

Estromatolitos: las rocas construidas por microorganismos

Marta Rodríguez-Martínez¹. Silvia Menéndez². Elena Moreno-Eiris³.
Amelia Calonge¹. Antonio Perejón³. Joachim Reitner⁴.

¹ Departamento de Geología, Universidad de Alcalá. ² Museo Geominero, Instituto Geológico y Minero de España. ³ Departamento de Paleontología-Instituto de Geología Económica (UCM-CSIC).

⁴ Geowissenschaftliches Zentrum Göttingen, Abt. Geobiologie, Göttingen, Germany.

marta.rodriguez@uah.es s.menendez@igme.es eiris@geo.ucm.es

a.calonge@uah.es aparqueo@geo.ucm.es jreitne@gwdg.de

Resumen: Los estromatolitos adquieren una relevante importancia ya que constituyen una de las primeras pruebas del origen de la vida. En este trabajo, con objeto de facilitar la comprensión y el conocimiento de los estromatolitos, como rocas bioconstruidas por la actividad de microorganismos, se reseña de forma didáctica la génesis, los componentes, los ambientes donde se desarrollan y la distribución en el tiempo geológico. Al final del texto se adjuntan cuatro anexos en formato de paneles expositivos donde se sintetiza toda la información y una ficha didáctica para valorar la comprensión de estos paneles.

Palabras clave: Estromatolitos. Microorganismos. Cianobacterias. Arcaico. Proterozoico.

INTRODUCCIÓN

Con motivo del centenario de la propuesta del término **estromatolito** se han celebrado durante el año 2009 diversas reuniones científicas y divulgativas sobre estas singulares rocas. ¿Pero qué son exactamente y por qué despiertan tanto interés los estromatolitos dentro de la comunidad científica?

Para responder de manera sencilla a estas preguntas, se organizó durante la IX Semana de la Ciencia de Castilla-La Mancha una exposición con muestras de estromatolitos, paneles explicativos y hojas de actividades didácticas. Los paneles completos y la hoja didáctica de la Exposición se adjuntan como Anexos I al IV en este trabajo. La información sobre los estromatolitos se ha estructurado en cuatro paneles (Anexos I a III) utilizando como hilo conductor un estilo directo de preguntas y enunciados cortos:

- ¿Qué son los estromatolitos? ¿Cómo podemos saber si una roca es un estromatolito?

- ¿Qué microorganismos forman los estromatolitos? ¿Cómo se transforman los biofilms en estromatolitos?
- La historia de los estromatolitos: un viaje de 3.500 millones de años.
- ¿Dónde se desarrollan hoy los estromatolitos?

La exposición estaba dirigida a estudiantes de Enseñanza Secundaria y para el público en general y tuvo una gran acogida entre ambos sectores, a pesar de que la inmensa mayoría jamás había oído hablar de los estromatolitos.

Sin embargo los estromatolitos son considerados como una de las primeras evidencias macroscópicas de la aparición de la vida en el registro fósil de nuestro planeta (SCHOPF, 1996), hace unos 3.500 millones de años. Los microorganismos que generan estas rocas son la forma de vida dominante durante el 80% de la historia de la vida en la Tierra (WALTER, 1994; GROTZINGER y KNOLL, 1999) y representan por tanto, el registro de los primeros ecosistemas de comunidades microbianas bentónicas que poblaron la Tierra.

La búsqueda de las trazas de los primeros restos de vida en nuestro planeta no es sencilla, para ello se utiliza el registro de señales geoquímicas (isótopos y biomarcadores), microfósiles y estromatolitos.

Desde el punto de vista geobiológico los estromatolitos constituyen, sin duda, un registro inigualable para estudiar las interacciones entre la biosfera y la geosfera durante los últimos 3.500 millones de años y por ello son también importantes objetos de estudio dentro del campo de la Astrobiología, en la búsqueda de vida en otros planetas.

¿QUÉ SON LOS ESTROMATOLITOS?

Cuando a principios del siglo XIX los geólogos comenzaban a encontrarse con estas extrañas rocas internamente laminadas, no entendían muy bien cómo se formaban, si bien intuían que su origen podía estar relacionado con algún tipo de organismo, desconocido hasta el momento. De ahí que surgieran nombres como el de *Cryptozoon proliferum* (HALL, 1883) o fueran comunes las comparaciones con fósiles con estructura laminada como los estromatoporoides (que son un grupo extinguido de invertebrados marinos relacionados con las esponjas).

En 1908 Ernst Louis KALKOLWSKY (Fig. 1) acuñó la palabra **estromatolito** (del griego '*stroma*' o tapiz y '*lito*' o roca) para describir unas curiosas rocas sedimentarias, formadas en ambiente lacustre durante el Triásico inferior, cerca de las montañas de Harz en Alemania. El término estromatolito ha tenido desde entonces muchas acepciones y modificaciones de su uso (ver discusión en RIDING, 1999), que desde los

años setenta del siglo XX pueden agruparse en tres tipos de definiciones según incluyan o no características descriptivas y/o genéticas (RIDING, 2000): i) carácter laminado y origen microbiano (KALKOLWSKY, 1908); ii) origen microbiano (AWRAMIK Y MARGULIS, 1974); iii) carácter laminado (SEMIKHATOV *et al.*, 1979).

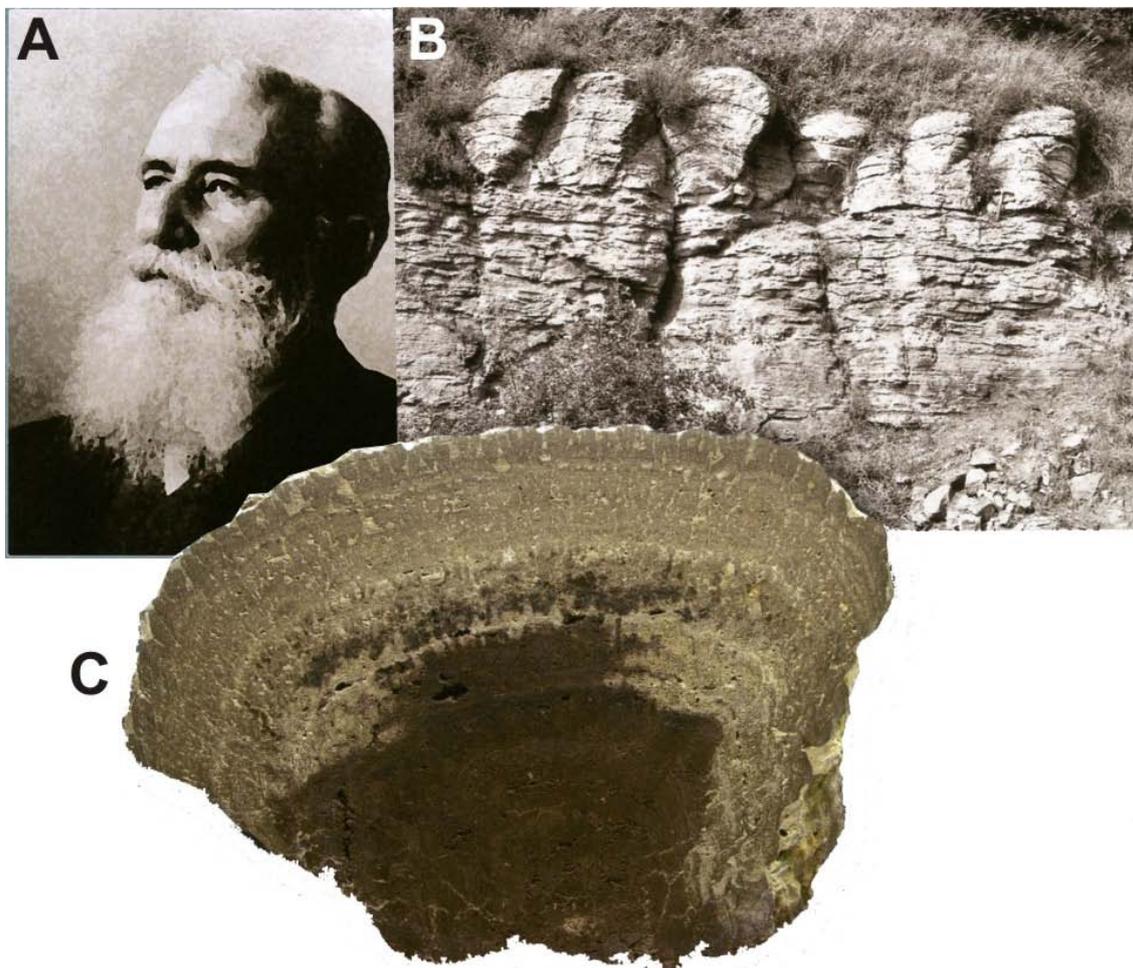


Figura 1. A. Ernst Louis Kalkowsky fue quien acuñó en 1808 el término estromatolito. B. Afloramiento de los materiales del Buntsandstein (Triásico) de la localidad tipo en dónde se definieron los estromatolitos, cerca de Heesbergs, Alemania. (Fotografía de J. Paul). C. Muestra del Museo Geocientífico de Göttingen (Georg- August University of Göttingen, Alemania) de un estromatolito de la localidad tipo en donde Kalkowsky definió por primera vez dichas estructuras.

Hasta las décadas de los cincuenta y sesenta del siglo pasado no se realizaron los primeros estudios sobre estromatolitos ‘vivos’ (formándose en ambientes actuales) no se comenzó a comprender los mecanismos de crecimiento y la complejidad de estas estructuras.

Hoy sabemos que [los estromatolitos son estructuras organosedimentarias litificadas laminadas, formadas por la actividad de microorganismos que atrapan y fijan el sedimento o producen la precipitación de minerales](#). Es decir, la formación y crecimiento de los estromatolitos están controlados por la interacción entre procesos

físicos, químicos y biológicos (Fig. 2). Si bien es cierto que no siempre es fácil diferenciar la relevancia o protagonismo que cada uno de ellos jugó en la formación de los estromatolitos fósiles, sobre todo en los del Precámbrico, aunque el estudio detallado de las fábricas de la roca puede ayudar a comprender la importancia de cada uno de estos procesos (RIDING, 2008).



Figura 2. Representación gráfica del concepto de transformación de los sedimentos y organosedimentos en cuerpos de rocas sedimentarias con el transcurso del tiempo geológico.

¿CÓMO PODEMOS SABER SI UNA ROCA ES UN ESTROMATOLITO?

El término **microbialita** acuñado por BURNE y MOORE (1987) agrupa al conjunto de depósitos organosedimentarios formados por la acción de microorganismos, pero únicamente los **estromatolitos** son microbialitas que presentan una mesoestructura laminada.

Existen cuatro escalas de estudio u observación de las morfologías de crecimiento de los estromatolitos (Fig. 3).

- La geometría externa (megaestructura y macroestructura).
- La presencia y forma de su laminación interna (mesoestructura).
- La textura.
- La fábrica de los minerales que lo componen (microestructura).

Las tres primeras son observables a simple vista y, no sin un cierto grado de experiencia, son suficientemente diagnósticas para poder confirmar si una roca es o no un estromatolito. No siempre esto es sencillo sobre todo en los estromatolitos del Precámbrico, aunque el estudio de las fábricas de la roca puede ayudar a diferenciar si son o no biogénicas (RIDING, 2008).

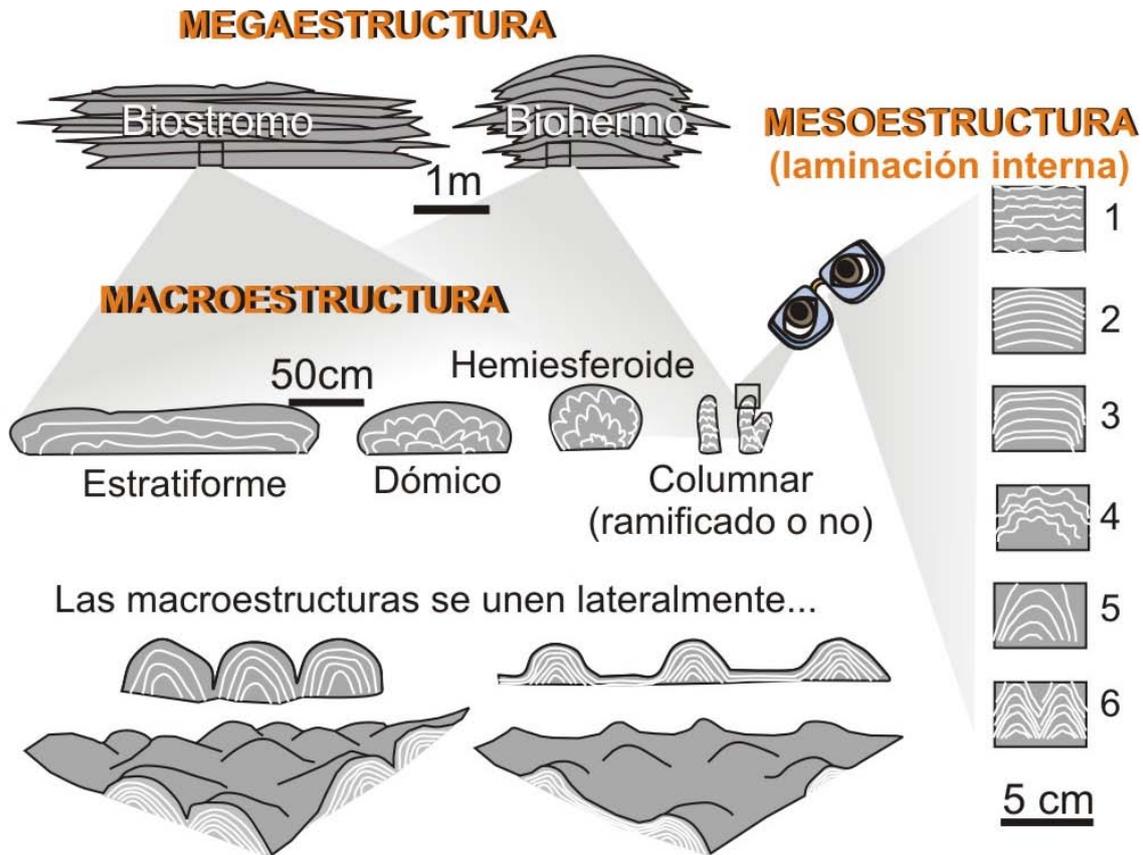


Figura 3. Escalas de observación y estudio de los estromatolitos (mega-, macro- y mesoestructura) con las principales morfologías de crecimiento y de laminación interna (1: horizontal crenulada; 2: convexa; 3: rectangular; 4: ondulada; 5: parabólica; 6: coniforme). Modificada de varios autores.

Los tipos de clasificaciones de los estromatolitos pueden ser: morfológicas (LOGAN *et al.*, 1964; HOFMANN, 1973, 2000; ALTERMANN, 2008); genéticas (RIDING, 2000); y taxonómicas binomiales (BERTRAND-SAFARTI y WALTER, 1981).

Las clasificaciones taxonómicas binomiales generales para todos los seres vivos, tuvieron una amplia difusión y uso en estudios de correlación bioestratigráfica en sucesiones del Proterozoico. Bajo el magisterio del Profesor V. P. Maslov, la escuela rusa desarrolló magníficos estudios en este sentido. Sin embargo han sido paulatinamente abandonadas fuera de este ámbito, porque el estudio de los tapices o biopelículas microbianas que construyen actualmente los estromatolitos muestra que están formados por ecosistemas con numerosas especies de microorganismos.

Dentro de las clasificaciones morfológicas es común el uso de los términos como **biostromo** o **biohermo** a escala de megaestructura, y hablar de **formas dómicas**, **columnares**, **hemisféricas** y **estratiformes** o **tabulares**, para definir la **macroestructura**. La **laminación interna** puede variar de **horizontal crenulada** a **coniforme**, que es característica en estromatolitos del Arcaico.

Los estromatolitos coniformes no sólo son comunes en el Precámbrico, en la actualidad también han sido descritos en las fuentes hidrotermales de Yellowstone y Nueva Zelanda (WALTER *et al.*, 1976; BROCK, 1978; JONES *et al.*, 2002) y en lagos de la Antártida (LOVE *et al.*, 1983; WHARTON, 1994).

¿QUÉ MICROORGANISMOS FORMAN LOS ESTROMATOLITOS?

El crecimiento de los estromatolitos responde a un proceso de litificación y acreción repetida de **biofilms** o **biopelículas microbianas** (Fig. 4), que son ecosistemas muy complejos formados por microorganismos que viven embebidos en una matriz de consistencia mucilaginosa que ellos mismos producen (llamada EPS “extracellular polymeric substances”), y que es rica en polisacáridos, aminoácidos y otros compuestos.



Figura 4. Fases en la formación de biofilms microbianos (las ciudades de los microorganismos).

La diversidad microbiana de estos **biofilms** comprende los tres dominios de la Vida (Archaea, Bacteria y Eucaria), no sólo Cianobacterias como se tiende a generalizar en el caso concreto de los estromatolitos (Fig. 5). No todos los **biofilms** producen estromatolitos, los tapices microbianos tienen una estructura muy organizada formada por Cianobacterias, Bacterias heterótrofas y quimilitotróficas.

En general, la diversidad de las especies que podemos encontrar en los tapices estromatolíticos actuales es muy elevada, como por ejemplo, dentro de las Cianobacterias podemos encontrar una amplia distribución de géneros (*Calothrix*, *Rivularia*, *Gloeotrichia*, *Homeothrix*, *Leptolyngbya*; *Plectonema*, *Phormidium*, *Microcoleus*, *Scynotema*). Son también muy comunes otras bacterias como *Chloroflexus*. Bacterias heterotróficas como *Myxococcus xanthus*. En ambientes hipersalinos como en la Bahía de Shark, en Australia, existen ejemplos de archaea halófilas como *Halococcus hamelinensis*.

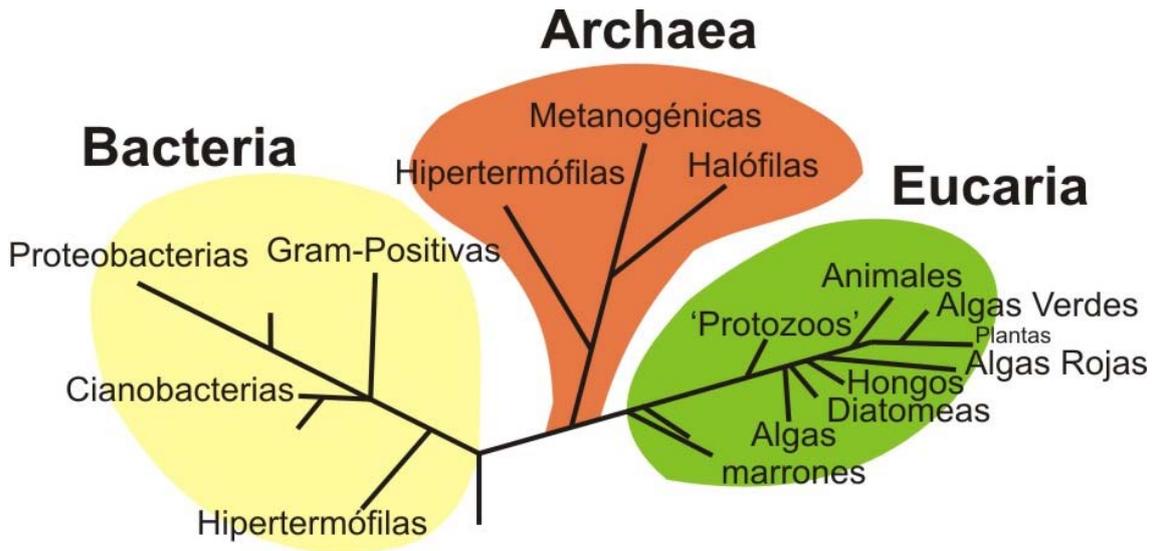


Figura 5. Los microorganismos que contribuyen a la formación de estromatolitos proceden de los tres Dominios de la Vida (Bacteria, Archaea y Eucaria).

No debemos olvidar que las algas eucariotas son igualmente importantes en muchos de estos tapices estromatolíticos, como por ejemplo es el caso de las diatomeas (*Mastoglia*, *Navicula*, *Achnantheidium*, *Amphora*, *Fistulifera*, *Gomphonema*, *Surirella*, *Diatoma*, *Staurosisa*, *Ulrana*), de las algas verdes (Chlorophyceae; Trebouxiophyceae, Ulvophyceae, Klebosormidiophyceae) y también algas rojas y marrones.

¿CÓMO SE TRANSFORMAN LOS BIOFILMS EN ESTROMATOLITOS?

Los tapices microbianos están formados por seis grupos funcionales de microbios (DUPRAZ y VISSCHER, 2005).

- **Fotótrofos oxigénicos** (Cianobacterias) que son los productores primarios, utilizando la energía solar para fijar el CO₂ y a veces el N₂.
- **Fotótrofos anoxigénicos** (Bacterias Púrpura y Verde) que usan HS⁻ como donante de electrones para realizar la fotosíntesis.
- **Bacterias heterotróficas aeróbicas** que obtienen energía de la respiración de O₂ y carbono orgánico.
- **Fermentadores** que usan el carbono orgánico y compuestos de azufre como receptores o donantes de electrones.

- **Heterótrofos anaeróbicos** (principalmente Bacterias Sulfatorreductoras) que respiran carbono orgánico con SO_4^{2-} mientras producen HS^-
- **Quimiolitoautótrofos** (Bacterias Sulfuroxidantes) que oxidan los compuestos reducidos de azufre con O_2 o nitrato mientras fijan CO_2 .

Los cambios entre la noche y el día, producen variaciones muy importantes en los procesos de fotosíntesis y respiración de los microorganismos, que se traducen en modificaciones de pH, lo que favorece que se produzcan o no ciertas reacciones químicas, como la precipitación o disolución de las diferentes fases minerales. Por tanto, la litificación repetida de los tapices estromatolíticos se produce mediante dos mecanismos principales: **mineralización *in situ*** o **atrape y fijación de sedimento** (Fig. 6). Los distintos metabolismos de los microorganismos (fotosíntesis y respiración), favorecen la mineralización o precipitación de varios minerales (calcita de alto y bajo contenido en magnesio, aragonito, dolomita, óxidos e hidróxidos de manganeso y hierro, silicatos, sulfatos, etc.). Además los propios microorganismos y las sustancias que producen (EPS) pueden atrapar y fijar partículas de sedimento (Fig. 6).

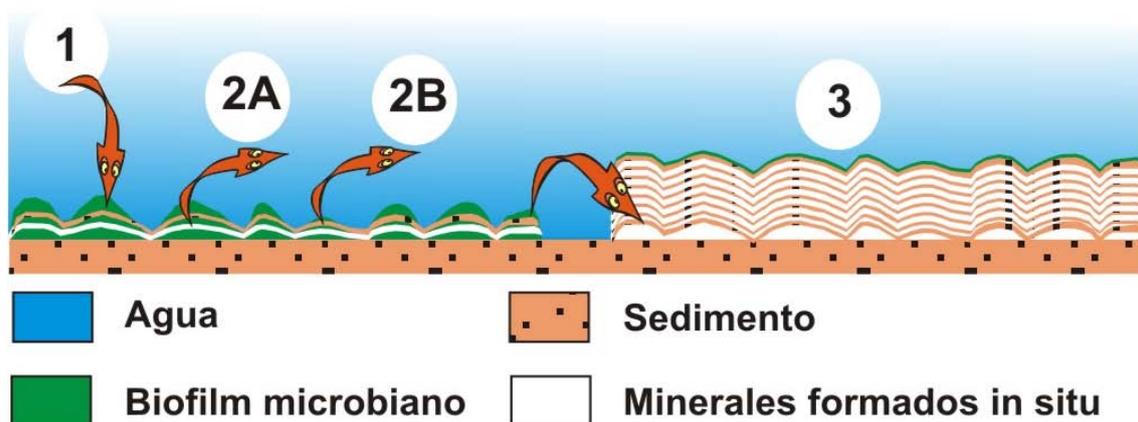


Figura 6. Mecanismos que operan en la formación de un estromatolito: mineralización *in situ* y/o atrape y fijación del sedimento. El biofilm o tapiz microbiano (1) está formado por una comunidad bentónica microbiana con una estructura compleja. Los metabolismos de la comunidad microbiana favorecen reacciones químicas en las que se produce la precipitación de fases minerales (2A). Los propios microorganismos y las sustancias que producen pueden, asimismo, atrapar y fijar el sedimento. La reiteración de estos mecanismos produce la acreción y litificación del estromatolito (3).

Durante mucho tiempo los estromatolitos “vivos” actuales de la Bahía de Shark se consideraron como posibles análogos de los estromatolitos del Arcaico. Hoy sabemos que los mecanismos de atrape y fijación de sedimento son muy importantes en la acreción de los de la Bahía de Shark pero, que sin embargo, no fueron fundamentales en los primeros estromatolitos, controlados por mecanismos de mineralización *in situ* tanto biogénica (biomineralización y organomineralización) como abiogénica. Por ello, en la actualidad se intenta buscar análogos dominados por los mecanismos de mineralización *in situ*, como por ejemplo los estromatolitos que

actualmente crecen en ambientes extremos, como es el caso de las fuentes hidrotermales de Yellowstone, donde existen tapices estromatolíticos conformes construidos por *Phormidium*.

LA HISTORIA DE LOS ESTROMATOLITOS: UN VIAJE DE 3.500 MILLONES DE AÑOS

Cuando nos asomamos al inicio del registro geológico es asombroso que se encuentren vestigios de actividad orgánica tan bien preservados y que permiten reconocer como la vida ya surgía en el **Arcaico**, ya que los estromatolitos formados por comunidades microbianas, se hallan en estos materiales geológicos tan antiguos. Los estromatolitos no tenían competidores ni presión por organismos que los utilizan como alimento (pastadores) y se fueron desarrollando con una gran diversidad morfológica a lo largo del **Arcaico** y **Proterozoico** (Fig.7).

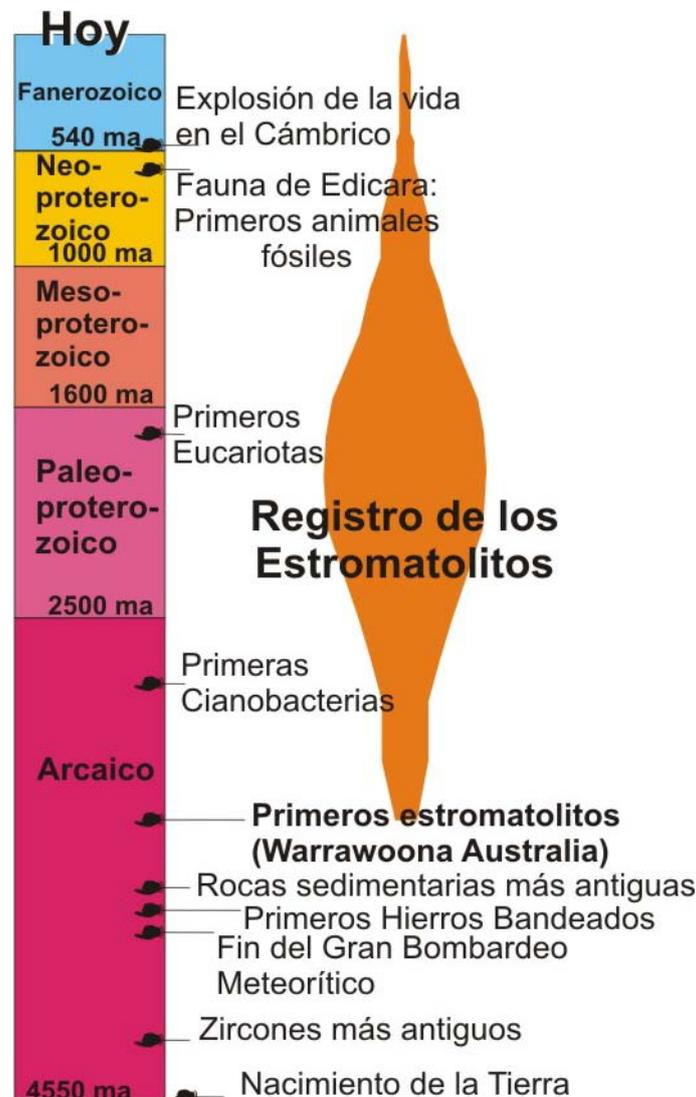


Figura 7. Distribución del registro de los estromatolitos a lo largo del tiempo geológico, junto con algunos de los principales hitos registrados.

El primer registro conocido hasta la fecha de hoy tiene una edad de 3.500 millones de años, con los primeros estromatolitos que aparecen en Australia de la Formación Warrawoona (HOFMANN *et al.*, 1999) y en Sudáfrica del Grupo Fig Tree (GARY *et al.*, 1986), pertenecientes al **Paleoarcaico**. En este periodo de tiempo los microbios sulfatorreductores están relacionados con el proceso de fotosíntesis anoxigénica y las proteobacterias y cianobacterias primitivas evolucionan para utilizar el hierro ferroso como reductor antes de los 3.000 millones de años, originando las formaciones de hierro bandeado (KAPPLER *et al.*, 2005).

La existencia de los diferentes tipos metabólicos de las bacterias es lo que permite que estas se encuentren y vivan en condiciones medioambientales que no resistirían otros organismos. Así lo evidencia el registro con los restos de filamentos microbianos de Sulphur Springs en Australia de hace 3.200 millones de años (DUCK *et al.*, 2007), que se interpretan como organismos termófilos relacionados con ambientes hidrotermales.

En el **Mesoarcaico** hacia los 3.000 millones de años se produce una diversificación de las bacterias y ya en el **Neoarcaico** aparecen los estromatolitos oxigénicos datados de 2.700 millones de años en el cratón de Pilbara (Noroeste de Australia) (BROCKS *et al.*, 1999). Como consecuencia de la evolución de estos microorganismos fotosintéticos, la oxigenación de los océanos y la atmósfera de la Tierra primitiva, va a desencadenar el cambio evolutivo con mayor transcendencia en nuestro planeta, la aparición de los eucariotas.

Ya en el **Paleoproterozoico** se produce la diversificación de las cianobacterias y la aparición de los primeros registros de eucariotas, representados por *Grypania spiralis* datado con 2.100 millones de años y procedente de Michigan (USA) (HAN y RUNNEGAR, 1992). En Canadá (Formación Gunflint Iron) se hallan grandes estromatolitos silicificados que aportan un registro con una preservación excelente (SCHELBLE *et al.*, 2004), en los que se distinguen los microfósiles de procariotas con una amplia diversidad morfológica.

Otro registro excelente lo constituye los estromatolitos de Bitter Springs (Australia) en el **Mesoproterozoico** y datado en 1.100 millones de años, en el que se preservan formas cocoides y filamentosas de las comunidades de cianobacterias que forman estos estromatolitos (SCHOPF, 1968).

A finales del **Proterozoico** los estromatolitos presentan un declive acentuado con la aparición de los metazoos. Debido tanto a la actividad de los organismos pastadores, como a los procesos de bioturbación que destruyen su integridad funcional y estructural. Aunque en algunas áreas, como en el Suroeste de Australia (HASLETT, 1976), las bioconstrucciones de estromatolitos del Cámbrico inferior aún presentan un importante desarrollo (Fig. 8).



Figura 8. Estromatolitos columnares del Cámbrico inferior de Wirrealpa Limestone, Suroeste de Australia.

¿DÓNDE CRECEN HOY LOS ESTROMATOLITOS?

La respuesta a esta pregunta es fácil, ya que al igual que en el pasado, la existencia, desarrollo y crecimiento de los estromatolitos están relacionados de forma indiscutible con la presencia de agua. Hoy día los podemos encontrar en ríos, lagos, lagunas o mares (Fig. 9). Además, en la mayoría de los casos están asociados a medios restringidos, donde se dan condiciones extremas y difíciles para la vida, como alta salinidad o temperatura, pH ácido, etc., en contraste con la diversidad de medios donde se han desarrollado a lo largo de la historia de la vida.

También, cabe destacar el hecho de que los estromatolitos en la actualidad no son tan abundantes como lo fueron en el pasado. Como se ha comentado anteriormente, el declive de estos organismos tuvo lugar hace muchos millones de años, coincidiendo prácticamente con el final del **Proterozoico** y comienzo del **Fanerozoico**, encontrándose de forma residual en la actualidad.

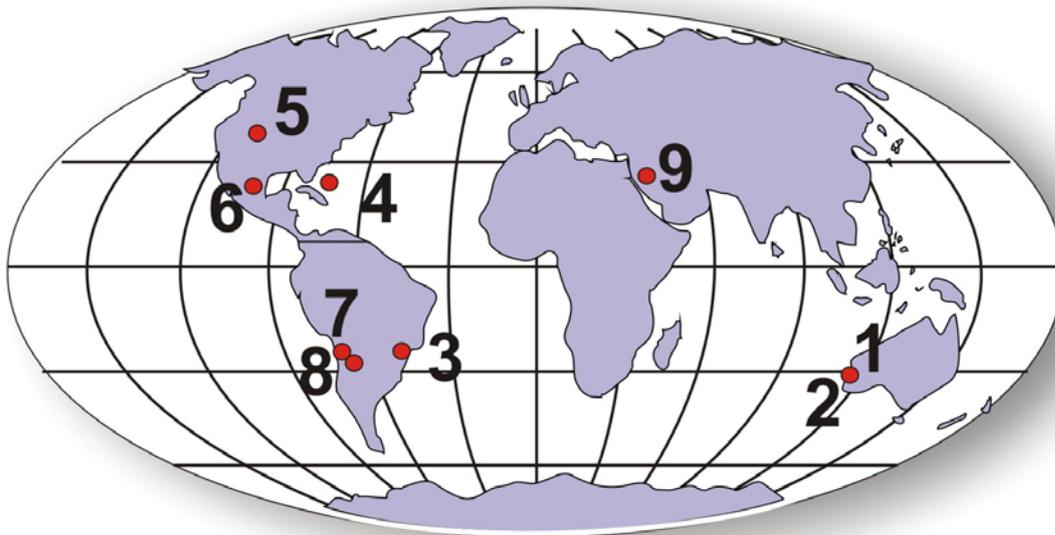


Figura 9. Distribución mundial de ejemplos famosos actuales de estromatolitos. (1) Bahía de Shark y Lago Thetis (2) en Australia. (3) Lagoa Salgada en Brasil. (4) Cayos de Exuma en Bahamas. (5) Parque Natural de Yellowstone en Estados Unidos. (6) Cuatrociénagas en México. (7) Salar de Llamará en Chile. (8) Laguna Socompa en Argentina. (9) Solar Lake en Israel.

Existen diversas hipótesis para explicar la elevada disminución de la diversidad y el declive general de la presencia de los estromatolitos a partir del **Fanerozoico**. Cambios en la química del agua del mar o su exclusión ambiental por competencia entre las algas y los metazoos no tuvieron demasiada aceptación entre la comunidad científica. Otra de ellas (WALTER y HEYS, 1985), “culpa” del hecho del declive, a la aparición de los metazoos. Éstos, utilizando diferentes modos de alimentación como el pastoreo, cavado, perforación y enterramiento pudieron afectar de forma alarmante a los estromatolitos, ya que antes no se habían visto sometidos a esta presión ecológica. Esta hipótesis perdió importancia, ya que GROTZINGER (1990) entre otros autores, afirman que existe una laguna temporal bastante grande (hasta unos 400 millones de años) que separa ambos acontecimientos, es decir la aparición de los primeros fósiles de metazoos y el declive de los estromatolitos. Una explicación alternativa al declive de los estromatolitos es la que ofrece GROTZINGER (1990). Según este autor, existe la evidencia de un descenso en la saturación de CaCO_3 en el agua del mar durante el **Proterozoico**. En el **Paleoproterozoico** la saturación de CaCO_3 , la tasa de sedimentación (formación de carbonato) y el ratio de crecimiento de los estromatolitos fueron los más altos. Todos estos factores fueron decreciendo durante la segunda mitad del Proterozoico reflejándose este hecho en el descenso de diversidad y abundancia de los estromatolitos que alcanzan niveles extremos durante el Fanerozoico.

ALGUNOS DE LOS ESTROMATOLITOS ACTUALES MÁS FAMOSOS

Bahía de Shark (Australia)

Por su excepcionalidad este paraje fue declarado Patrimonio de la humanidad por la UNESCO en 1991.

El lagoon de Hamelin, en el Golfo sureste de la Bahía de Shark es uno de los mejores sitios del mundo para observar estromatolitos vivos. El ambiente en el que se desarrollan es hipersalino, de hecho el agua de esta especie de laguna presenta el doble de salinidad que el agua marina normal, debido a la presencia de una barra que limita la entrada y salida de agua a la Bahía. Además de una alta tasa de evaporación por la escasa profundidad que presenta el agua de la laguna. Los estromatolitos se desarrollan en condiciones submareales e intermareales, es decir, que siempre están sumergidos o por el contrario quedan expuestos al aire cuando la marea esta baja. Su crecimiento es bastante lento, unos 3 mm al año.

Para obtener más información se pueden consultar las siguientes páginas web:

<http://www.sharkbay.org/default.aspx?WebPageID=129>

Página turística oficial de la Bahía de Shark donde se ofrece una visión de los conceptos básicos de los estromatolitos.

<http://strata.geol.sc.edu/SharkBayGallery/SharkBayGallery.html>

Página con una galería de figuras e imágenes que han sido recopiladas por Kendall o proceden de trabajos originales de Kendall, Logan o Hoffman.

Lago Thetis (Australia)

En la costa suroeste de Australia, unos kilómetros al norte de Perth se encuentra una población denominada Cervantes, que se ha hecho famosa por la presencia en unos de sus lagos, el lago Thetis, de estromatolitos. Los estromatolitos que se desarrollan en el lago soportan condiciones hipersalinas, al igual que en caso de la Bahía de Shark. Las aguas del lago además son alcalinas y pobres en nutrientes. Parece que este lago no tiene conexión directa con el mar y sus fluctuaciones de nivel parecen estar relacionadas con los procesos normales de evaporación, y está alimentado por los aportes que provienen de las aguas subterráneas y el agua de lluvia.

Para obtener más información se puede consultar las siguientes páginas web:

<http://stromatolites.blogspot.com/>

<http://www.creativespirits.info/ozwest/pinnacles/lakethetis.html>

Lagoa Salgada (Brasil)

Lagoa Salgada se trata de una laguna hipersalina, situada en la costa norte de la provincia de Río de Janeiro. El origen de esta laguna está relacionado con la formación del complejo deltaico del río Paraíba do Sul, momento en el cual se crearon diversas pequeñas lagunas. En la actualidad la laguna tiene cierta conexión con el río, a pesar de lo cual la circulación del agua que contiene es bastante restringida, de ahí su alta salinidad. La mayoría de los estromatolitos se encuentran en las orillas de la laguna, y pueden aparecer expuestos al aire cuando se dan condiciones de sequía en la laguna. Es frecuente observar estromatolitos columnares de morfología cómica y subesférica. Su tamaño oscila entre los 10-20 cm de diámetro.

Para obtener más información se puede consultar la siguiente página web:

<http://vsites.unb.br/ig/sigep/sitio041/sitio041english.htm>

Cayos de Exuma (Bahamas)

Los estromatolitos de los Cayos de Exuma son los únicos estromatolitos actuales que se conocen formándose en un ambiente marino abierto y de salinidad normal. Por esto son un referente en los estudios que se están llevando a cabo actualmente sobre estromatolitos, ya que pueden ser un análogo potencial de los estromatolitos antiguos y sus condiciones de vida. La diversidad de estromatolitos que podemos encontrar en Bahamas es alta. Biohermos submareales someros e intermareales y pueden desarrollarse en ambiente de back reef (detrás de la barrera arrecifal, en medio protegido) o en la zona de cresta arrecifal.

Las cianobacterias son los primeros productores de energía, directa o indirectamente, para las comunidades microbianas que forman estos estromatolitos. También son los miembros mayoritarios de esta comunidad, y muchos de los tipos filamentosos de cianobacterias juegan un importante papel en el atrape y fijación del sedimento.

Para obtener más información se pueden consultar las siguientes páginas web:

<http://stromatolites.info/>

Página oficial del equipo de investigación de los estromatolitos de las Bahamas, Pamela Reid y colaboradores (RIB).

<http://strata.geol.sc.edu/Bahamas/BahamasGalleryIndex.html>

Galería de imágenes y figuras. Todas ellas están tomadas por Kendall durante sus numerosas investigaciones y trabajos de campo.

Fuentes hidrotermales de Yellowstone (USA)

En el Parque Nacional de Yellowstone existe una fuerte actividad volcánica, fruto de ella se desarrollan géiseres y fuentes hidrotermales o fuentes de agua caliente. En torno a estos géiseres viven y se desarrollan bacterias termófilas y cianobacterias, organismos responsables del colorido del agua, que va desde el azul al verde pasando por el rojo. Las bacterias que tapizan las fuentes hidrotermales forman diferentes biofilms que pueden llegar a tener cierto grosor formando auténticos biohermos. Muchos de estos microorganismos viven en condiciones extremas, algunos se han encontrado en el Geysir Norris, en un medio ácido y muy alta temperatura (70°C). En estas condiciones podemos reconocer tapices de biofilms y estromatolitos con morfologías coniformes (Fig. 10), característicos estos también durante el Precámbrico.

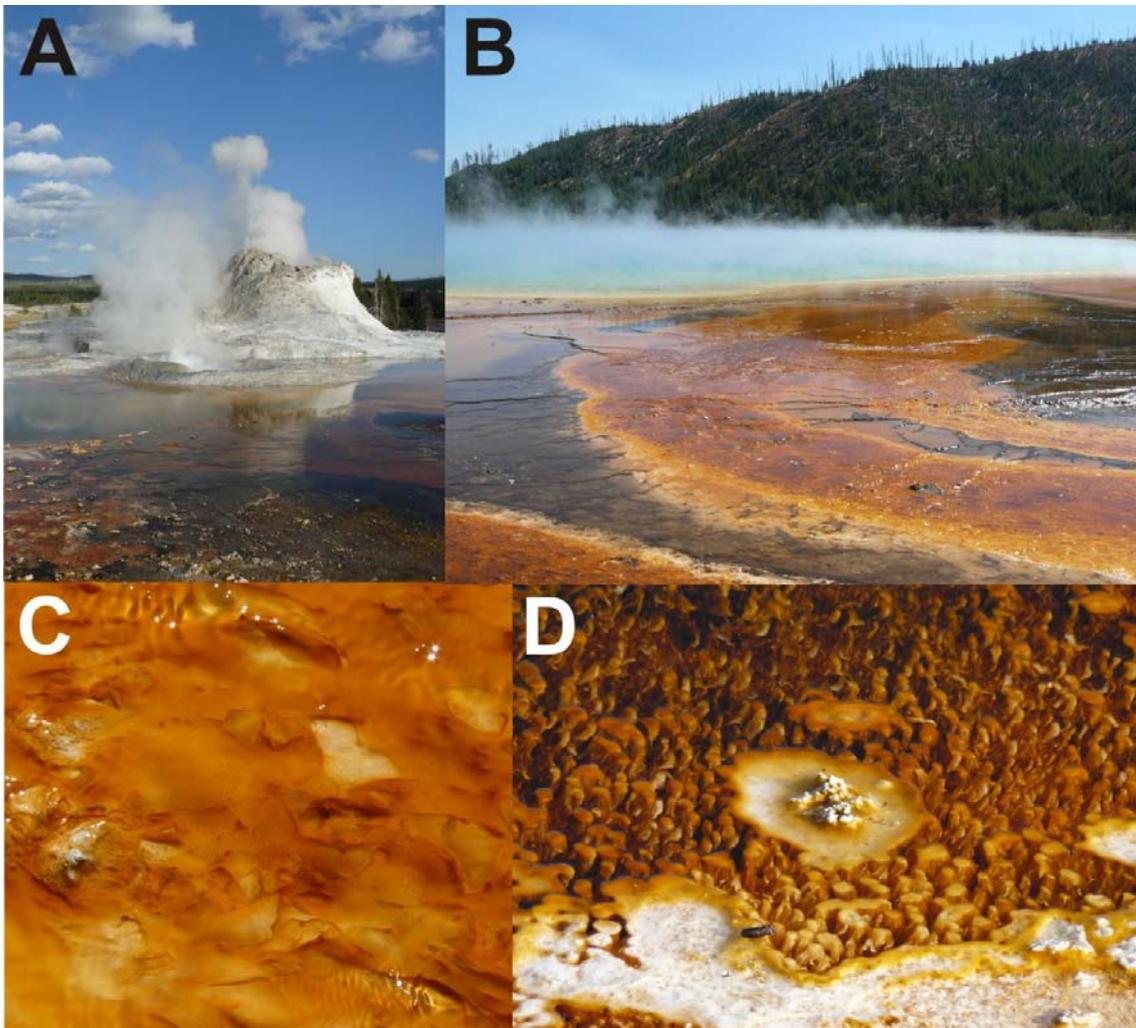


Figura 10. A y B. Fuentes hidrotermales y cursos fluviales asociados en el parque natural de Yellowstone (USA). C. Detalle de tapiz microbiano colonizando en el fondo de uno de estos cursos. El tapiz está parcialmente roto y erosionado por las corrientes. D. Detalle de estromatolitos coniformes. Las imágenes que aparecen en esta figura han sido tomadas por una de las autoras (Marta Rodríguez).

Para obtener más información se puede consultar la siguiente página web:

<http://www.nps.gov/yell/naturescience/index.htm>

Aunque menos conocidos, existen otros sitios donde podemos encontrar hoy en día estromatolitos. Todos ellos, como los que hemos visto anteriormente, se desarrollan en condiciones extremas. Sus páginas web son:

<http://www.youtube.com/watch?v=AuyoWI2-E9c>

Salar de Llamara (Chile)

<http://www.desertfishes.org/cuatroc/organisms/stromatolites.html>

Cuatrociénagas (Coahuila de Zaragoza, México)

<http://www.clarin.com/diario/2009/09/04/um/m-01992252.htm>

Laguna de Socompa (Argentina)

<http://www.microbelibrary.org/Bacteria/details.asp?id=361&Lang=Spanish>

Solar lake, Sinaí (Israel)

BIBLIOGRAFÍA

- Altermann, W. 2008. Accretion, trapping and binding of sediment in Archean stromatolites—morphological expression of the antiquity of Life. *Space Science Reviews*, 135: 55–79.
- Awramik, S .M. y Margulis, L. 1974. *Stromatolite Newsletter*, 2, 5.
- Bertrand-Safarti J. y Walter M. R. 1981. Stromatolite biostratigraphy. *Precambrian Research*, 15: 353-371.
- Brock, T. D. 1978. *Thermophilic microorganisms and life at high temperatures*. Springer-Verlag, New York, 465 pp.
- Brocks, J.J., Logan, G.A., Buick, R. y Summons, R.E. 1999. Archean Molecular Fossils and the Early Rise of Eukaryotes. *Science*, 285 (5430): 1033-1036.
- Burne, R. V. y Moore, L. S. 1987. Microbialites: organosedimentary deposits of benthic microbial communities. *Palaios*, 2: 241-254.
- Duck, L.J., Glikson, M., Golding, S.D. y Webb, R.E. 2007. Microbial remains and other Carbonaceous forms from the 3.24 Ga Sulphur Springs black smoker deposit, Western Australia. *Precambrian Research*, 154(3-4):205-220.

- Dupraz, C. y Visscher, P. T. 2005. Microbial lithification in marine stromatolites and hypersaline mats. *Trends in Microbiology*, 13(9): 429-438.
- Gary, R.B., Donald, R.L. y Maud M.W. 1986. Stromatolites from the 3,300-3,500 -Myr Swaziland Supergroup, Barberton Mountain Land, South Africa. *Nature*, 319: 489 – 491.
- Grotzinger, J. P. 1990. Geochemical model for Proterozoic stromatolite decline. *American Journal of Science*, 290(A): 80-103.
- Grotzinger, J. P. y Knoll, A. H. 1999. Stromatolites in Precambrian carbonates: evolutionary mileposts or environmental dipsticks? *Annual Reviews of Earth Planetary Sciences*, 27: 313-358.
- Hall, J. 1883. *Cryptozoön*, n.g.; *Cryptozoön proliferum*, nsp. *New York State Museum of Natural History*, 36th Annual Report of the Trustees, plate 6.
- Han, T. M. y Runnegar, B. 1992. Megascopic eukaryotic algae from the 2.1-billion-year-old negaunee iron-formation, Michigan. *Science*, 257(5067): 232-235.
- Haslett, P.G. 1976. Lower Cambrian Stromatolites from open and sheltered intertidal environments, Wirrealpa, South Australia. In Walter, M.R., Ed. *Stromatolites. Developments in Sedimentology*, 20: 565-584.
- Hofmann, H.J. 1973. Stromatolites: characteristics and utility. *Earth-Science Reviews*, 9: 339-373.
- Hofmann, H. J. 2000. Archean stromatolites as microbial archives. En Riding, R., Awramik, S. M. (Eds): *Microbial Sediments*, pp. 3 15-327. Springer-Verlag, Berlin.
- Hofmann, H.J., Grey, K., Hickman, A.H., Thorpe, R.I. 1999. Origin of 3.45Ga coniform stromatolites in Warrawoona Group, Western Australia., Geological Society of America. *Bulletin*, 111(8): 1256-1262.
- Jones, B., Renaut, R. V., Rosen, M. R. y Ansdell, K. M. 2002. Coniform Stromatolites from Geothermal Systems, North Island, New Zealand. *Palaios*, 17: 84-103.
- Kalkowsky, E. 1908. Oolith und Stromatolith im norddeutschen Buntsandstein. *Zeitschrift der Deutschen geologischen Gesellschaft*, 60: 68-125.
- Kappler, A., Pasquero, C., Konhauser, K.O. y Newman, D.K. 2005. Deposition of banded iron formations by anoxygenic phototrophic Fe(II)-oxidizing bacteria. *Geology*, 33(11): 865-868.
- Logan, B. W., Rezak, R. y Ginsburg, R. N. 1964. Classification and environmental significance of algal stromatolites. *Journal of Geology*, 72: 68-83.

- Love, F. G., Simmons, G. M., Parker, B. C., Wharton, R. A. y Seaburg, K G. 1983. Modern *Conophyton*-like microbial mats discovered in Lake Vanda, Antarctica. *Geomicrobiology Journal*, 3: 33–48.
- Riding, R. 1999. The term stromatolite: towards an essential definition. *Lethaia*, 32: 321-330.
- Riding, R. 2000. Microbial carbonates: the geological record of calcified bacterial-algal mats and biofilms. *Sedimentology*, 47: 179-214.
- Riding, R. 2008. Abiogenic, microbial and hybrid authigenic carbonate crusts: components of Precambrian stromatolites. *Geologica Croatica*, 61: 73-103.
- Schelble, R.T., Westal, F. y Allen, C.C. 2004. ~1.8 Ga iron-mineralized microbiota from the Gunflint Iron Formation, Ontario, Canada: implications for Mars. *Advances in Space Research*, 33(8): 1268-1273.
- Schopf, J.W. 1968. Microflora of the Bitter Springs Formation, Late Precambrian, central Australia. *Journal of Paleontology*, 42(3): 651-688.
- Schopf, J. W. 1996. Are the oldest fossils Cyanobacteria. En: Roberts, D. M., Sharp, P., Alderson, G., Collins, M., (Eds.), *Evolution of Microbial Life*. pp. 23–62. Cambridge University Press, Washington, DC.
- Semikhatov, M. A., Gebelein, C. D., Cloud, P., Awramik, S. M. y Beninore, W. C. 1979. Stromatolite morphogenesis –progress and problems. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 16: 992-1015.
- Walter M. R. 1994. Stromatolites: the main geological source of information on the evolution of early benthos. En: Bengtson S. (Ed.), *Early Life of Earth, Nobel Symposium 84*: 270-286. Columbia University Press New York.
- Walter, M. R. y Heys, G. R. 1985. Links between the rise of the metazoa and the decline of stromatolites. *Precambrian Research*, 29: 149-174.
- Walter, M. R., Bauld, J. y Bock, T. D., 1976. Microbiology and morphogenesis of columnar stromatolites (*Conophyton*, *Vacerrilla*) from hot springs in Yellowstone National Park. En: Walter, M. R., (Ed.), *Stromatolites: Developments in Sedimentology*, pp. 273–310. Elsevier, Amsterdam.
- Wharton, R. A. 1994. Stromatolitic mats in Antarctic lakes. En: Bertrand-Safarti, J., Monty, C., (Eds.), *Phanerozoic Stromatolites, II*: 53–70. Kluwer, Dordrecht.

BIBLIOGRAFÍA DE CONSULTA

Awramik, S.M., Haupt, A., Hofmann, H.J. y Walter, M.R. 1979. Stromatolite bibliography 2, *Precambrian Research*, 1/2: 105-166.

Monty, C., Ed. 1981. *Phanerozoic stromatolites: case studies*. Berlin, Springer. 249 pp.

Riding, R., Ed. 1991. *Calcareous algae and stromatolites*. Berlín, New York, Springer Verlag.

Riding, R.E. y Awramik, S.M., Eds. 2000. *Microbial sediments*, Berlin, Springer. 331 pp.

Walter, M.R., Ed. 1976. *Stromatolites. Developments in Sedimentology*, 20, 790 pp.

RECURSOS ELECTRÓNICOS

Bahamas

<http://stromatolites.info/>

<http://strata.geol.sc.edu/Bahamas/BahamasGalleryIndex.html>

Bahía de Shark

<http://www.sharkbay.org/default.aspx?WebPageID=129>

<http://strata.geol.sc.edu/SharkBayGallery/SharkBayGallery.html>

Cuatrociénagas (Coahuila de Zaragoza, México)

<http://www.desertfishes.org/cuatroc/organisms/stromatolites.html>

Lagoa Salgada (Brasil)

<http://vsites.unb.br/ig/sigep/sitio041/sitio041english.htm>

Laguna de Socompa (Argentina)

<http://www.clarin.com/diario/2009/09/04/um/m-01992252.htm>

Lago Thetis (Australia)

<http://stromatolites.blogspot.com/>

<http://www.creativespirits.info/ozwest/pinnacles/lakethetis.html>

Salar de Llamara (Chile)

<http://www.youtube.com/watch?v=AuyoWl2-E9c>

Solar lake, Sinaí (Israel)

<http://www.microbelibrary.org/Bacteria/details.asp?id=361&Lang=Spanish>

Yellowstone

<http://www.lpi.usra.edu/education/EPO/yellowstone2002/workshop/stromatolite/>

<http://www.nps.gov/yell/naturescience/index.htm>

ANEXO I

Panel 1. ¿Qué son los estromatolitos? ¿Cómo podemos saber si una roca es un estromatolito?

Hace 101 años, Ernst Louis Kalkowsky (1851-1939) inventó la palabra 'estromatolito' (del griego 'estroma' -tapiz- y 'lito' -roca) para describir unas curiosas rocas que se habían formado a partir de sedimentos marinos del Triásico, hace más de 250 millones de años...

¿QUÉ SON LOS ESTROMATOLITOS?

...Hoy sabemos que los estromatolitos son *estructuras organosedimentarias litificadas laminadas* formadas por la actividad de microorganismos que atrapan y fijan el sedimento y/o producen la precipitación de minerales...

¿CÓMO PODEMOS SABER SI UNA ROCA ES UN ESTROMATOLITO?

Por su *morfología externa* (megaestructura y macroestructura) y por la presencia y forma de su *laminación interna* (mesoestructura) que podremos reconocer a simple vista...

MEGAESTRUCTURA

Biostramo Biohermo 1m

MACROESTRUCTURA

Hemiesferoide Estratiforme Dómico 50cm Columnar (ramificado o no)

Las macroestructuras se unen lateralmente...

MESOESTRUCTURA (laminación interna)

- Horizontal crenulada
- Convexa
- Rectangular
- Ondulada
- Parabólica
- Coniforme

5 cm

Marta Rodríguez-Martínez
Amelia Calonge

Silvia Menéndez

Elena Moreno-Eiris
Antonio Perejón

Joachim Reitner

Universidad de Alcalá Museo Geominero Instituto Geológico y Minero de España CSIC Geobiologie Georg-August Universität Göttingen

Anexo II

Panel 2. ¿Qué microorganismos forman los estromatolitos? ¿Cómo se transforman los biofilms en estromatolitos?

¿QUÉ MICROORGANISMOS FORMAN LOS ESTROMATOLITOS?

Los estromatolitos se forman por la *litificación* repetida de *biofilms microbianos* (biopelículas microbianas).
 Los *biofilms* que forman estromatolitos tienen microorganismos que proceden de los tres Dominios de la Vida: Bacteria (como las Cianobacterias, Proteobacterias, Bacterias verdes...), Archaea y Eucaria (algas verdes, rojas, marrones, diatomeas, hongos, protozoos)

Bacteria

- Proteobacterias
- Gram-Positivas
- Cianobacterias
- Hipertermófilas

Archaea

- Metanogénicas
- Hipertermófilas
- Halófilas

Eucaria

- Animales
- Algas Verdes
- Plantas
- Algas Rojas
- Hongos
- Diatomeas
- Algas marrones

Los *biofilms microbianos* son ecosistemas muy complejos formados por microorganismos que viven embebidos en una matriz o gel que ellos producen (llamado EPS) rico en azúcares, proteínas, lípidos y otros compuestos

Fases en la formación de biofilms (las ciudades de los microorganismos)

- 1 Los microorganismos se adhieren a una superficie
- 2 Colonizan la superficie y se multiplican
- 3 Los microorganismos forman colonias complejas

- Agua
- EPS
- Microorganismos
- Sedimento

¿CÓMO SE TRANSFORMAN LOS BIOFILMS EN ESTROMATOLITOS?

- 1 Formación del *biofilm*
- 2 Mineralización
- 3 Atrape de sedimento
- 4 Estromatolito

Los distintos metabolismos (fotosíntesis y respiración) de los microorganismos producen la precipitación de minerales 2 (ej. Carbonatos) y los propios microorganismos pueden atrapar y fijar las partículas de sedimento 3

Marta Rodríguez-Martínez
Amelia Calonge

Silvia Menéndez

Elena Moreno-Eris
Antonio Perejón

Joachim Reitner

ANEXO III

Panel 3. La historia de los estromatolitos: un viaje de 3500 millones de años.



ANEXO IV

Muestra de hoja didáctica que se puede realizar utilizando los paneles explicativos.

ESTROMATOLITOS: LAS ROCAS CONSTRUIDAS POR MICROORGANISMOS (Hoja Didáctica)

Comienza observando el PANEL 1 ¿QUÉ SON LOS ESTROMATOLITOS?:

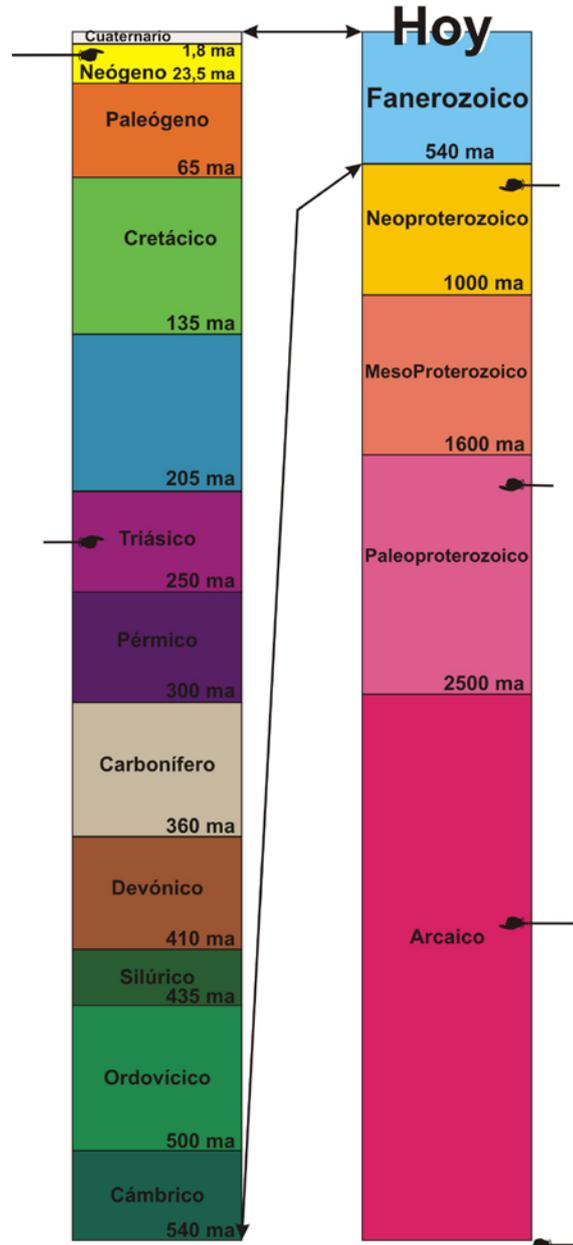
- ✓ ¿Cuándo se inventó la palabra estromatolito?
- ✓ ¿Qué tipo de rocas son los estromatolitos? Marca con una cruz
 - () Rocas ígneas
 - () Rocas sedimentarias
 - () Rocas metamórficas
- ✓ ¿En las rocas metamórficas podemos reconocer estromatolitos?
 - () No, nunca
 - () Si, si son de metamorfismo suave (o bajo grado)
- ✓ Los estromatolitos son un tipo de rocas sedimentaria laminada formada por la acción de ...
 - () Microorganismos
 - () Acumulación de sedimentos
 - () El oleaje

Ahora miremos el PANEL 2 ¿QUÉ MICROORGANISMOS FORMAN LOS ESTROMATOLITOS?:

- ✓ ¿Podemos ver los microorganismos a simple vista?
 - () Si, con una lupa
 - () No, sólo con un microscopio
- ✓ ¿Qué tipos de microorganismos forman los estromatolitos?
 - () Bacteria y Archaea
 - () Eucaria, Bacteria y/o Archaea
 - () Cianobacterias y algas verdes
- ✓ ¿En qué dominio de la vida nos encontramos los seres humanos?
- ✓ ¿Cómo se llaman las colonias complejas que forman los microorganismos? (las 'ciudades de los microorganismos')
- ✓ La litificación repetida de los *biofilms* microbianos produce los estromatolitos ¿cómo?
 - () Mineralización del *biofilm* y/o atrape del sedimento
 - () Enterramiento del *biofilm* por el sedimento
 - () Mineralización del *biofilm*

En el PANEL 3 LA HISTORIA DE LOS ESTROMATOLITOS hay dos columnas que representan la Escala del Tiempo Geológico de la Tierra, y están divididas en distintas épocas o periodos.

- ✓ En la escala del Tiempo geológico dibuja abajo la edad del nacimiento de la Tierra. ¿Cuándo y dónde aparecieron los primeros estromatolitos? ¿Cuándo aparecieron los primeros organismos eucariotas? ¿Y los primeros animales fósiles? ¿Y los primeros mamíferos? ¿Y nosotros? Sitúa todos estos acontecimientos en la escala.



- ✓ Observa la barra naranja del PANEL 3 con la distribución de los estromatolitos a lo largo de la Historia de la Tierra. ¿Cómo se llama la época de la Historia de la Tierra en donde los estromatolitos fueron más abundantes?

Recibido: 8 enero 2010.

Aceptado: 24 febrero 2010.