



Evidencias petrográficas de estructuras de origen algal/bacteriano en carbonatos de la Formación Agua Nueva (Cenomaniano/Turoniano: Cretácico Superior) en Xilitla, S.L.P. México central

Alberto Blanco-Piñón¹, Florentin Jean-Marie Robert Maurrasse²,
Francisco Javier Zavala Díaz-de la Serna³, Rubén Alfonso López-Doncel⁴,
Susana Abigail Ángeles-Trigueros⁴, Juan Hernández-Ávila¹, Edgar Juárez Arriaga^{1,5}

¹ Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Apdo. Postal 1-288, Admón. 1, Pachuca, Hidalgo, C.P. 42001, México.

² Department of Earth and Environment, Florida International University, 11200 SW 8th Street, PC-344, Miami, Florida, Estados Unidos de América.

³ Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chihuahua, Nuevo Campus Universitario, Circuito Universitario, C.P. 31125, Chihuahua, Chihuahua, México.

⁴ Instituto de Geología, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Av. Dr. Manuel Nava 5, Zona Universitaria, 78240, San Luis Potosí, San Luis Potosí, México.

⁵ Gerencia de Estudios Especiales e Investigación, Servicio Geológico Mexicano, Blvd. Felipe Ángeles, km 93.50-4, Col. Venta Prieta, C.P. 42080, Pachuca, Hidalgo, México.

* ablanco@uaeh.edu.mx

Resumen

Este trabajo consiste en la documentación y descripción preliminar de estructuras fósiles microbianas posiblemente de origen algal/bacteriano en una sección de 6.5 m de la Formación Agua Nueva (Cenomaniano-Turoniano: Cretácico Superior) en el área de Xilitla (San Luis Potosí, México), localizada en la parte sur de la cuenca Tampico-Misantla. Esta unidad está constituida por calizas bien estratificadas en capas decimétricas, con escasas intercalaciones de lutitas color café y de bentonitas verdes. Las calizas en ocasiones presentan capas y lentes de pedernal negro. La unidad muestra una alternancia de dos facies calcáreas: 1) caliza oscura y laminada con restos esqueléticos de holosteos, dientes de tiburón y escamas de teleosteos, lentes de pirita sedimentaria y altos contenidos en materia orgánica ($C_{org} = 1 - 8 \text{ wt\%}$); y 2) caliza de color gris claro no laminada, bioturbada y con bajo contenido de materia orgánica ($C_{org} < 1 \text{ wt\%}$). El análisis petrográfico y el estudio bajo el microscopio electrónico de barrido de las calizas laminadas revelan la presencia de una matriz micrítica con láminas sub-paralelas y onduladas, láminas plegadas continuas y discontinuas de materia orgánica, así como diversos tipos de filamentos, granos cubiertos, microsferas y foraminíferos planctónicos. Por otro lado, en la caliza bioturbada, la presencia de filamentos y pirita sedimentaria es escasa. El análisis microscópico de las facies en conjunto, con un cuidadoso estudio de las microestructuras descritas, revela importantes similitudes morfológicas y de textura con facies sedimentarias antiguas y recientes relacionadas con un origen y/o aporte microbiano. Como complemento, la presencia de filamentos intralaminares en microcapas de materia orgánica y la disposición de los arreglos laminares sugieren un origen microbiano de tipo bentónico.

Finalmente, la conservación de la laminación debido a la ausencia de bioturbación, la presencia de pirita framboidal, y el alto contenido de materia orgánica en la caliza laminada son consistentes con el establecimiento recurrente de condiciones disóxicas/anóxicas, mientras que la caliza bioturbada representa episodios bien oxigenados. La presencia de foraminíferos planctónicos, como *Rotalipora cushmani* e *Inoceramus labiatus*, indica un intervalo del Cenomaniano Tardío al Turoniano más Temprano para las capas de la Formación Agua Nueva en Xilitla, lo que sugiere que los episodios de deficiencia de oxígeno en esta unidad son coetáneos con el Evento de Anoxia Oceánica 2 (OAE-2 por sus siglas en Inglés).

Palabras clave: filamentos, actividad microbiana, OAE2, Turoniano, Formación Agua Nueva, México central.

Abstract

This paper documents and describes fossil microbial structures inferred to be of algal/bacterial origin in the Upper Cretaceous Agua Nueva Formation in the Xilitla area (San Luis Potosí, Mexico), located in the southern part of the Tampico-Misantla basin. The sequence consists of alternating decimeter-thick beds of limestone with occasional brown shale and green bentonite layers. The limestone also include intermittent beds of black chert. The sedimentary succession shows two calcareous facies: 1) dark laminated limestones containing fossil remains of holosteans, teleosteans and shark teeth, as well as lenticular layers of sedimentary pyrite, and high content of organic matter (C_{org} 1 – 8 wt%); and 2) gray, non-laminated, bioturbated limestones with low content of organic matter (C_{org} < 1.0 wt%). Petrographic and scanning electron microscope analyses of the laminated limestone reveal a micritic matrix with sub-parallel wavy lamination, continuous and discontinuous folded laminae with shreds of organic matter, as well as different kinds of filaments, coated grains and planktonic foraminifera. On the other hand, the non-laminated, bioturbated limestone comprises infrequent filaments and pyrite. Both textures and biomorphic structures are very similar to those previously described for ancient and recent sediments representative of microbial origin. Furthermore, the occurrence of filaments embedded in the organic-matter-rich laminae suggests *in situ* production related to benthic microbial activity.

Concurrence of lamination due to the absence of bioturbation, pervasive framboidal pyrite, and the high concentration of organic matter in the laminated limestones are consistent with persistent dysoxic/anoxic conditions, whereas the bioturbated limestones might represent recurrent relatively well-oxygenated episodes. The presence of the planktonic foraminifera *Rotalipora cushmani* concomitant with *Inoceramus labiatus* indicates a time interval from the Late Cenomanian to the Earliest Turonian for the Agua Nueva Formation at Xilitla, thus indicating that this interval of intermittent severe oxygen deficient conditions is coeval with the global Oceanic Anoxic Event 2 (OAE-2).

Keywords: filaments, microbial activity, OAE2, Turonian, Agua Nueva Formation, central Mexico.

1. Introducción

Diferentes tipos de microorganismos, especialmente bacterias, son capaces de controlar una amplia gama de procesos bioquímicos en diversos ambientes sedimentarios continentales y marinos que inducen a la presencia de características particulares en el sedimento (Schieber, 1999). En ambientes marinos, diversos grupos de microorganismos tales como cianobacterias (Riding, 2000), bacterias sulfato reductoras (Tang *et al.*, 2011), y algas microscópicas cafés, verdes y rojas (Tucker y Wright, 1990; Riding, 2000) están relacionados con la formación de estructuras sedimentarias a nivel macro, meso y microscópico. En ambientes calcáreos, un ejemplo de esto lo constituyen los carbonatos microbiales, siendo los estromatolitos una de las estructuras más comunes (Riding, 2006; Calner y Eriksson, 2011; Noffke y Chafetz, 2011).

El registro de mediación microbiana en la formación de calizas también es conocido en diferentes ambientes sedimentarios del Precámbrico (Awramik, 1984; Walter *et al.*, 1992; Kaźmierczak *et al.*, 1996; Kaźmierczak y Alterman, 2002; Kaźmierczak *et al.*, 2004) y Fanerozoico (Tucker y Wright, 1990; Folk y Chafetz, 2000; Arp *et al.*, 2001; Feng *et al.*, 2010; Bose y Chafetz, 2011). En éstos se han descrito fósiles de bacterias, tales como estructuras cocoides (Folk, 1993, 1999; Folk y Chafetz, 2000) y filamentosas (Della Porta *et al.*, 2003).

Bacterias fósiles y/o posibles pseudofósiles microbianos

también han sido reportados en otras litologías como lutita carbonosa (Pacton *et al.*, 2008), pedernal (Morris *et al.*, 1998; Brasier *et al.*, 2002; De Gregorio y Sharp, 2003; Kremer, 2006), pirita sedimentaria (Schieber, 2002a, 2002b; Folk, 2005; Schieber, 2005, 2007), ocasionalmente en evaporitas (Stivaletta *et al.*, 2005) y hasta en meteoritos (Folk y Lynch, 1997), aunque la biogenicidad de estas últimas aún permanece en discusión.

En México, los trabajos que describen bioformas microscópicas fósiles ligadas a bacterias o a algas en rocas del Mesozoico son muy escasos. Los más conocidos corresponden a microesferoides de origen bacteriano (cianobacterias) descritos en rocas del Cretácico Superior (Cenomaniano/Turoniano) en la Formación Indidura, en el estado de Coahuila en el noreste de México (Duque-Botero y Maurrasse, 2005, 2008; Duque-Botero, 2006; Duque-Botero *et al.*, 2009). Por otra parte, Blanco *et al.* (2010) y Ángeles-Trigueros *et al.* (2012) describieron estructuras bacterianas en pirita sedimentaria de la Formación Agua Nueva en Xilitla, San Luis Potosí, México central.

El presente trabajo tiene por objetivo documentar filamentos a escalas micrométricas y milimétricas, así como estructuras atribuibles a actividad microbiana presentes en las calizas de la Formación Agua Nueva en la localidad de Xilitla, y contribuir al conocimiento de la interacción de los microorganismos con el sedimento, y en especial, con el desarrollo de láminas y bandas de materia orgánica.

2. Situación geográfica y marco geológico-estratigráfico

Los afloramientos estudiados se sitúan en el municipio de Xilitla, al sureste del estado de San Luis Potosí, en el centro de México, entre las coordenadas 21° 20' y 21° 25' de latitud norte, y 99° 00' y 99° 10' de longitud oeste (Figura 1).

El área de estudio corresponde al Cinturón de Pliegues y Cabalgaduras de la Sierra Madre Oriental y está localizada en la Sierra de Xilitla, específicamente en la Cabalgadura de Xilitla. De acuerdo con Suter (1991), en el área que comprende la zona del afloramiento aquí estudiado, las rocas más antiguas pertenecen al Jurásico Superior (Formación Pimienta), a las que sobreyacen unidades litológicas del Cretácico tales como las formaciones Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior (Cretácico Inferior), así como las formaciones El Abra, Tamabra, Agua Nueva, Soyatal, San Felipe y Méndez (Cretácico Superior). La distribución de estas unidades se ilustra en la Figura 1.

En el área de los afloramientos, la Formación Agua Nueva consiste principalmente en caliza laminada de color gris oscuro (5B 4/1) ocasionalmente con tonalidades azuladas (5B 6/1) de espesor decimétrico (10 – 50 cm) (Figura 2 y 3A), e intercalaciones de lutita café-anaranjado (10YR 7/4) a café-amarillento (10YR 5/4) de espesor centimétrico (2 – 8 cm) (Figura 3B). La sección también incluye capas intermitentes de entre 2 – 4 cm de espesor de bentonita verde oliváceo (10Y 6/6, 10Y 5/4) (Figura 3C). Tanto la lutita como las capas de bentonita no presentan ni fósiles ni estructura interna aparente. Algunas capas de caliza presentan laminación primaria fina a escala milimétrica (1 – 2 mm) (Figura 3D), bandas de pedernal negro de ~5 cm de espesor (Figura 3E), y pirita sedimentaria en cristales diseminados o en lentes de 7 cm de longitud con un espesor máximo de 2 cm (Figura 3F). Los análisis de carbono orgánico (C_{org}) muestran importantes variaciones de este componente en función de la textura. Los valores menores de 1 % fueron obtenidos en la facies de caliza no laminada, mientras que valores superiores al 2 % (ocasionalmente hasta 8 %) están presentes en la facies de caliza laminada y de tonos más oscuros (Blanco-Piñón *et al.*, 2008; Rojas León *et al.*, 2008).

La bioturbación está presente en la caliza no laminada, la cual presenta tonalidades más claras de gris. A nivel macroscópico, la bioturbación se manifiesta en escasas icnoestructuras consistentes en tubos de 28 cm de largo por 1 cm de diámetro y que presentan bifurcaciones muy similares al icnogénero *Thalassinoides* (Figura 4A). A nivel microscópico, la bioturbación consiste en tubos circulares y de forma irregular probablemente producto de la actividad de poliquetos o crustáceos (Figura 4B), la cual pudo haber homogenizado el sedimento causando la aparente ausencia de laminación.

El contenido macrofósil consiste en ammonites no determinados (Figura 4C) y bivalvos inoceramidos

parcialmente disueltos (*Inoceramus labiatus*), estos últimos presentes en los últimos 3 m de la sección (Figura 4D); y abundantes fragmentos de peces tales como escamas de ichthyodectiformes, dientes de tiburón (Maldonado-Koerdell, 1956), y restos de los géneros *Tselfatia* y *Goulimimichthys* (Blanco *et al.*, 2006). Se han realizado nuevos hallazgos de rostros fragmentados de dercetidos (cf. *Rhynchodercetis*, Figura 4E) y fragmentos de una aleta caudal con estructuras hipulares muy similares a los descritos para pycnodontes del género *Nursallia* (Figura 4F). La microbiota consiste principalmente en foraminíferos planctónicos de diversos géneros y calciesferas (Figura 5A). Más escasos son los radiolarios y los foraminíferos bentónicos (Figura 5B), estos últimos sólo presentes en las capas bioturbadas. También se observaron filamentos translúcidos. Dichos filamentos consisten en formas delgadas, rectas a onduladas (Figura 5C) de 15 µm a 3 mm de longitud y de hasta 20 µm de espesor. Blanco-Piñón *et al.* (2008) sugieren que algunas de estas formas están asociadas a cianobacterias que pudieron vivir en la columna de agua como parte de la biota planctónica. Por otra parte, algunos de los filamentos más gruesos presentan un ápice triangular y una estructura interna que consiste en capas o lamelas con diversas orientaciones (Figura 5D). En algunas capas estos filamentos se desprenden de fragmentos calcáreos de mayor tamaño (Figura 5E y F), lo cual es consistente con lo reportado por Scholle *et al.* (1983), Scholle y Ulmer-Scholle (2003), Flügel (2004) y Negra *et al.* (2011) para filamentos traslúcidos de origen metazoario (bivalvos); lo que descarta un origen microbiano para las formas con ápice de Xilitla.

Con base en la presencia del foraminífero planctónico *Rotalipora cushmani* en los primeros 2 m de la sección y del bivalvo *Inoceramus labiatus*, en los últimos 3 m de la misma, Blanco-Piñón *et al.* (2008) asignan tentativamente esta unidad al Cenomaniano Tardío – Turoniano Temprano. Se están llevando a cabo actualmente en esta zona estudios bioestratigráficos de alta resolución para una asignación más precisa de la edad. De acuerdo a sus características litológicas, esta unidad fue depositada en aguas profundas (zona batial) dentro de la cuenca Tampico-Misantla.

3. Metodología

Un total de 74 muestras de caliza fueron observadas en lámina delgada bajo un microscopio petrográfico estándar de luz transmitida (*Olympus BX41*). Por otro lado, algunos fragmentos de roca así como las láminas delgadas de calizas laminadas fueron observados bajo un microscopio electrónico de barrido (MEB) marca *JEOL* modelo *JSM-6300* con una amplificación de 300000 x y una resolución de ~6 µm, a 30 kV. En el caso de los fragmentos de roca, éstos fueron extraídos en pequeños cubos de aproximadamente 1 cm³ de la parte menos expuesta de la muestra.

Posteriormente, tanto las láminas delgadas como los fragmentos de roca fueron cubiertos con una fina capa de

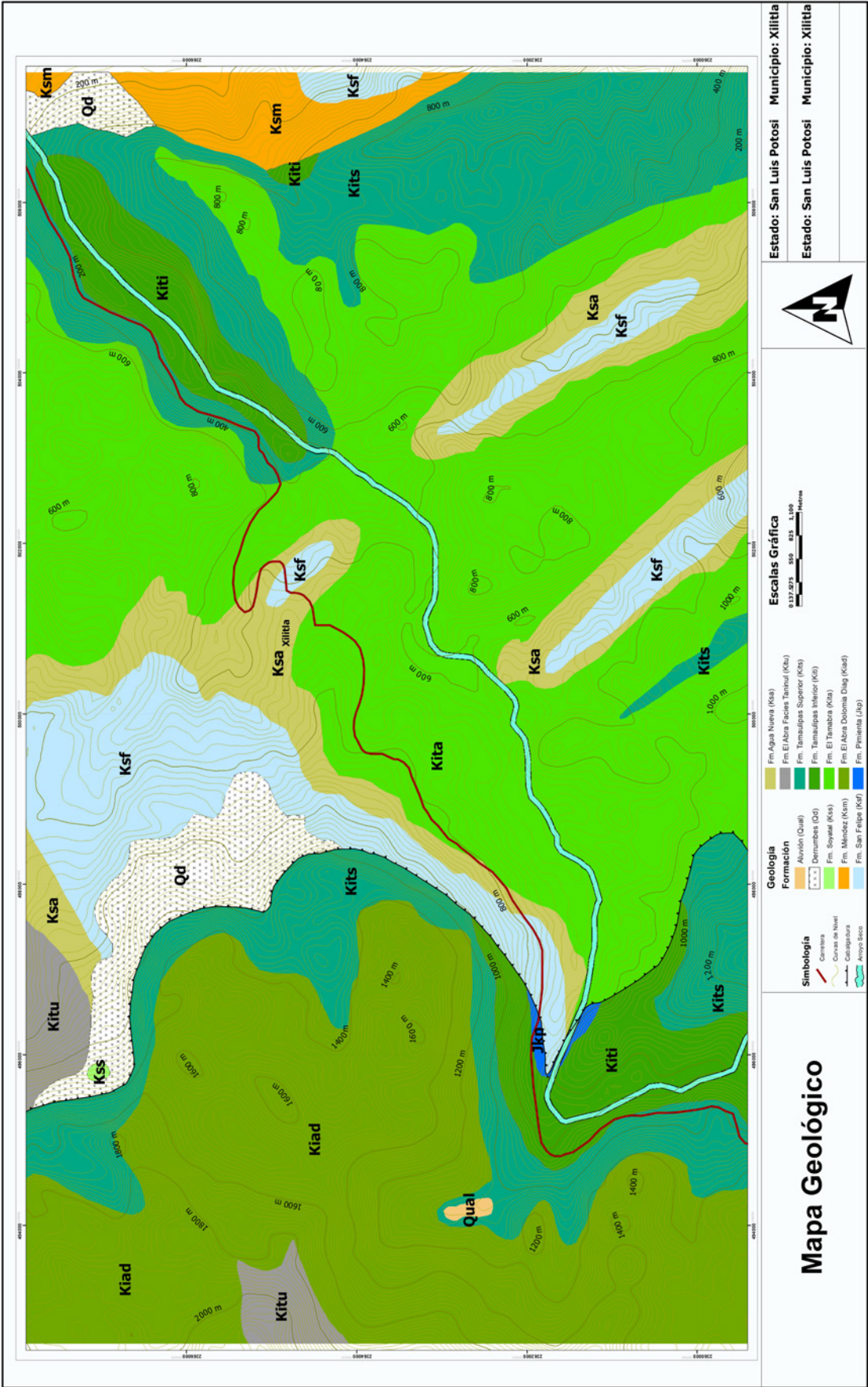


Figura 1. Distribución de la Formación Agua Nueva dentro del área circunvecina al municipio de Xilitla, San Luis Potosí, México.

oro durante tres minutos en una cámara ionizadora marca *DENTON VACUUM-Desk II*. Con el objetivo de determinar el contenido elemental de algunas estructuras observadas, las muestras fueron analizadas en un espectroscopio de energía dispersada de rayos X (EDX) marca *NORA*. Tanto los recubrimientos de roca, como las observaciones en MEB y los análisis elementales fueron realizados en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido en el AACTyM de la UAEH.

4. Resultados

4.1. Láminas con materia orgánica

Este tipo de estructuras consisten en láminas onduladas de hasta 15 μm de espesor que se extienden de forma continua y discontinua de forma paralela y sub-paralela

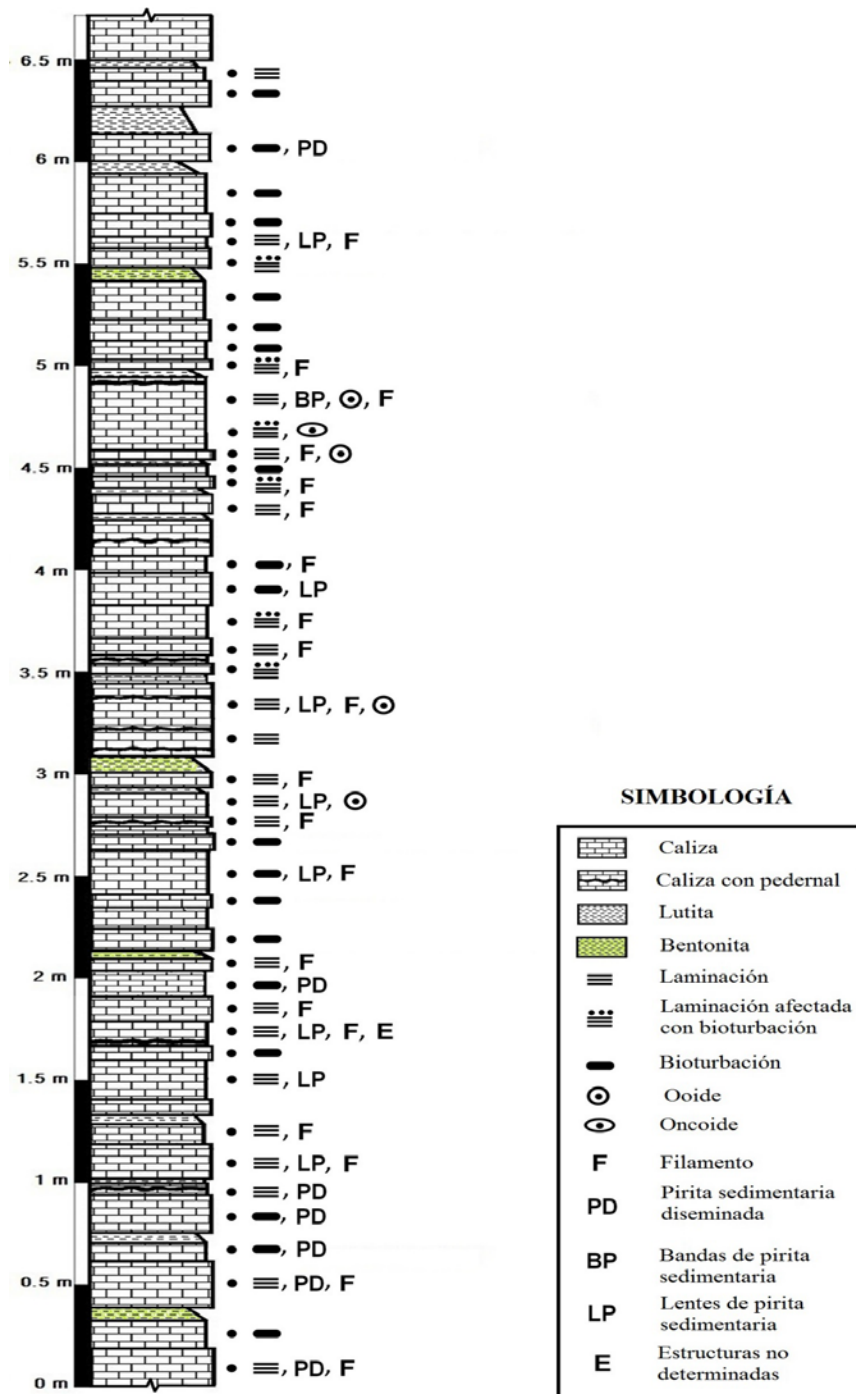


Figura 2. Columna estratigráfica de la Formación Agua Nueva en la sección de Xilitla, mostrando la posición de los elementos descritos en este trabajo.

a la estratificación, mostrando una ondulación notoria (Figura 6A). Presentan una coloración rojiza oscura que las distingue fácilmente de la matriz micrítica encajonante (Figura 6B). Las láminas de materia orgánica se aglutinan

formando bandas de hasta 40 μm de espesor (Figura 6C). Sur *et al.* (2006) sugieren que las bandas podrían ser el resultado de la cohesión de dos o más láminas onduladas.

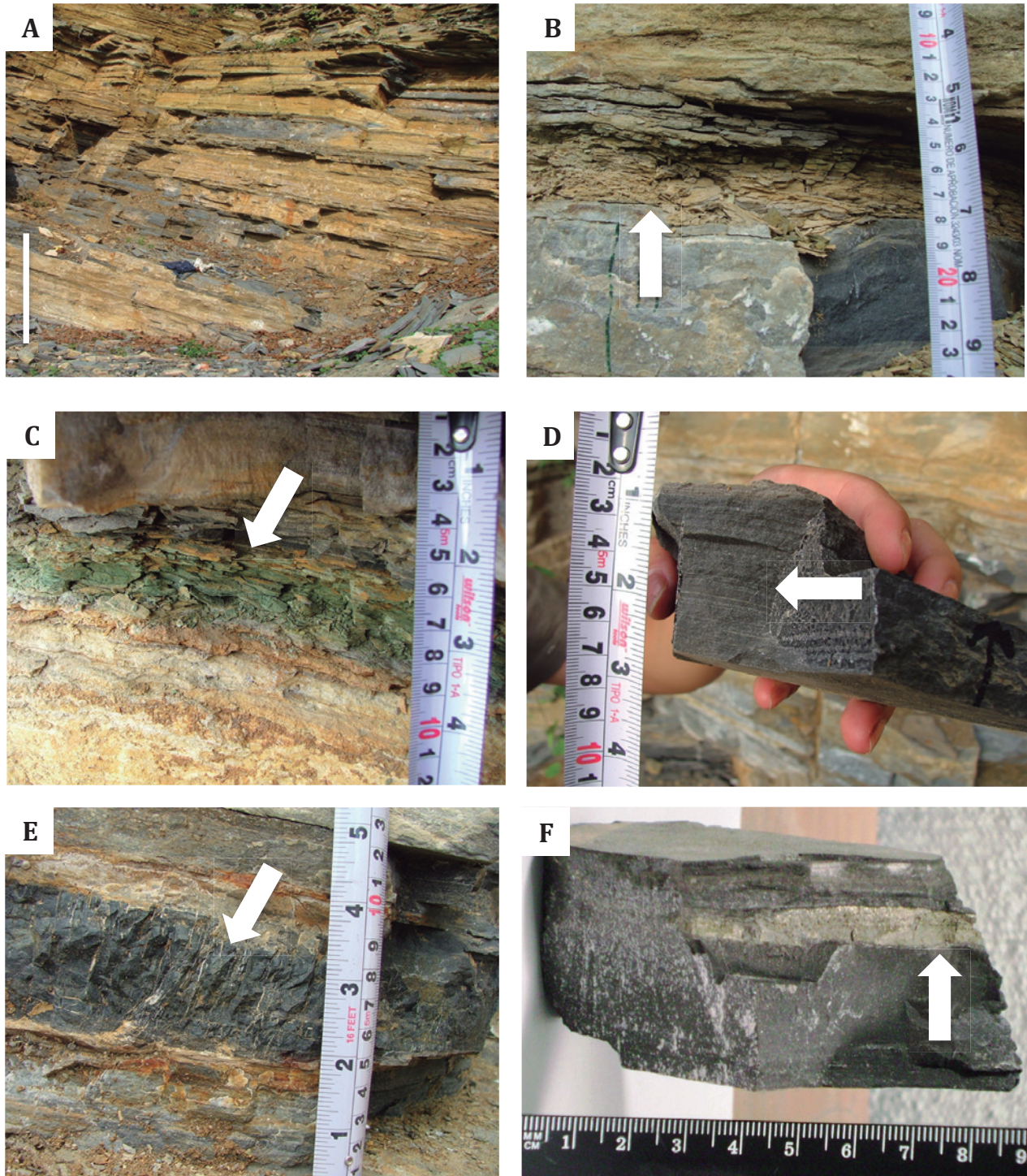


Figura 3. Fotografías de campo de la Formación Agua Nueva en Xilitla, San Luis Potosí. A) Aspecto general de la sección estudiada, barra de escala = 150 cm; B) Capas centimétricas de lutita café no fosilífera; C) Capas centimétricas de bentonita; D) Caliza color gris oscuro mostrando la laminación paralela a escala milimétrica; E) Bandas centimétricas de pedernal negro; F) Lentes centimétricos de pirita sedimentaria

4.2. Pirita sedimentaria

Algunas capas de caliza presentan cristales de pirita sedimentaria diseminados o formando lentes que alcanzan hasta 7 cm de longitud y un espesor máximo de 2 cm (Figura 3F). En lámina delgada, se observan pequeñas estructuras circulares opacas con diámetros máximos aproximados de

hasta 25 μm dispuestas en la matriz y dentro de las cámaras de algunos foraminíferos planctónicos y calciesferas. La pirita forma láminas onduladas de 10 μm de espesor que se extienden de forma sub-paralela al plano de estratificación (Figura 7A), de forma similar a las láminas de materia orgánica. Las observaciones realizadas a través de MEB muestran que los pequeños círculos opacos observados

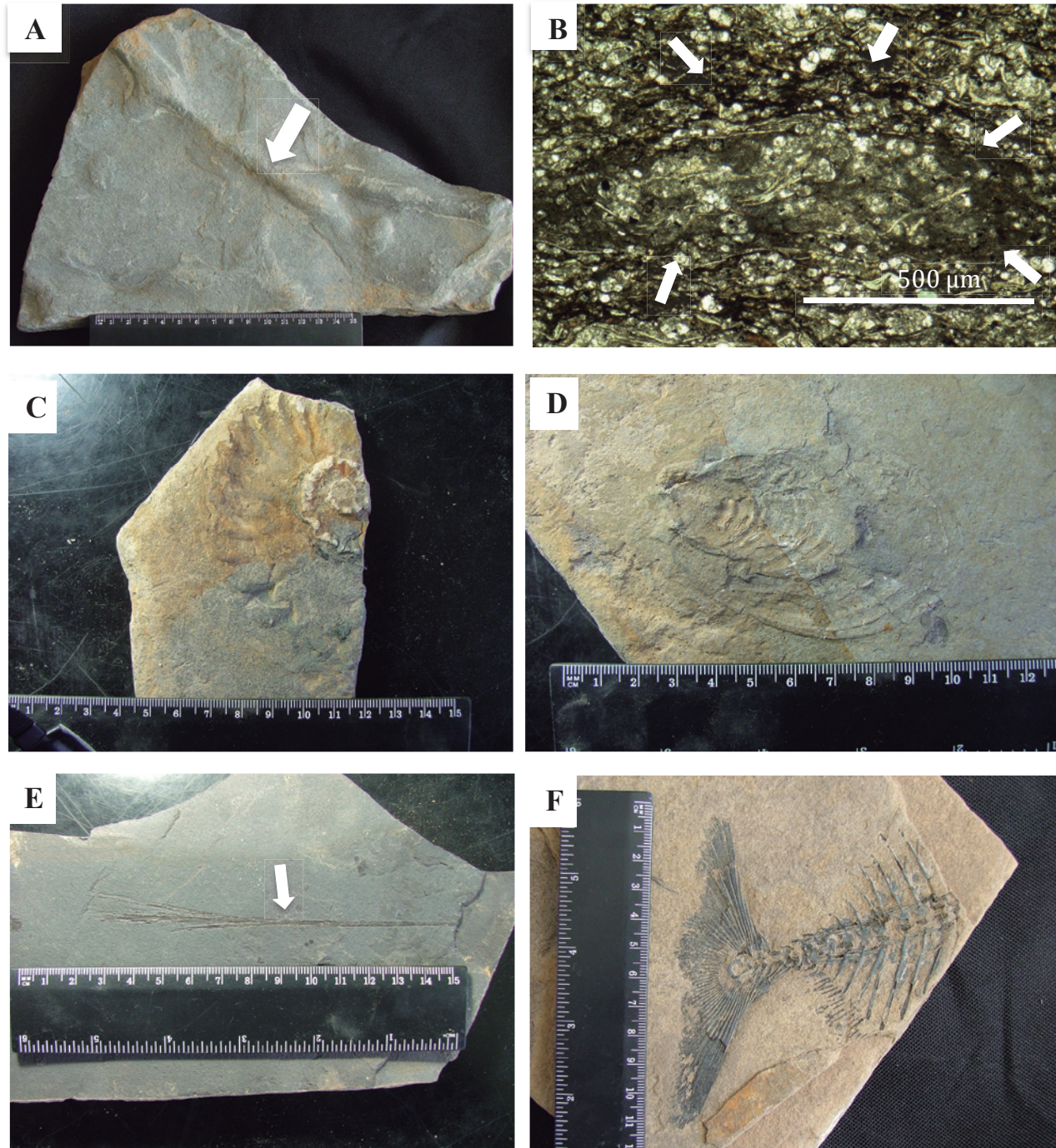


Figura 4. Restos fósiles de la Formación Agua Nueva en el área de estudio. A) Bioturbación a nivel macroscópico tipo *Thalassinoides*; B) Imagen de microscopio petrográfico mostrando bioturbación (barra de escala = 1 mm); C) Ammonite no determinado; D) Ejemplar de *Inoceramus labiatus*; E) Región rostral de espécimen del género *Rhynchodercetis* sp. (Teleostei: Dercetidae); F) Fragmento de la región caudal de espécimen del género cf. *Nursallia* (Holostei: Pycnodontidae) mostrando estructuras hipurales.

tanto en la matriz como en las cámaras de foraminíferos representan framboides, agrupaciones de cristales euedrales de forma sub-esféricas con diámetros de 5 – 25 μm (Figura 7B). Los framboides también fueron observados en las láminas onduladas de pirita sedimentaria, en donde presentaban diámetros de 5 – 7 μm .

4.3. Bioestructuras microscópicas fósiles

Las texturas y estructuras microscópicas potencialmente de origen microbiano se han reconocido principalmente en las calizas laminadas y ocasionalmente en las capas bioturbadas. Corresponden a filamentos, granos cubiertos y estructuras no determinadas. A su vez, dentro de los

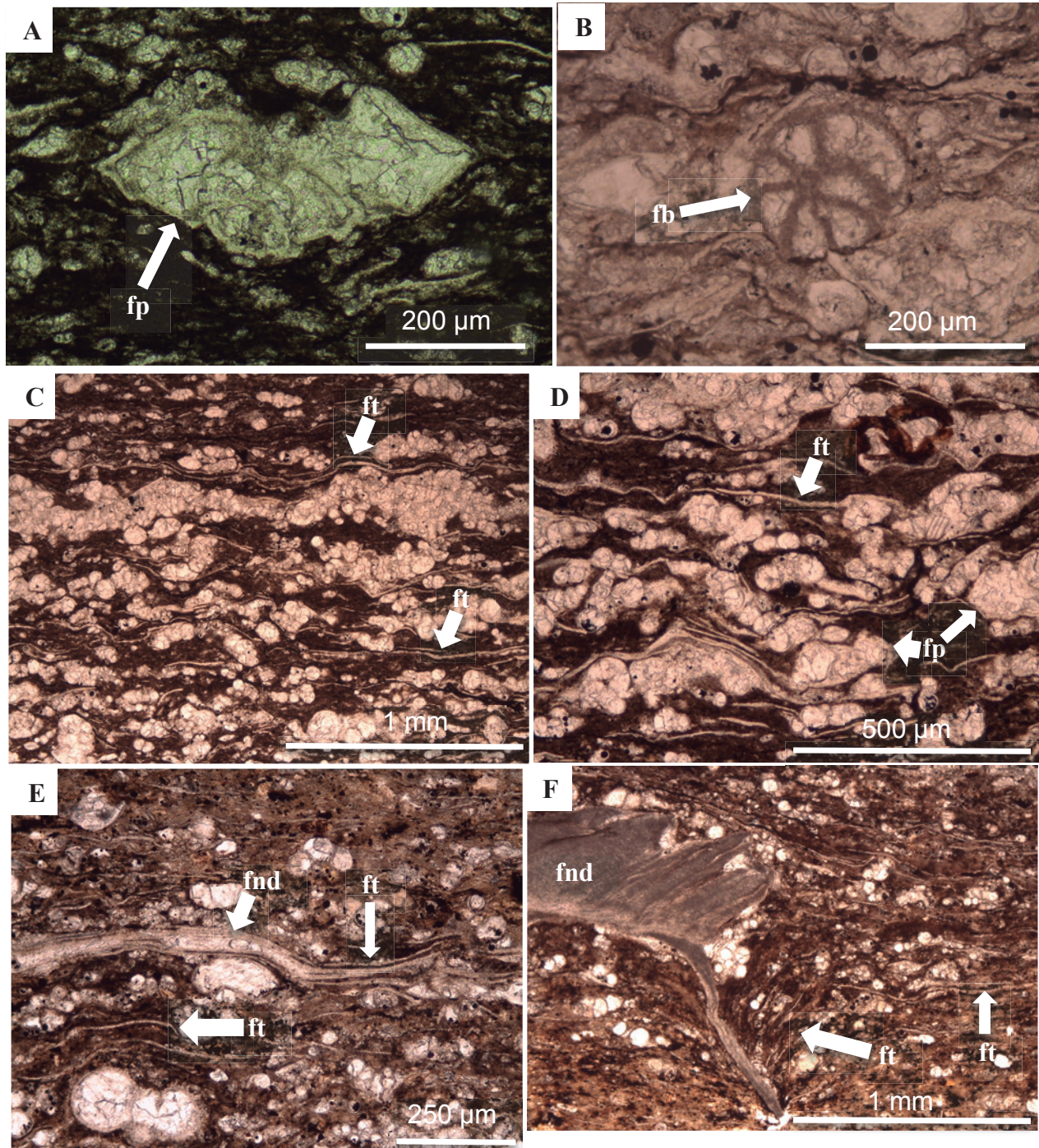


Figura 5. Fotomicrografías de la biota presente en secciones delgadas de la Formación Agua Nueva en San Luis Potosí. A) Foraminíferos planctónicos (fp); B) foraminífero bentónico (fb) no determinado; C) Filamentos traslúcidos (ft); D) Filamento traslúcido mostrando estructura apical (fta); E y F) Filamentos traslúcidos (ft) desprendiéndose de aloquímico esquelético no determinado (fnd).

filamentos se distinguen tres tipos: 1) filamentos translúcidos con longitudes entre 15 – 500 μm y espesores que varían entre 1 – 15 μm ; 2) filamentos milimétricos con división interna; y 3) filamentos milimétricos sin división aparente.

4.3.1. Filamentos translúcidos

Consisten en estructuras alargadas y delgadas sólo observables al emplear el MEB, con longitudes entre 15 – 400 μm y espesores de entre 1 – 15 μm (Figura 7C y 7D). Estos filamentos presentan una estructura interna que consiste en una serie de septos de ~ 10 μm de longitud y 15 μm de grosor (Figura 7E). En otros filamentos la segmentación no es tan marcada y sólo se observan una serie de estrías longitudinales (Figura 7F).

4.3.2. Filamentos milimétricos con división interna

Consisten en filamentos con coloración rojiza a rojiza-anaranjada con longitudes de hasta 4 mm y espesores de hasta 20 μm . Algunos filamentos presentan divisiones internas o septos muy marcadas, y sin indentación (Figura 8A). Estas divisiones presentan una morfología cuadrangular

a rectangular; en algunos especímenes el tamaño de éstas es homogéneo siendo de ~ 25 μm , mientras que en otros especímenes la longitud de los septos varía entre 40 – 100 μm (Figura 8B). Algunos filamentos muestran en su parte externa una serie de estriaciones que se extienden a lo largo del filamento (Figura 8C y D), lo cual puede ser producto del atrapamiento (*trapping*) de partículas, como puede ser observado en algunas bacterias (Whitton y Potts, 2002), o bien de la unión de filamentos de menor espesor.

4.3.3. Filamentos milimétricos sin división aparente

Presentan una coloración clara a rojo oscuro y se caracterizan por no mostrar división interna en su estructura, aunque en algunos casos, presentan zonas poco notorias con división localizada (Figura 8E). Estos filamentos son ondulados, y también se encuentran extendidos de forma paralela a la estratificación (Figura 8F), o bien se encuentran enrollados sobre sí mismos, pero sin envolver un núcleo aparente (Figura 8G). Algunos de los filamentos se encuentran dentro de las microláminas de materia orgánica. Otro rasgo notorio consiste en que las ondulaciones

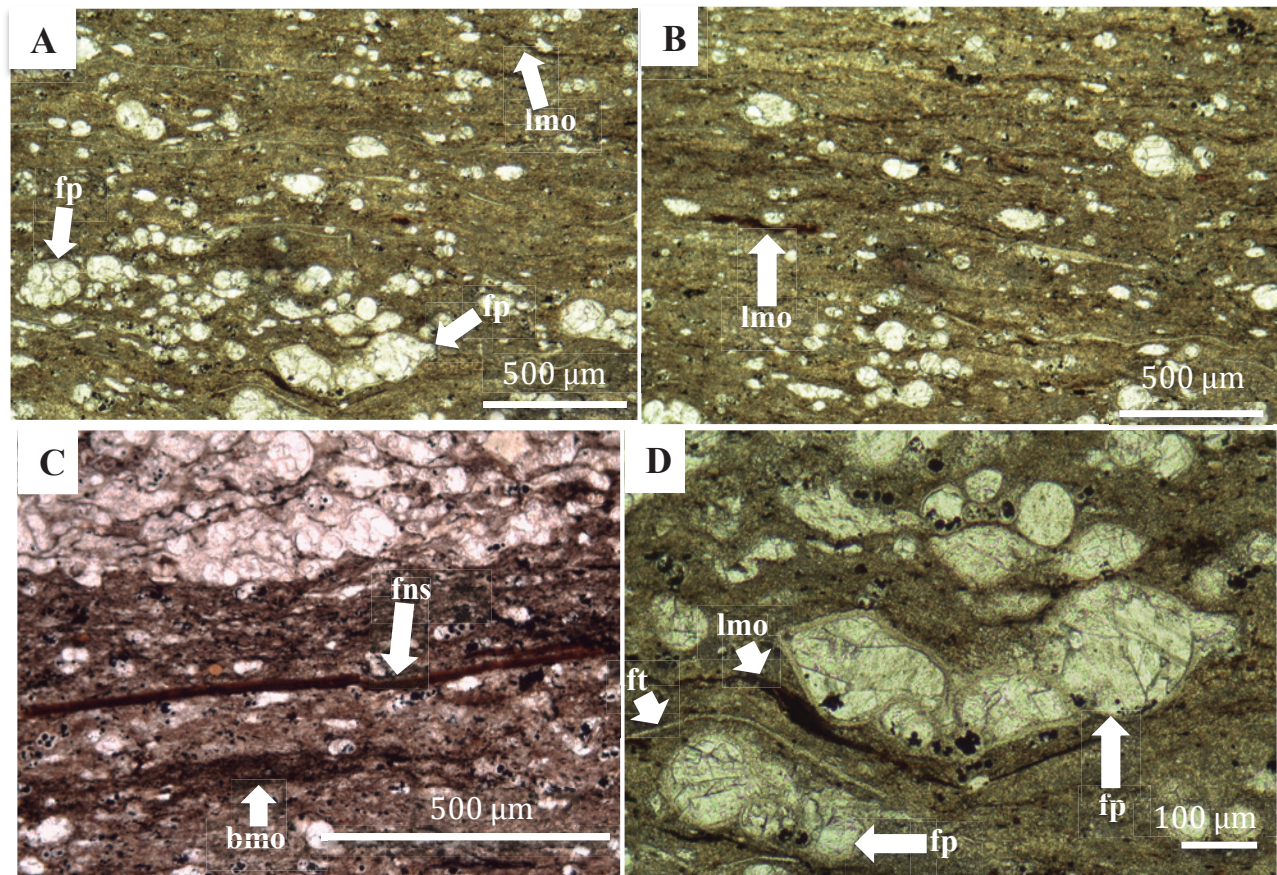


Figura 6. Fotomicrografías de materia orgánica presente en secciones delgadas de la Formación Agua Nueva en San Luis Potosí. A) láminas de espesor y longitud variables que se extienden de forma continua y discontinua de forma paralela al plano de estratificación mostrando una ondulación notoria (lmo); B) Lámina que presentan una coloración rojiza-oscuro distinguible de la matriz micrítica encajante (lmo); C) Láminas aglutinadas formando bandas (bmo). En la parte superior se observa un filamento no segmentado (fns) embebido en una lámina de materia orgánica; D) Lámina de materia orgánica ondulada por procesos de compactación diferencial. (Para abreviaciones no especificadas: ver Figura 5).

mostradas por las láminas y bandas de materia orgánica coinciden con la morfología ondulatoria de los filamentos (Figura 8H). Algunos filamentos muestran una coloración café-rojiza con tonalidades oscuras muy similares a las mostradas por algunas láminas y las bandas de materia orgánica.

4.3.4. Granos cubiertos.

Dentro de estas estructuras, se observaron granos con formas muy similares a aquellos reportados como ooides y microoncooides (Tucker y Wright, 1990). Las partículas con estructuras tipo ooide son escasas y están presentes en las

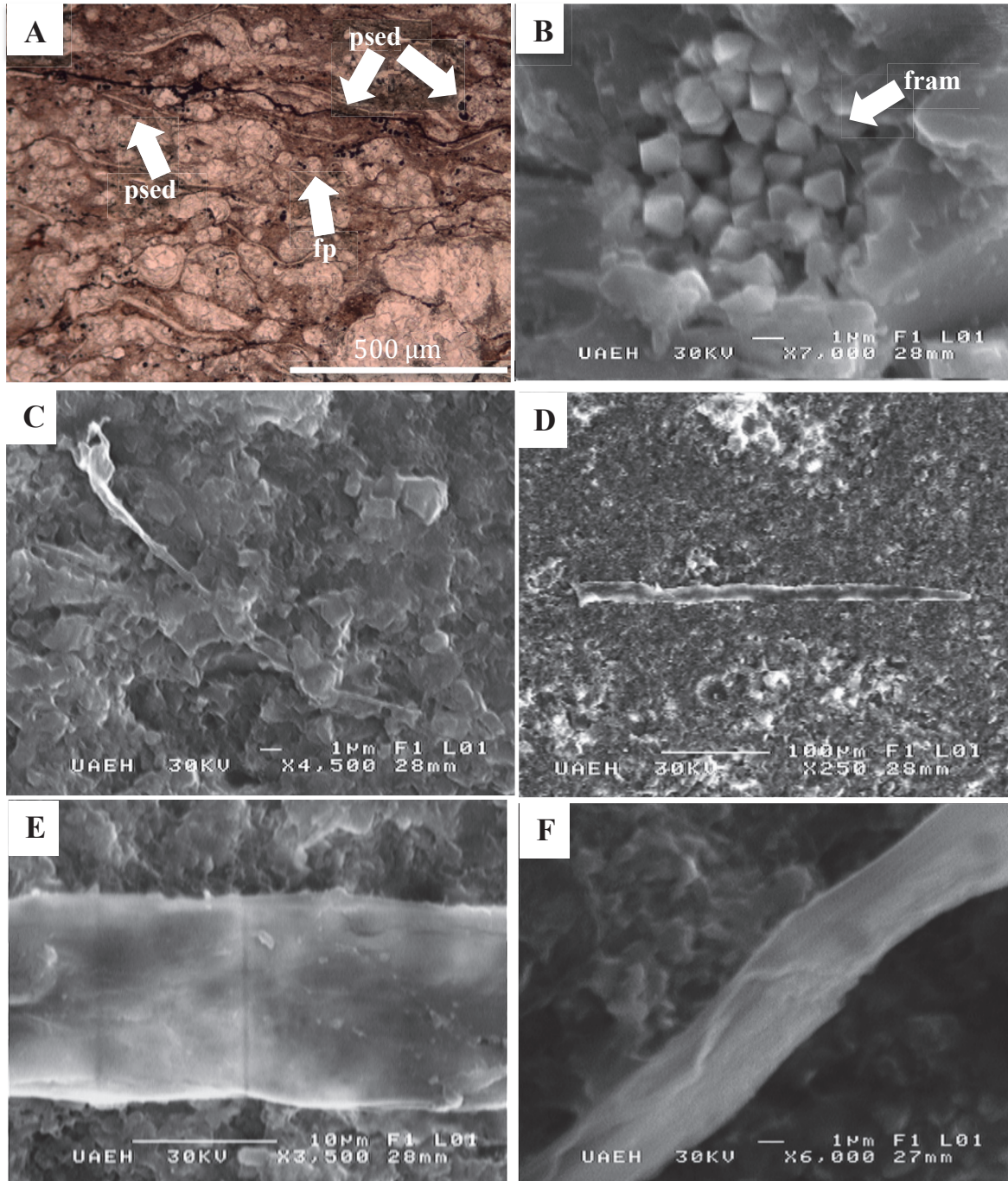


Figura 7. Fotomicrografías de pirita sedimentaria y filamentos (fil) en la Formación Agua Nueva en San Luis Potosí. A) Lámina delgada mostrando pirita sedimentaria (psed) dispuesta en láminas negras onduladas de 0.5 μm de espesor y en esferas negras dispuestas en la matriz y dentro de las cámaras foraminíferos planctónicos (fp); B) Fotomicrografía realizada con MEB de esferas negras (psed) mostrando un arreglo framboidal (fram); C y D) Imagen de MEB mostrando filamentos (fil); E) Imagen de MEB mostrando un acercamiento de D exponiendo septos (sept) internos dentro del filamento; F) Imagen de MEB mostrando filamentos (fil) con estrías longitudinales.

capas laminadas. Consisten en granos sub-esféricos de ~1 mm de diámetro, con una serie de láminas concéntricas que rodean un núcleo calcáreo (Figura 9A). Las estructuras tipo microoncooidales consisten en formas irregulares de 300 µm de longitud y de entre 50 – 70 µm de espesor, que presentan láminas concéntricas dispuestas irregularmente (Figura 9B).

4.3.5. Estructuras no determinadas.

Otras estructuras menos abundantes observadas en las calizas son fragmentos rojos de forma irregular y tamaño entre 1.1 mm de longitud y que presentan una clara segmentación y estriaciones longitudinales (Figura 9C). Estas estructuras se encuentran ocasionalmente rotas y se puede observar en su interior algunos aloquímicos de origen calcáreo. El origen de estos cuerpos aún permanece incierto.

5. Discusión

En las capas analizadas de la Formación Agua Nueva en la localidad de Xilitla, la presencia de láminas con materia orgánica, pirita sedimentaria, filamentos y granos cubiertos sugiere la influencia de actividad de origen algal o bacteriana al momento de la acumulación de las capas.

En sedimentos oceánicos, la materia orgánica puede derivar de organismos planctónicos y neftónicos que al morir se acumulan en el fondo y son posteriormente enterrados (Pichevin *et al.*, 2004). Existe evidencia de que en algunos ambientes oceánicos la materia orgánica consiste en una mezcla de compuestos autóctonos y, en menor proporción, de origen terrestre que han sido transportados mediante diversos mecanismos. En ambientes con déficit en oxígeno, la materia orgánica también puede proceder de microorganismos bentónicos tales como bacterias sulforeductoras (Takahashi e Ichimura, 1968), algunos tipos de cianobacterias (en ambientes fóticos) (Stal y Krumbein, 1986) y diferentes algas unicelulares (Pacton *et al.*, 2008) y formadoras de filamentos. En el primer caso, la materia orgánica suele aparecer dispersa en el sedimento, mientras que en el segundo caso, además, se dispone de forma concentrada en láminas y bandas asociadas a formas y texturas microscópicas filamentosas.

La caliza de la Formación Agua Nueva en la localidad de Xilitla exhiben, a escala de microscopio petrográfico y electrónico de barrido, texturas y estructuras que pueden ser interpretadas como producto de una actividad microbiana en el sedimento. La materia orgánica se dispone en láminas y bandas con cierta ondulación y coloración rojiza-oscuro que la distinguen de la micrita circundante. Schieber (1999) sugiere que este tipo de laminación puede ser consecuencia de procesos de compactación diferencial, así como de la rigidez de esqueletos o conchas alargadas dispuestas de forma paralela a la estratificación. Este tipo de procesos han sido observados en la Formación Agua Nueva en Xilitla, donde las ondulaciones de algunas láminas están estrechamente relacionadas con la compactación

del sedimento y la morfología de algunas cámaras de foraminíferos planctónicos (Figura 6D).

Por otra parte, Schieber (1999), Sur *et al.* (2006), Pacton *et al.* (2008) y Bontognali *et al.* (2012) sugieren que las láminas y bandas onduladas de materia orgánica también podrían representar episodios de colonización bacteriana. Schieber (1999) indica que la presencia de filamentos dentro de las láminas onduladas es un indicador para determinar el origen microbiano de la laminación. Éste es el caso de la Formación Agua Nueva, en la que se han descrito filamentos dentro de algunas láminas de materia orgánica. Por otra parte, la coloración café-rojiza con tonalidades oscuras que presentan las láminas y bandas de materia orgánica, muy similares a las mostradas por los filamentos, sugieren un origen asociado a actividad microbiana.

Diversos tipos de microorganismos filamentosos pueden contribuir significativamente a la acumulación de materia orgánica en el medio marino anóxico (Pacton *et al.*, 2008). En la Formación Agua Nueva de Xilitla, se han distinguido tres tipos de filamentos posiblemente asociados a microorganismos, sin embargo, la determinación taxonómica de estos filamentos se mantiene incierta.

Observaciones mediante MEB revelan que los filamentos observados a escala micrométrica presentan estructuras aparentemente cilíndricas, alargadas y septadas muy similares a filamentos de cianobacterias descritos por Della Porta *et al.* (2003) en calizas rojas del Carbonífero de España. Debido a la naturaleza fototrópica de este tipo de bacterias, es posible que estos organismos hayan sido parte de la biota planctónica en la columna de agua durante la acumulación de la Formación Agua Nueva; sin embargo, se requerirían más evidencias para confirmar esta hipótesis.

Los filamentos milimétricos con división interna presentan estructuras muy similares a septos o tricomas monoserials de diferentes tipos algales. Dado que en la actualidad las algas que pueden presentar filamentos son de muy diversos grupos (Chlorophyta o algas verdes, Phaeophyta o algas café, y Rhodophyta o algas rojas), y que pueden presentarse en el mismo lugar uno o más grupos, esto podría explicar la diversidad de filamentos. Ninguno de estos grupos han sido reportados como bentónicos, pero pueden estar en los límites de la zona fótica y haber llegado al fondo marino. Las características visibles y los tamaños reportados sugieren un origen algal para los filamentos septados, más que bacteriano. En ausencia de características distintivas es difícil asignar a estos filamentos a un grupo microbiano determinado.

Los filamentos milimétricos sin división interna aparente presentan morfologías tubulares de tipo monoserial, muy similares a los filamentos y/o fundas de origen bacteriano descritas por Butterfield (2009) en sedimentos del Precámbrico. La aparente ausencia de la segmentación en algunos filamentos rojos podría ser el resultado de la preservación de materia extracelular que rodea a los filamentos, tales como fundas, las cuales son estructuras que envuelven filamentos de diversos tipos de microorganismos

(Konhauser, 2007). Ángeles-Trigueros *et al.* (2012) describen en las calizas de la Formación Agua Nueva en Xilitla fundas de filamentos de origen bacteriano (estructuras tipo *sheaths*) preservadas en pirita sedimentaria. Este hallazgo, más la evidencia petrográfica aquí documentada, apoya la presencia de actividad microbiana en las calizas de la Formación Agua Nueva.

La formación de ciertos granos cubiertos (tipo ooide y micro-oncoide) encontrados en las calizas de la Formación Agua Nueva podría ser también consecuencia de una actividad microbiana. Estas partículas presentan en su estructura interna láminas muy similares a algunos filamentos encontrados en los carbonatos laminados con materia orgánica. Comúnmente, estas estructuras son formadas

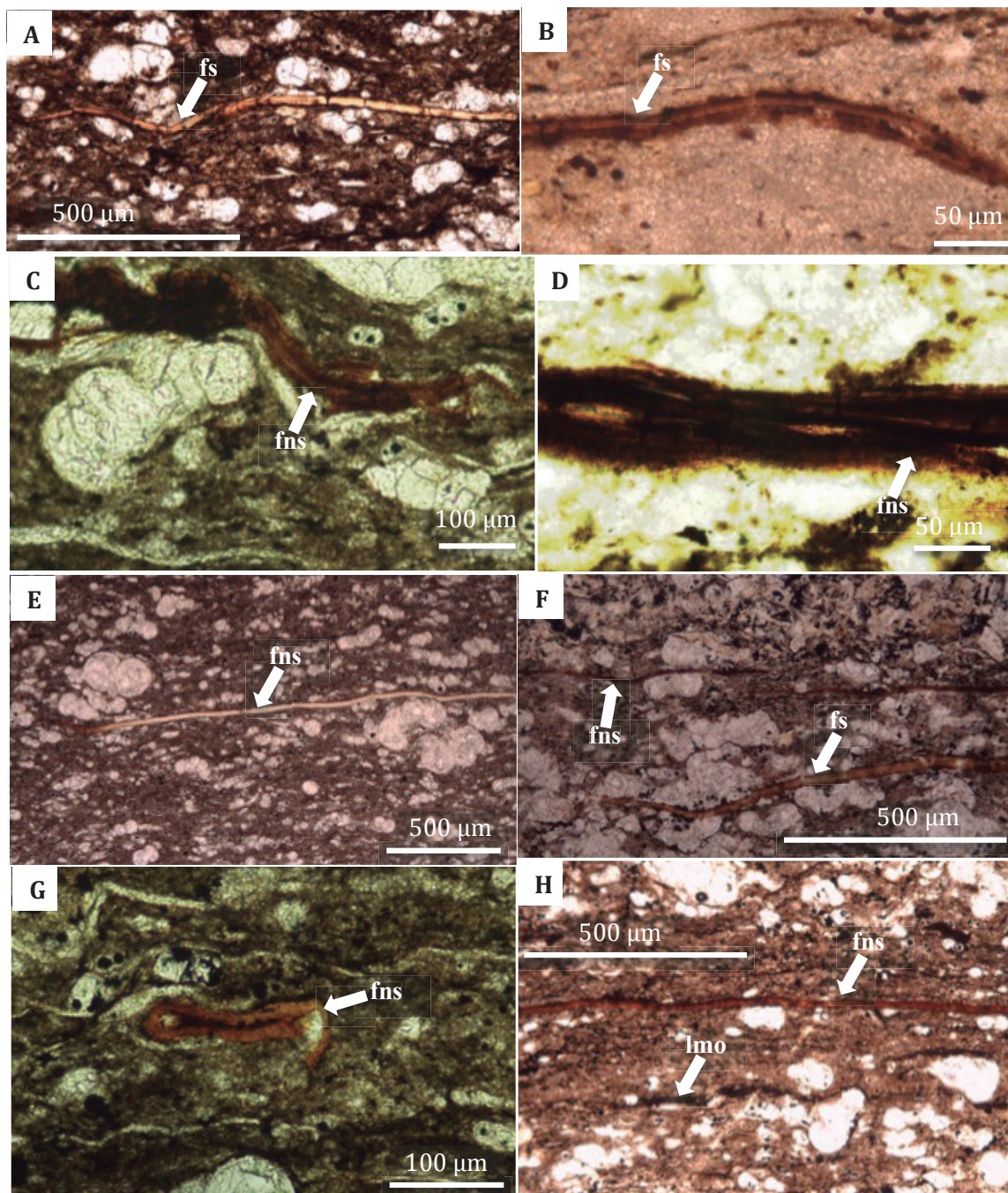


Figura 8. Fotomicrografías de filamentos en secciones delgadas de la facies de calizas laminadas de la Formación Agua Nueva, San Luis Potosí. A) Filamento con estructura interna a manera de septos sin indentación (fs); B) Acercamiento de A mostrando división interna; C y D) Estructura biomórfica mostrando estriaciones longitudinales; E) Estructura filamentosas sin división interna aparente (fns); F) Filamentos septados (fs) y no septados (fns) mostrando disposición sub-paralela al plano de estratificación; G) Estructura filamentosas no septada enrollada (fns); H) Estructura filamentosas sin división interna (fns) embebida en una lámina de materia orgánica (lmo) mostrando misma disposición sub-paralela al plano de sedimentación

en ambientes marinos someros (Rankey y Reeder, 2009) y son poco comunes en ambientes profundos. La causa de la presencia de granos cubiertos en depósitos de aguas profundas de la Formación Agua Nueva y bajo condiciones deficientes de oxígeno es aún una interrogante. Una primera explicación sería el origen alóctono de estos granos cubiertos. Por su tamaño, los granos cubiertos reportados en este estudio podrían representar clastos retrabajados procedentes de zonas someras en las partes frontales o de atrás del arrecife, en este caso provenientes de la Formación El Abra, en el límite este de la cuenca Tampico-Misantla, y que son transportados hacia aguas profundas a través de corrientes turbidíticas y flujos de escombros canalizados (López-Doncel, 2003). Una segunda posibilidad es su origen pelágico ya que algunos granos cubiertos se encuentran embebidos en el sedimento mostrando el arreglo típico de una producción o crecimiento *in situ* (Figura 9A). Esta situación ya fue descrita y reportada por Jenkyns (1972), Massari y Dieni (1983) y Haggerty y Premoli-Silva (1987), quienes observaron granos cubiertos y ooides con características muy similares a los del presente estudio y

a los que le atribuyen un origen de aguas más profundas, incluso por debajo de la base de zonas fóticas (Haggerty y Premoli-Silva, 1987). Adicionalmente, Brehm *et al.* (2003) lograron producir partículas tipo ooide bajo condiciones de laboratorio, utilizando cianobacterias (*Phormidium* sp.), diatomeas bentónicas (*Novicula perminuta*) y biopelículas de bacterias heterotróficas, lo que indica que el origen de estos granos cubiertos no es estrictamente inorgánico.

Por último, la presencia de pirita sedimentaria en forma de láminas y framboides representa otra evidencia de actividad microbiana en las calizas estudiadas. Blanco *et al.* (2010), Ángeles-Trigueros *et al.* (2012), Blanco-Piñón *et al.* (2012) y Blanco *et al.* (2013) reportaron en capas de la Formación Agua Nueva la presencia de estructuras biomórficas microscópicas en forma de cocos y bacilos, así como polen y fundas de filamentos, lo que confirma el origen sedimentario de este mineral. Por otra parte, la presencia de pirita dispuesta en framboides aislados dentro de la matriz y dentro de las cámaras de foraminíferos planctónicos, así como dentro de las láminas onduladas, también sugiere la actividad bacteriana (Sur *et al.*, 2006). Aunque se ha

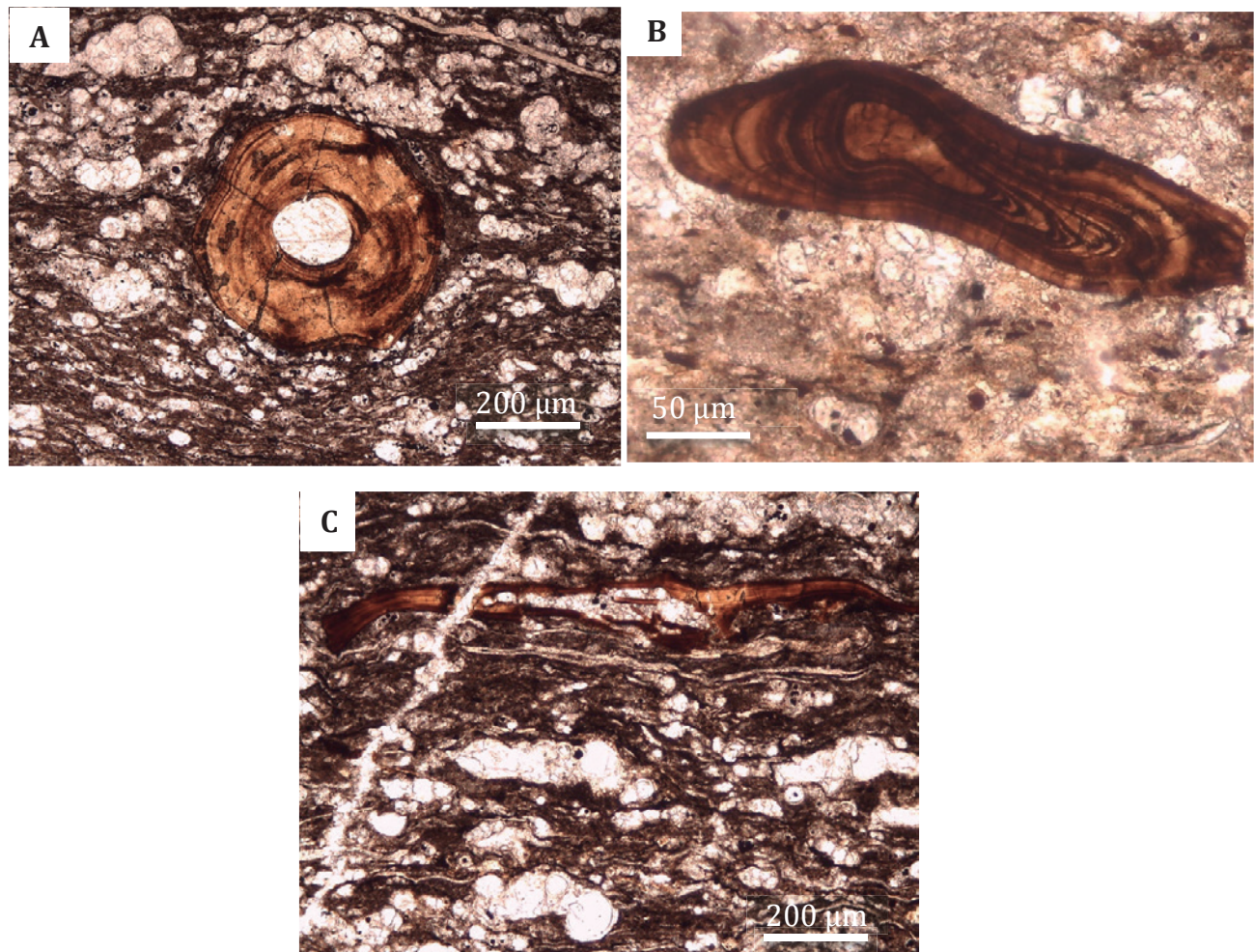


Figura 9. Fotomicrografía de granos cubiertos. A) Partícula sub-esférica con una cubierta de tipo ooide; B) Partícula de forma irregular con cubierta tipo micro-oncoide; C) Estructura biogénica no determinada posiblemente de origen algal.

debatido sobre el origen biótico y abiótico de los framboides, es conocido que en medios sedimentarios deficientes en oxígeno dichas estructuras tienen una relación muy cercana con materia orgánica en descomposición a través de diversos procesos bacterianos en los que se producen componentes de azufre (Folk, 2005). Tanto en las láminas como dentro de las cámaras de foraminíferos (entre otros organismos), la materia orgánica y los microorganismos que la descomponen están presentes. También estarían presentes las bacterias que inducen a la formación de sulfuro como componente para la formación de pirita sedimentaria (Canfield y Reisswell, 1991). La presencia de microorganismos (sulfo- y sulfato-bacterias) es precisa para formar la pirita (Berner, 1969; Canfield y Reisswell, 1991) en este tipo de ambientes. Por otro lado, la detección de ciertos rasgos presentes en la pirita framboidal, tales como películas microbianas o bacterias fosilizadas dentro de la estructura framboidal, son requeridos para establecer si ésta es de origen microbiano (Merinero-Palomares *et al.*, 2010). Numerosos ejemplos de framboides en cámaras de organismos marinos asociados a actividad microbiana han sido previamente descritos por Love y Murray (1963) para foraminíferos, ostrácodos y radiolarios, y por Clark y Lutz (1980) dentro de conchas de moluscos actuales.

6. Conclusiones

Durante el depósito de la Formación Agua Nueva en Xilitla, la presencia de la pirita sedimentaria, la laminación paralela fina así como la existencia de materia orgánica ($C_{org} > 1\%$), sugieren condiciones deficientes de oxígeno en el depósito de la caliza oscura laminada estudiada. Por otra parte, los contenidos bajos de materia orgánica ($C_{org} < 1\%$) y la presencia de bioturbación y elementos bentónicos en las capas no laminadas indican la existencia de las condiciones óxicas, que alternaron con las condiciones deficientes de oxígeno durante el depósito de la Formación Agua Nueva en Xilitla.

La abundancia de láminas y bandas onduladas ricas en materia orgánica y de una amplia variedad de filamentos microscópicos sugiere la presencia de microorganismos de naturaleza algal y posiblemente bacteriana, los cuales constituyeron una fuente importante del contenido orgánico del sedimento, junto con la aportación realizada por la acumulación de organismos planctónicos (por ejemplo cianobacterias) y nectónicos.

La presencia del foraminífero planctónico *Rotalipora cushmani* en la base, y del bivalvo *Inoceramus labiatus* en el techo (Blanco-Piñón *et al.*, 2008), sugieren que la unidad estudiada fue depositada desde el Cenomaniano Tardío hasta el Turoniano basal, coincidiendo con el Evento de Anoxia Oceánica 2 o Evento Bonarelli. No obstante, estudios bioestratigráficos y geoquímicos detallados se requieren para establecer una correlación más precisa.

Agradecimientos

A.B. agradece al Programa de Mejoramiento al Profesorado (PROMEP: 72636363) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT Ciencia Básica 2007. No. 83849) por proporcionar financiamiento para la realización de este trabajo. También se agradece a Gustavo Quetzalpilli Sánchez Juráquez (UAEH) por su colaboración en la edición de las figuras ilustradas en este trabajo.

Referencias

- Ángeles-Trigueros, S.A., Blanco-Piñón, A., Hernández-Ávila, J., Zavala-Díaz de la Serna, F.J., 2012, Bioformas microscópicas en pirita sedimentaria y sus implicaciones astrobiológicas (resumen), en VIII Reunión de la Sociedad Mexicana de Astrobiología: Cuernavaca, Morelos, México, Sociedad Mexicana de Astrobiología y Universidad Autónoma del Estado de Morelos, 59-62.
- Arp, G., Reimer, A., Reitner, J., 2001, Photosynthesis-induced biofilm calcification and calcium concentrations in Phanerozoic oceans: Science, 292, 1701-1704.
- Awramik, S.M., 1984, Ancient stromatolites and microbial mats, en Cohen, Y., Castenholz, R.W., Halvorson, H.O. (eds.), Microbial Mats: Stromatolites: Nueva York, Alan R. Liss Inc., 1-22.
- Berner, R.A., 1969, The synthesis of framboidal pyrite: Economic Geology, 64, 383-384.
- Blanco, A., Maurrasse, F., Duque-Botero, F., Alvarado-Ortega, J., 2006, Lower Turonian Fossil Lagerstätten in Mexico: their relationship to OAE-2 (resumen), en Geological Society of America Annual Meeting: Filadelfia, EUA, Geological Society of America, Abstracts with Programs, 38, 148.
- Blanco, A., Ángeles-Trigueros, S.A., Castañeda-Posadas, C., Ambrocio-Cruz, S.P., 2013, Fossilized pollen grains in sedimentary pyrite and its significance for life prospectation in Mars (Resumen): Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Tx, EUA., Lunar and Planetary Institute 3060.
- Blanco, A., Zavala, F. J., Hernández-Ávila, J., Maurrasse, F., Duque-Botero, F., Ramírez-Cardona M., 2010, Microbial preservation in sedimentary pyrite from Cretaceous organic matter-rich carbonate mudstone: a preliminary report (Resumen): Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Tx, EUA, Lunar and Planetary Institute 2487.
- Blanco-Piñón, A., Maurrasse, F.J.-M.R., Rojas-León, A., Duque-Botero, F., 2008, Cyanobacteria/Foraminifera Association from Anoxic/Dysoxic Beds of the Agua Nueva Formation (Upper Cretaceous - Cenomanian/Turonian) at Xilitla, San Luis Potosi, Central Mexico (resumen), en The meeting of the Americas: Fort Lauderdale, Florida, EUA, American Geophysical Union, 24.
- Blanco-Piñón, A., Ángeles-Trigueros, S.A., Hernández-Ávila, J., Zavala-Díaz de la Serna, F.J., 2012, SEM imaging of biostructures in Upper Cretaceous sedimentary pyrite: an astrobiological approach (resumen), en Geological Society of America Annual Meeting: Charlotte, Carolina del Norte, EUA, Geological Society of America, Abstracts with Programs, 44, 75.
- Bontognali, T.R.R., Sessions, A.L., Alwood, A.C., Fischer, W.W., Grotzinger, J.P., Summons, R.E., Eiler, J.M., 2012, Sulfur isotopes of organic matter preserved in 3.45-billion-year-old stromatolites reveal microbial metabolism: Proceedings of the National Academy of Sciences, 109, 15146-15151.
- Bose, S., Chafetz, H.S., 2011, Morphology and distribution of MISS: a comparison between modern siliciclastic and carbonate settings, en Nofke, N., Chafetz, H. (eds), Microbial mats in siliciclastic depositional systems through time: Tulsa, Society for Sedimentary Geology, 3-14.

- Brasier, M.D., Green, O.R., Steele, A., Van Kranendonk, M., Jephcoat, A.P., Kleppe, A.K., Lindsay J.F., Grassineau, N.V., 2002, Archaean cyanobacteria, ghost in the machine? (Resumen): Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Tx, EUA., Lunar and Planetary Institute, 1614.
- Brehm, U., Palinska, K.A., Krumbein, W.E., 2003, Laboratoty cultures of calcifying biomicrospheres generate ooids – A contribution to the origin of oolites: *Carnets de Géologie / Notebooks on Geology*, Maintenon Letter, 2004/03, CG2004-L03.
- Butterfield, N., 2009, Modes of pre-Ediacaran multicellularity: *Precambrian Research*, 173, 201-211.
- Calner, M., Erikson, M. A., 2011, The record of microbially induced sedimentary structures (MISS) in the Swedish Paleozoic, *en* Nofke, N., Chafetz, H. (eds), *Microbial mats in siliciclastic depositional systems through time*: Tulsa, Society for Sedimentary Geology, 29-35.
- Canfield D.E., Raiswell, R., 1991, Pyrite formation and fossil preservation, *en* Allison P.A., Briggs, D.E.G. (eds), *Taphonomy: Releasing data locked in the fossil record*: Nueva York, Plenum Press, 338-387.
- Clark, G.R.II., Lutz, R.A., 1980, Pyritization in the shells of living bivalves: *Geology*, 8, 268-271.
- De Gregorio, B.T., Sharp, T.G., 2003, Determining the biogenicity of microfossils in the Apex Chert, Western Australia, using Transmission Electron Microscopy (Resumen): Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Tx, EUA., Lunar and Planetary Institute 1267.
- Della Porta, G., Mamet, B., Préat, A., 2003, Microbial mediation in the formation of red limestones, Upper Carboniferous, Cantabrian Mountains, Spain (resumen), *en* XV International Congress on Carboniferous and Permian Stratigraphy: Utrech, Países Bajos, The Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences (Proceedings), 10-16.
- Duque-Botero, F., 2006, Paleoenvironmental implications of the Indidura Formation (Cenomanian/Turonian), Northeastern Mexico: a high resolution stratigraphic study: Miami-Dade, Florida, EUA, Florida International University, tesis doctoral, 172 p.
- Duque-Botero, F., Maurrasse F.J-M-R., 2005, Cyanobacterial productivity, variations in the organic carbon, and facies of the Indidura Formation (Cenomanian-Turonian), Northeastern Mexico: *Journal of Iberian Geology*, 31, 85-98.
- Duque-Botero, F., Maurrasse, F.J-M-R., 2008, Role of cyanobacteria in C_{org} -rich deposits: an example from the Indidura Formation (Cenomanian – Turonian), northeastern Mexico: *Cretaceous Research*, 29, 957-964.
- Duque-Botero, F., Maurrasse, F.J-M-R., Hickey-Vargas, R., Melinte, M., Jaffe, R., Lopez-Oliva, J.G., 2009, Microspheroids accumulation and geochemistry of an anoxic basin of the Cenomanian/Turonian: The record of the Indidura Formation, NE Mexico, *en* Demchuk, D., Gary, A.C. (eds), *SEPM-Geologic Problem Solving with Microfossils: A Volume in Honor of Garry D. Jones*: Tulsa, Society of Sedimentary Geology Special Publication, 93, 171 -186.
- Feng, Q., Gong, Y-M., Riding, R., 2010, Mid-late Devonian calcified marine algae and cyanobacteria, South China: *Journal of Paleontology*, 84, 569-587.
- Flügel, E., 2004, *Microfacies of carbonate rocks—Analysis, interpretation and application*: Berlin-Heidelberg, Springer, 976 p.
- Folk, R., 1993, SEM imaging of cyanobacteria and nannobacteria in carbonate sediments and rocks: *Journal of Sedimentary Petrology*, 63, 990-999.
- Folk, R., 1999, Nannobacteria and the precipitation of carbonate in unusual environments: *Sedimentary Geology*, 126, 47-55.
- Folk, R.L., 2005, Nannobacteria and the formation of framboidal pyrite: Textural evidence: *Journal of Earth System Science*, 114, 369-374.
- Folk, R.L., Chafetz, H.S., 2000, Bacterially induced microscale and nanoscale carbonate precipitates, *en* Riding R.E., Awramik S.M. (eds), *Microbial Sediments*: Berlin, Springer, 40-49.
- Folk, R., Lynch, F.L., 1997, Nannobacteria are alive on Earth as well as Mars: *Proceedings of the International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation (SPIE)*, 3111, 406-419.
- Haggerty, J.A., Premoli-Silva, I., 1986, Ooids and shallow-water debris in Albian-Aptian sediments from the East Mariana Basin, Deep Sea Drilling Project site 585: Implications for the environment of formation of the ooids: *Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project*, 89, 399-427.
- Jenkyns, H.C., 1972, Pelagic "oolites" from the Tethyan Jurassic: *The Journal of Geology*, 80, 21-33.
- Kaźmierczak, J., Alterman, W., 2002, Neoproterozoic mineralization by benthic cyanobacteria: *Science*, 298, 2351.
- Kaźmierczak, J., Coleman, M., Gruszczynski, M., Kempe, S., 1996, Cyanobacterial key to the genesis of micritic and peloidal limestone in ancient seas: *Acta Paleontologica Polonica*, 41, 319-338.
- Kaźmierczak, J., Kempe, S., Alterman, W., 2004, Microbial origin of Precambrian carbonates: lessons from modern analogues, *en* Erikson, P.G., Alterman, W., Nelson, D.R., Mueller, W.U., y Catuneanu (eds): *The Precambrian Earth—Tempos and Events*, Amsterdam, Elsevier, 545-564.
- Konhauser, K., 2007, *Introduction to Geomicrobiology*: Oxford, Blackwell Publishing, 425 p.
- Kremer, B., 2006, Mat-forming coccoid cyanobacteria from early Silurian marine deposits of Sudetes, Poland: *Acta Paleontologica Polonica*, 51, 143-154.
- López-Doncel, R., 2003, La Formación Tamabra del Cretácico medio en la porción central del margen occidental de la Plataforma Valles-San Luis Potosí, centro-noreste de México: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 20, 1-19.
- Love, L.G., Murray, J.W., 1963, Biogenic pyrite in recent sediments of Christchurch Harbour, England: *American Journal of Science*, 261, 433-448.
- Maldonado-Koerdell, M., 1956, Peces fósiles de México III. Nota preliminar sobre peces del Turoniano Superior de Xilitla, San Luis Potosí, México: *Ciencia, México*, 16, 31-36.
- Massari, F., Dieni, I., 1983, Pelagic oncooids and ooids in the middle-upper Jurassic of eastern Sardinia, *en* Peryt, T.M. (ed.), *Coated Grains*: Nueva York, Springer-Verlag, 367-376.
- Merinero-Palomares, R., Lunar-Hernández, R., Martínez-Frías, J., 2010, Carbonatos metanógenos y pirita framboidal autigénica: geomarcadores de la actividad de organismos quimiosintéticos en el Golfo de Cádiz: *Macla*, 12, 29-37.
- Morris, P.A., Wentworth, S.J., Allen, C.C., McKay, D.S., 1998, Possible microfossils (Warrawoona Group, Towers Formation, Australia, ~3.3-3.5GA): Workshop on the Issue of Martian Meteorites. Houston Tx, EUA, Lunar and Planetary Institute, 7033.
- Negra, M.H., Zagrarni, M. F., Hanini, A., 2011, The filament event near the Cenomanian-Turonian boundary in Tunisia: filament origin and environmental signification: *Bulletin de la Société Géologique de France*, 182, 507-519.
- Nofke, N., Chafetz, H., 2011, Introduction, *en* Nofke, N., Chafetz, H. (eds), *Microbial mats in siliciclastic depositional systems through time*: Tulsa, Society of Sedimentary Geology, 1.
- Pacton, M., Gorin, G.E., Fiet, N., 2008, Unraveling the origin of ultralaminae in sedimentary organic matter: the contribution of bacteria and photosynthetic organisms: *Journal of Sedimentary Research*, 78, 654-667.
- Pichevin, C., Bertrand, P., Bousafier, M., Dibnar, J.R., 2004, Organic matter accumulation and preservation controls in a deep-sea modern environment: an example from Namibian slope sediments: *Organic Chemistry*, 35, 543-559.
- Rankey, E.C., Reeder, S.L., 2009, Holocene ooids of Aitutaki Atoll, Cook Islands, South Pacific: *Geology*, 37, 971-974.
- Riding, R., 2000, Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms: *Sedimentology*, 47 (Supplement 1), 179-214.
- Ridding, R., 2006, Microbial carbonate abundance compared with fluctuation in metazoan diversity over geological time: *Sedimentary Geology*, 185, 229-238.

- Rojas-León, A., Blanco-Piñón, A., Maurrasse, F., J-M.R., Hernández-Ávila, J., 2008, Contenido de materia orgánica en los sedimentos de la Formación Agua Nueva (Cenomaniano/Turoniano) en Xilitla, San Luis Potosí y su relación con el OAE2: *Actas Inageq*, 18, 55-57.
- Schieber, J., 1999, Microbial mats in terrigenous clastics: the challenge of identification in the rock record: *Palaaios*, 14, 3-12.
- Schieber, J. 2002a, Sedimentary pyrite: A window into the Microbial Past: *Geology*, 30, 531-534.
- Schieber, J., 2002b, The role of an organic slime matrix in the formayion of pyritized burrows trails and pyrite concretions: *Palaaios*, 104-109.
- Schieber, J., 2005, Granular microbial habits built from iron sulfides: alternative microbial lifestyles? (Resumen): Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Tx, EUA., Lunar and Planetary Institute 1972.
- Schieber, J., 2007, Oxidation of detrital pyrite as a cause for Marcasite Formation in marine lag deposits from the Devonian of the eastern US: *Deep-Sea Research II*, 54, 1312-1326.
- Scholle, P.A., Arthur, M.A., Ekdale, A., 1983, Pelagic Environment, *en* Scholle, P.A., Debout, D.G., Moore, H. (eds.), Carbonate depositional environments: Tulsa, American Association of Petroleum Geologists, 619-691.
- Scholle, A.P., Ulmer-Scholle, D.S., 2003, A color guide to the petrography of carbonate rocks: grains, textures, porosity, diagénesis: Tulsa, American Association of Petroleum Geologists Publications, 457.
- Stal, L.J., Krumbein, W.E., 1986, Metabolism of cyanobacteria in anaerobic marine sediments: *Actes de Colloques*, 3, 301-309.
- Stivaletta, N., Barbieri, R., Marinangeli, L., Ori, G.G., Bosco, M., 2005. Fossil endolithic cyanobacteria in evaporites: implications for the astrobiological exploration (Resumen): Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Tx, EUA., Lunar and Planetary Institute, 1354.
- Sur, S., Schieber, J., Barnerjee, S., 2006, Petrographic observations suggestive of microbial mats from Rampur Shale and Bijaigarh Shale, Vindhyan basin India: *Journal of Earth System Science*, 115, 61-66.
- Suter, M., 1991, Carta Geológica de México Hoja Tamazunchale, 14Q-e(5), 1:1000000: México D.F., Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, 1 mapa y texto explicativo.
- Takahashi, M., Ichimura, S., 1968, Sulfur bacteria as primary producers in stagnant lakes: *Limnology and Oceanography*, 13, 644-655.
- Tang, D-J., Shi, X-Y., Jiang, G., Wang, X-Q., 2011, Morphological association of microbially induced sedimentary structures (MISS) as a paleoenvironmental indicator: an example from the proterozoic succession of the southern North China Platform, *en* Nofke, N., Chafetz, H. (eds). Microbial mats in siliciclastic depositional systems through time: Tulsa, Society of Sedimentary Geology, 3-14.
- Tucker, M.E., Wright, V.P. 1990, Carbonate sedimentology: Cambridge, Blackwell Science, 482 p.
- Walter, M.R., Bauld, J., Des Marais, D.J., Schopf, J. W., 1992, A general comparison of microbial mats and microbial stromatolites: Bringing the gap between the modern and the fossils, *en* Schopf, J.W., Klein, C. (eds), The Proterozoic Biosphere: an interdisciplinary study: Nueva York, Cambridge University Press, 335-338.
- Whitton, B.A., Potts, M., 2002, The ecology of cyanobacteria—Their diversity in time and space: New York, Kluwer Academic Publishers, p. 669.

Manuscrito recibido: Julio 4, 2013.

Manuscrito corregido recibido: Febrero 15, 2014.

Manuscrito aceptado: Febrero 25, 2014.