 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N4). Dibujan un valle en el perfil topográfico (**fig. 140**).
 15 cm 277,10 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N4). Por meteorización toma color gris amarillento (5Y 8/1). Presenta laminación entre muy delgada y mediana, plano paralela, resaltada por la alternancia de tonos grises oscuros (N4) y claros (N6) (**fig. 140**).
 25 cm 277,35 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N4) (**fig. 140**: vértice superior izquierdo).
 90 cm 278,15 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N4), por meteorización toma color gris amarillento (5Y 8/1). Es competente, tiene laminación entre muy delgada y mediana, plano paralela continua, resaltada por los colores: láminas grises oscuras (N4) y láminas grises claras (N6).
 30 cm 278,45 m

Mudstone calcáreos ricos en materia orgánica, de tonos grises oscuros (N4), menos competente, pobres en amonitas
 20 cm 278,65 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N4). Por meteorización toma un color gris amarillento (5Y 8/1). Es competente. Tiene laminación muy entre delgada y mediana, plano paralela continua, resaltada por los colores: hay láminas de color gris oscuro (N4) y grises claras (N6) (**fig. 140**).
 70 m 279,55 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N4), en capa mediana (**fig. 141**: al nivel del agua).
 30 cm 279,85 m

Caliza *mudstone*. Por meteorización toma color gris amarillento (5Y 8/1). Presenta laminación entre muy delgada y mediana, plano paralela, resaltada por los colores: hay láminas grises oscuras (N4) y grises claras (N6).
 80 cm 280,65 m

Mudstone calcáreos con materia orgánica gris oscura (N4), en capa gruesa que se adelgaza lateralmente (**fig. 88A**), con laminación plano paralela. Bajo el microscopio (**dma 4894**), se identifican como *bindstone* con materia orgánica (microbialita).
 50 cm 281,15 m

Caliza *mudstone* nodular de tonos grises (N4-N2). Banco formado por tres horizontes de concreciones separados por delgadas interposiciones de *mudstone* calcáreos (**fig. 141**). Bajo el microscopio (**dma 4895**), es un *bindstone* bioturbado con vestigios de la laminación (**fig. 90**).
 60 cm 281,75 m

Mudstone arcillosos calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N4), con laminación plano paralela (**figs. 141 y 142A**). Bajo el microscopio (**dma 4896**), se trata de *bindstone* con arcillas y materia orgánica (microbialita) (**fig. 91**).
 1,5 m 283,25 m

Caliza *mudstone* gris oscura (N3), laminada. La laminación de la parte basal es plana paralela, pero a medida que se asciende hacia el techo de la capa, dicha laminación se hace



Figura 140. Calizas *mudstone* de tonos grises oscuros. Por meteorización toman color gris amarillento (5Y 8/1). La estructura interna se manifiesta por la laminación plano-paralela. Alternan con caliza *mudstone* con materia orgánica de color gris oscuro (N4) (metros 277 a 279).



Figura 141. Capas superiores de la Formación La Paja. Conjunto L2, que genera resalte. Se trata de calizas *mudstone* bien laminadas interpuestas por *mudstone* calcáreos con materia orgánica (metros 280 a 283). Aguas arriba afloran *mudstone* arcillosos.

ondulosa, paralela con las láminas recrystalizadas más gruesas (figs. 141 y 142). Bajo el microscopio (dma 4897), se trata de *bindstone* con laminación. Las láminas claras son *bindstone* recrystalizados (microbialita recrystalizada), y las oscuras son *bindstone* con materia orgánica.

60 cm 283,85 m

Conjunto L3 (284-288 m)

Mudstone calcáreos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N4) (fig. 142). En la base de este intervalo se presentan concreciones con restos de amonitas gigantes con ϕ de 60 cm.

80 cm 284,65 m

Tramo cubierto 10

.....hasta encontrar los primeros afloramientos de la Formación Tablazo.

Por la continuidad litológica-cartográfica (Moreno-Sánchez 2019) de la base de la Formación Tablazo y la parte superior de la Formación La Paja, se describen las capas cuspidales de esta en los afloramientos existentes debajo del puente sobre la quebrada La Molinilla (vía Lebrija-San Vicente de Chucurí): *mudstone* arcillosos con materia orgánica, de tonos grises oscuros (N3) con laminación plano paralela.

4 m 288,65 m



Figura 142. A) Aspecto de los *mudstone* calcáreos con materia orgánica que se alternan con calizas *mudstone* (metros 282 a 283). B) Restos de una amonita en su largo de 60 cm (metro 283).

AGRADECIMIENTOS

Mis agradecimientos al Servicio Geológico Colombiano, al señor director, Oscar Paredes Zapata, y a los directores técnicos del Servicio Geológico por el apoyo a la realización de este proyecto; al equipo de trabajo (Giovanni Moreno Sánchez, Roberto Terraza Melo, Adrián Pérez Rico y José Arenas Mosquera) por su cooperación constante en las actividades de campo; a los geólogos Juan Alejandro Numpaque y Victoria Elena Corredor por la realización de figuras, y al Dr. Fernando Etayo-Serna, director de este proyecto, por su asesoría permanente, discusión y profundización de conceptos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Berger, Sigrid. 2006. *Photo-atlas of living Dasycladales*. Brest: Association Carnets de Géologie. <https://doi.org/10.4267/2042/5831>.
- Bose, Sushanta y Henry Chafetz H. 2009. "Topographic control on distribution of modern microbially induced sedimentary structures (MISS): A case study from Texas coast". *Sedimentary Geology* 213 (3-4): 136-149. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2008.11.009>.
- Bundeleva, Irina A., Liudmila S. Shirokova, Pascale Bénézeth, Oleg S. Pokrovsky, Elena I. Kompantseva y Stéphanie Balor. 2012. "Calcium carbonate precipitation by anoxygenic phototrophic bacteria". *Chemical Geology* 291: 116-131. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2011.10.003>.
- Burne, Robert V. y Linda S. Moore. 1987. "Microbialites; organosedimentary deposits of benthic microbial communities". *Palaaios* 2 (3): 241-254. <https://doi.org/10.2307/3514674>.
- Campbell, Charles. V. 1967. "Lamina, laminaset, bed and bedset". *Sedimentology* 8 (1): 7-26. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1967.tb01301.x>.
- Chafetz, Henry S. y Chirs Buczynski. 1991. "Bacterially induced lithification or microbial mats". *Palaaios* 7 (3): 227-293. <https://doi.org/10.2307/3514973>.
- Cornée, Annie, Mike Dicman, M. y Georges Busson. 1992. "Laminated cyanobacterial mats in sediments of solar salt works: Some sedimentological implications". *Sedimentology* 39 (4): 599-612. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1992.tb02139.x>.
- Dunham, Robert J. 1962. "Classification of carbonate rocks according to depositional texture". En *Classification of Carbonate Rocks, a Symposium*, editado por William E. Ham, 108-121. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M1357>.
- Dupraz, Christophe, Pamera Reid, Olivier Braissant, Alan Decho, Sean Norman y Pieter Visscher. 2009. "Processes of carbonate precipitation in modern microbial mats". *Earth Science Reviews* 96 (3): 141-162. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2008.10.005>.
- Embry, Ashton F. y Jhon Edward Klován. 1971. "A Late Devonian reef tract on Northeastern Banks Island". *Bulletin of Canadian Petroleum Geology* 19 (4): 730-781.
- Etayo-Serna, Fernando y Georgina Guzmán-Ospitia. 2019. "Formación Rosa Blanca: subdivisión de la Formación y propuesta de Neoestratotipo. Sección laguna El Sapo, vereda El Carrizal, municipio de Zapato-ca, departamento de Santander". En *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena*, dirección científica y edición de Fernando Etayo-Serna. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia vol. XXIII. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

- Flügel, Erik. 2010. *Microfacies of carbonate rocks. Analysis, interpretation and application*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-03796-2>.
- Folk, Robert L. 1962. "Spectral subdivision of limestone types". En *Classification of Carbonate Rocks, a Symposium*, editado por William E. Ham, 62-84. American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M1357>.
- Folk, Robert. 1987. "Detection of organic matter in thin-sections of carbonate rocks using a white card". *Sedimentary Geology* 54 (3): 193-200. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(87\)90022-4](https://doi.org/10.1016/0037-0738(87)90022-4).
- Forero, Hugo y Luis Fernando Sarmiento. 1982. "Ambiente de depósito del miembro de arcillolitas abigarradas, Formación Paja, área de Villa de Leiva". Trabajo de grado. Universidad Nacional de Colombia.
- Gaona-Narváez, Tatiana, Florentin J.-M.R. Maurrasse y Fernando Etayo-Serna. 2013. "Geochemistry, palaeoenvironments and timing of Aptian organic-rich beds of the Paja Formation (Curití, Eastern Cordillera, Colombia)". En *Isotopic Studies in Cretaceous Research*, edited by Ana Voica Bojar, Mihaela C. Melinte-Dobrinescu and Jan Smit, 31-48. Special Publications 382. London: Geological Society. <https://doi.org/10.1144/SP382.6>.
- Gerdes, Gisela. 2010. "What are microbial mats?". En *Microbial Mats: Modern and Ancient Microorganisms in Stratified Systems, Cellular Origin, Life in Extreme Habitats and Astrogeology*, editado por Joseph Seckbach y Aharon Oren, 3-25. Dordrecht: Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3799-2>.
- González Oviedo, Leopoldo y Armando Espinosa Baquero. 2012. "Hallazgo de yacimientos de sales de potasio en Colombia". *Boletín de Geología* 34 (1): 57-65.
- Horodyski, Robert, Bonnie Bloeser y Stephen Vonder Haar. 1977. "Laminated algal mats from a coastal lagoon, Laguna Mormona, Baja California, México". *Journal of Sedimentary Research* 47 (2): 680-696. <https://doi.org/10.1306/212F7220-2B24-11D7-8648000102C1865D>.
- Ingram, Roy. L. 1954. "Terminology for the thickness of stratification and parting units in sedimentary rocks". *Geological of American Association Bulletin* 65 (9): 937-938. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1954\)65\[937:TFTTOS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1954)65[937:TFTTOS]2.0.CO;2).
- Konhauser, Kurt. 1998. "Diversity of bacterial iron mineralization". *Earth-Science Reviews* 43 (3): 91-121. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(97\)00036-6](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(97)00036-6).
- Kristensen, Erik y Martin C. Rabenhorst. 2015. "Do marine rooted plants grow in sediment or soil? A critical appraisal on definitions, methodology and communication". *Earth-Science Reviews* 145: 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2015.02.005>.
- Krumbein, Wolfgang, Ulrike Brehm, Gisela Gerdes, Ana Gorbushina, George Levit y Katarzyna Palinska. 2003. "Biofilm, biodictyon, biomat, microbialites, oolites, stromatolites geophysiology, global mechanism, parahistology". En *Fossil and Recent Biofilms: A Natural History of Life on Earth*, editado por Wolfgang Elisabeth Krumbein, David Maxwell Paterson y Georgii Aleksandrovich Zavarzin, 1-27. Dordrecht: Springer.
- Lazar, Remus, Kevin Bohacs, Joe Macquaker, Juergen Schieber y Timothy Demko. 2015. "Capturing key attributes of fine-grained sedimentary rocks in outcrops, cores, and thin sections: Nomenclature and description guidelines". *Journal of Sedimentary Research* 85 (3): 230-246. <https://doi.org/10.2110/jsr.2015.11>.
- Mertie, John B. Jr. 1922. "Graphic and mechanical computation of thickness of strata and distance to a stratum". *USGS Professional Paper* 129, 39-52. <https://doi.org/10.3133/pp129C>.
- Morales, Luis G. y The Colombian Petroleum Industry. 1958. "General geology and oil occurrences of Middle Magdalena Valley, Colombia". En *Habitat of oil. A symposium; conducted by the American Association of Petroleum Geologists*, edited by Lewis G. Weeks, 641-695. Special Publication 18. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists.
- Moreno-Sánchez, Giovanni. 2019. "Mapa geológico del Valle Medio del Magdalena en los alrededores del Puente El Tablazo, Departamento de Santander". En *Estudios geológicos y paleontológicos sobre el Cretácico en la región del embalse del río Sogamoso, Valle Medio del Magdalena*, dirección científica y edición de Fernando Etayo-Serna. Compilación de los Estudios Geológicos Oficiales en Colombia vol. XXIII. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano
- Noffke, Nora, Gisela Gerdes, Thomas Klenke y Wolfgang Krumbein. 1996. "Microbially induced sedimentary structures - examples from modern sediments of siliciclastic tidal flats". *Zentralblatt für Geologie und Paläontologie* 1 (1-2) 1995: 307-316.
- Noffke, Nora, Gisela Gerdes, Tomas Klenke y Wolfgang Krumbein. 2001. "Microbially induced sedimentary structures: A new category within the classification of primary sedimentary structures". *Journal of Sedimentary Research* 71 (5): 649-656. <https://doi.org/10.1306/2D-C4095D-0E47-11D7-8643000102C1865D>.
- Noffke, Nora y Stanley M. Awramik. 2013. "Stromatolites and MISS-differences between relatives". *GSA Today* 23 (9): 4-9.
- Noffke, Nora, Daniel Christian, David Wacey y Robert M. Hazen. 2013. "Microbially induced sedimentary structures recording an ancient ecosystem in the ca. 3.48 billion-year-old Dresser Formation, Pilbara, Western Australia". *Astrobiology* 13 (12): <https://doi.org/10.1089/ast.2013.1030>.
- Pettijohn, Francis John. 1975. *Sedimentary rocks*. New York: Harper & Row.
- Reháková, Daniela. 2000. "Evolution and distribution of the Late Jurassic and Early Cretaceous calcareous dinoflagellates recorded in the Western Carpathian pelagic carbonate facies". *Mineralia Slovaca* 32: 79-88. <https://da.geology.sk/navigator/download.jsp?magazineId=A1001001A18D12B11541H47617>.
- Riding, Robert. 1991. "Classification of microbial carbonates". En *Calcareous Algae and Stromatolites*, 21-51. Berlin: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-52335-9>.
- Riding, Robert. 2000. "Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms". *Sedimentology* 47 (1): 179-214. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3091.2000.00003.x>.
- Robertson, Charley. 1991. "Marginal marine halite: Sabkhas and Salinas". En *Evaporites, petroleum and mineral resources*, editado por Judith Melvin, 1-66. New York: Elsevier Sciences Publishing.
- Scholle, Peter y Dana Ulmer-Scholle. 2003. *A color guide to the petrography of carbonate rocks: Grains, textures, porosity, diagenesis*. AAPG Memoir vol. 77. Tulsa: The American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M77973>.
- Stal, Lucas, Hans van Gemerden y Wolfgang Krumbein. 1985. "Structure and development of a benthic marine microbial mat". *FEMS Microbiology Ecology* 1 (2): 111-125. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6968.1985.tb01138.x>.
- Stinnesbeck, Wolfgang, Eberhard Frey y Zell Patrick. 2016. "Evidence for semi-sessile early juvenile life history in Cretaceous ammonites". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 457: 186-194. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2016.06.019>.
- Warren, John K. 2006. *Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons*. Berlin: Springer. <https://doi.org/10.1007/3-540-32344-9>.
- Wheeler, Orby Clinton. 1929. "Report on the Palmira Series with notes on stratigraphy of the Umir, Lisama y La Paz Formations near the eastern part of De Mares Concession". Informe Geológico 37. Ecopetrol.
- Wolf, Karl H. 1965. "Gradational sedimentary products of calcareous algae". *Sedimentology* 5 (1): 1-37. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.1965.tb01556.x>.