

LA COMUNIDAD MICROBIANA ESTRATIFICADA DE LA LAGUNA FIGUEROA, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO: UN POSIBLE MODELO DE COMUNIDADES LAMINADAS Y MICROFÓSILES PREFANEROZOICOS PRESERVADOS EN PEDERNALES

J.F. STOLZ¹, L. MARGULIS², R. GUARDANS³

RESUMEN.— La comunidad que forma el tapete microbiano existente sobre la superficie de las evaporitas en la Laguna Figueroa (30° 25' N, 115° 57' W, en Baja California, México) (Fig. 1). Estuvo activamente implicada en la producción de sedimentos biolaminados hasta 1978. Las copiosas lluvias de 1979 y 1980 inundaron el tapiz con uno y tres metros de agua respectivamente. La inundación depositó hasta 10 cm. de sedimentos siliciclásticos sobre el tapiz dominado por *Microcoleus*, lo que dio lugar a que cesara la deposición de sedimentos biolaminados. En 1982, la superficie fue recolonizada por especies de Cianobacterias (*Spirulina*, *Oscillatoria*, *Ectothiorhodospira*) y bacterias fotosintéticas púrpuras (*Chromatium*, *Thiocapsa*). Los sedimentos siliciclásticos y las evaporitas residuales sobrepuestas a los sedimentos biolaminados se reorganizó en un lodo anaeróbico, rico en azufre, que contenía vainas bien preservadas de bacterias cocoides y filamentosas (Fig. 9.3)

ABSTRACT.— The microbial mat community of an evaporite flat at North Pond, Laguna Figueroa (Baja California, Mexico) was actively involved in the production of laminated sediments prior to 1978. Heavy rains in 1979 and 1980 flooded the mat with 1 and 3 m. of meteoric water. The flooding deposited up to 10 cm of silicoclastic sediment over the *Microcoleus* dominated mat and resulted in a thick mud layer associated with laminated sediment deposition. In 1982, the surface had been recolonized by species of cyanobacteria (*Spirulina*, *Oscillatoria*) and purple phototrophic bacteria (*Chromatium*, *Thiocapsa*). The composite structure of the sediments resulting from the mat activity and the abiotic factors are proposed as a model to explain the fact that prePhanerozoic microfossils are found in smooth black cherts and not in the associated banded sediments.

¹ Department of Biochemistry, University of Massachusetts, Amherst MA 01003.

² Department of Biology, Boston University, Boston MA 02215.

³ Servei de Medi Ambient, Generalitat de Catalunya, Barcelona 08007.

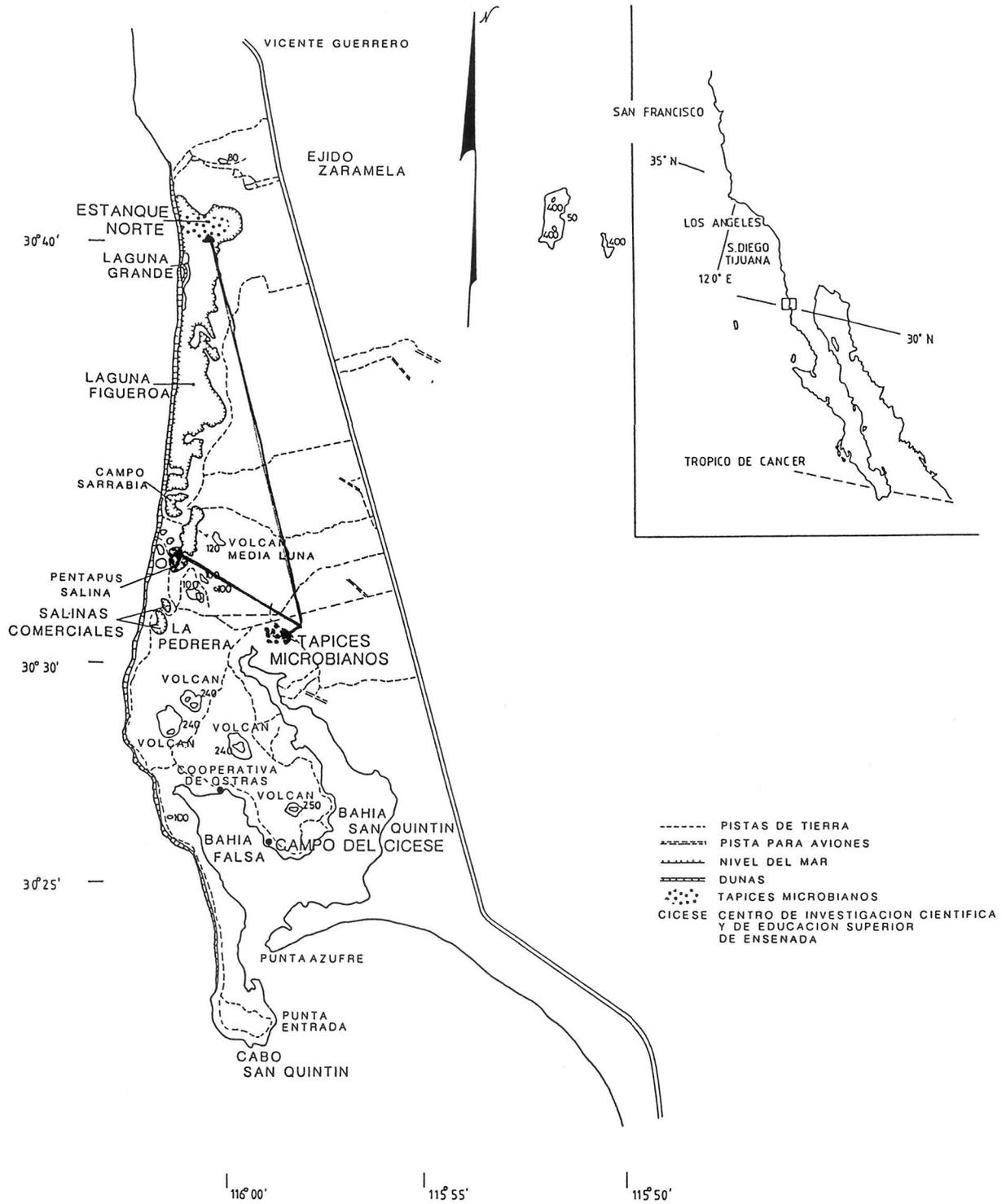


Figura 1. Mapa de la zona de la Bahía de San Quintín Baja California Norte, México.

La Serie Swaziland del Monte Barberton [que incluye los grupos Onverwacht y Fig Tree (20° 24' S, 28° 21' E) así como la facies Swartkoppie (33° 52' S, 25° 36' E) situada entre ambos] contiene sedimentos laminados y silíceos ricos en carbono. Se han encontrado microfósiles bien preservados estructuralmente en el sílex negro macizo, pero no en el laminado.

Estamos de acuerdo con los autores que han sugerido que los sedimentos laminados de la Serie Swaziland fueron depositados por una comunidad microbiana estratificada. Nosotros proponemos, sin embargo, que los organismos que aparecen preservados quedaron enterrados en los barros ricos en azufre, y posteriormente fueron silicificados.

INTRODUCCIÓN

Los tapices microbianos son estructuras biológicas compuestas casi exclusivamente por procariotas. Pueden cubrir áreas de varios kilómetros. Estas inmensas comunidades bacterianas resultan de un gran interés en la medida en que representan verosímilmente la organización en el espacio de colectivos de organismos mas parecida a las condiciones en que se dio la vida durante el Precámbrico. Actualmente este tipo de formaciones microbianas siguen ocupando una gama muy variada de localizaciones geográficas y entornos geoquímicos, pero evidentemente son menos numerosas de lo que acostumbraban a ser en la biosfera ancestral. Actualmente, como ocurre con otras complejas comunidades bacterianas sólo se encuentran en lugares en los que la vida de los eucariotas es muy difícil o imposible.

Estas comunidades bacterianas en superficie están formadas por grandes cantidades de individuos de formas y potencialidades muy diversas, estos individuos componen una sofisticada red de relaciones genéticas y metabólicas.

El conjunto de perturbaciones meteorológicas y geodinámicas que fuerzan a todas las escalas a esta red de relaciones va quedando reflejada en la estructura de los materiales atrapados, ligados y precipitados que se acumulan en el sedimento.

La distribución en el espacio y en el tiempo de los distintos tipos de bacterias que componen un tapiz microbiano dependen por una parte de lo ocurrido en el tiempo y de las condiciones climáticas en que se desarrolla la actividad biológica de aquellos organismos.

En las muestras obtenidas a lo largo de 6 años en los tapetes microbianos de Baja California Norte, se observa de forma extraordinariamente clara la interacción en el registro sedimentario de factores bióticos y abióticos. Esta interacción queda reflejada en un conjunto de periodicidades detectables en los sedimen-

tos. La variabilidad en la composición taxonómica de la población tiene un tiempo de respuesta muy corto, lo que hace que el sistema biótico pueda en este caso registrar oscilaciones breves.

Los tapices microbianos son comunidades estratificadas de bacterias que forman estructuras coherentes en las que se observan indicios de periodicidad sobre un margen muy extenso de frecuencias en el tiempo. Algunos de estos tapetes se han preservado como parte del registro fósil en rocas sedimentarias llamadas estromatolitos (WALTER, 1976; COHEN et al, 1984).

La mayoría de estas masas rocosas, extraordinariamente densas en información sobre los procesos y periodos que estructuraron la vida ancestral sobre este planeta, están constituidos por carbonato cálcico y en algunos casos son de sílice en forma de cuarzo criptocristalina.

Algunas rocas, datadas aproximadamente en 3.5×10^9 años provienen probablemente de tapetes microbianos litificados. Entre estos cabe destacar los de la Formación Warrawoona (Australia Occidental) y los de la Formación Swaziland (Sudáfrica).

Se han encontrado microfósiles asociados con estos estromatolitos en formas cocoidales y filamentosas (SCHOPF, ed 1983) y estos constituyen la evidencia más remota de vida que ha sido descrita hasta ahora en la literatura científica.

Además de los microfósiles y tapices microbianos de Warrawoona y Swaziland hay muchos otros ejemplos de la preservación microbiana en registros fósiles datados en 3×10^9 .

En casi todos los casos que se conocen (p.e. Gunflint Chert, Bitter Springs Chert) se encuentran los microfósiles en los pedernales negros uniformes y lisos asociados a los estromatolitos pero no en los estromatolitos mismos, los microfósiles no se encuentran en las partes laminadas finas.

En este trabajo se presentan informaciones sobre la estructura de algunos tapices microbianos actuales con objeto de hacer más clara nuestra interpretación del registro fósil precámbrico. Uno de estos tapices descrito recientemente (MARGULIS et al, 1986) se encuentra en Salina Bido ($23^{\circ} 10' N$, $81^{\circ} 30' W$) (Matanzas, Cuba) (Fig. 2). Se sabe ahora que se encuentran tapetes microbianos bastante frecuentemente en zonas templadas y tropicales, no molestados por el hombre (por ejemplo Santa Pola $38^{\circ} 12' N$, $0^{\circ} 32' W$, Alicante). Se muestran en la Fig. 3 los lugares en la región del Caribe donde se han encontrado tapetes planos y laminados probablemente dominada por *Microcoleus*.

Basándonos en nuestra experiencia con los tapetes de México y Cuba, formulamos una hipótesis para explicar el hecho de que los microfósiles sólo se encuentran siempre en las muestras de pedernales negros uniformes, lisos y no dentro de las partes laminadas.

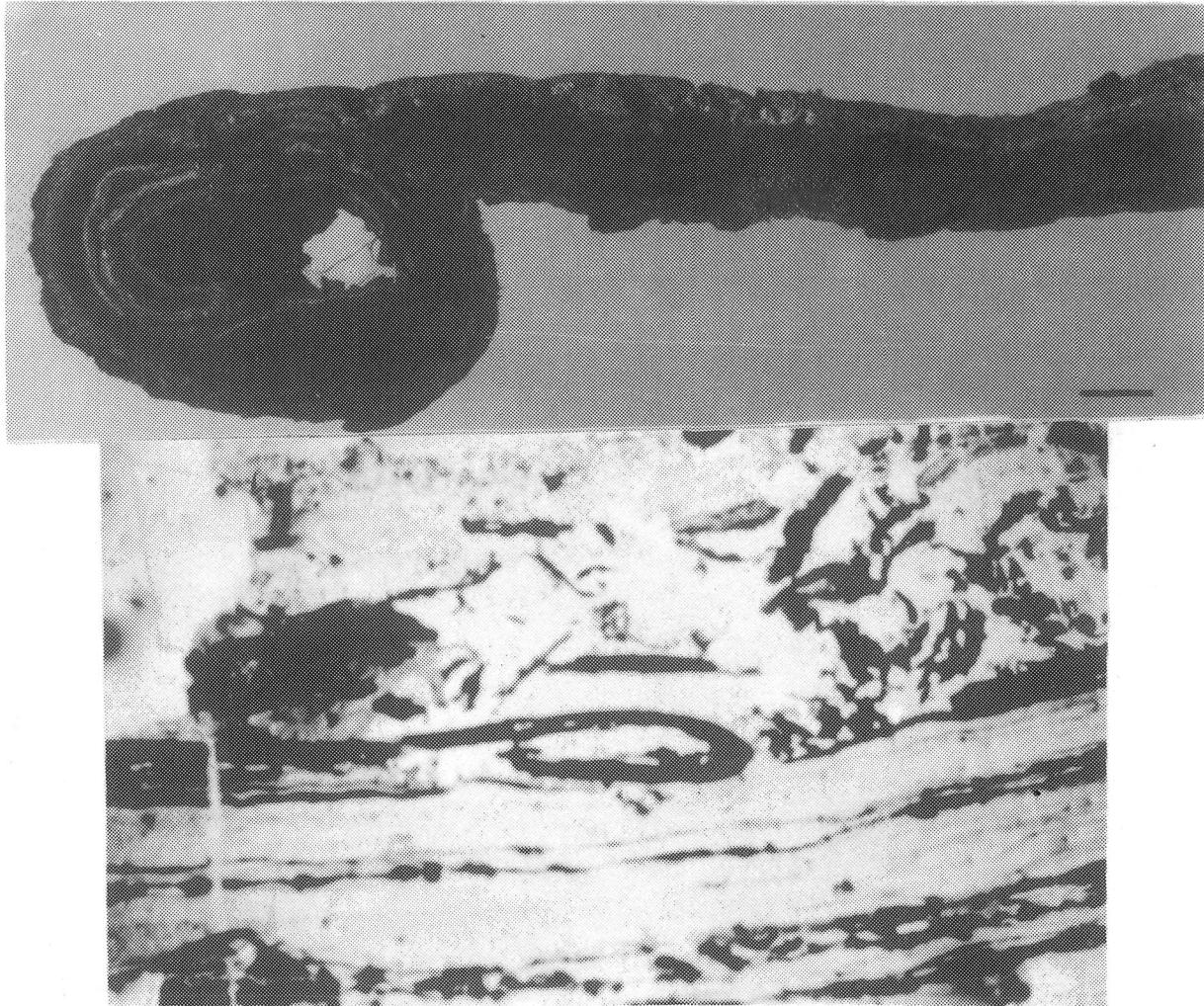


Figura 2. Comparación de la estructura del tapete microbiano (*Microcoleus cthonoplastes*, de Cuba) con la estructura de sílex laminado de Kromberg Formation, Sudáfrica, que se interpreta como un tapete laminado fósil. Se observa la tendencia del tapete laminado a doblarse con la desecación y mantener la coherencia antes de enterrarse.

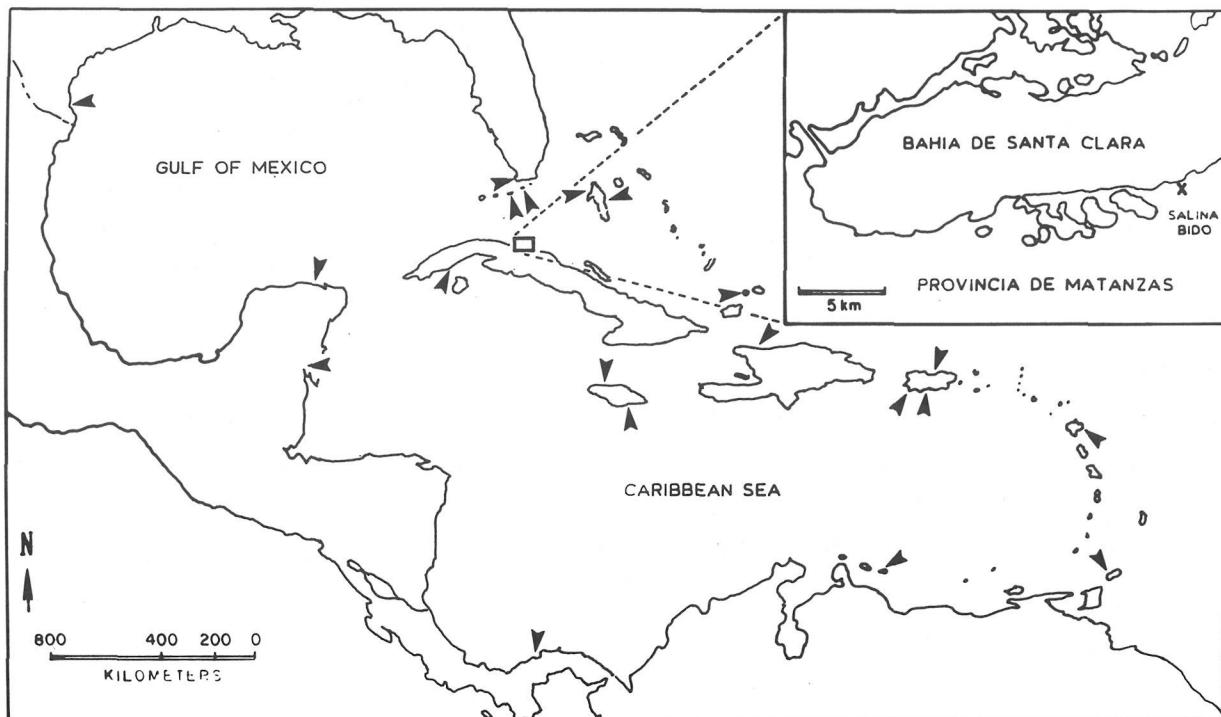


Figura 3. Mapa de la región del Caribe, las flechas indican los lugares en que se han estudiado tapetes microbianos.

La comunidad microbiana estratificada en los sedimentos laminados de la superficie de evaporitas en Laguna Figueroa se describió por primera vez con el nombre ageográfico de Laguna Mormona (HORODYSKI et al, 1977). Se ha demostrado que los varios tipos de tapices microbianos (p.e. el tapete arrugado donde domina *Lyngyba* o el tapete llano dominado por *Microcoleus*) resultan útiles para la interpretación de las estructuras estromatolíticas prefanerozoicas, así como las texturas de algunas rocas (HORODYSKI et al, 1977). En concreto se ha propuesto una analogía entre estos tapetes y los sedimentos laminados y silexíticos asociados de las facies Swartkoppie de la serie Swaziland en Barberton Mountain land (MARGULIS et al, 1980). En 1977 se emprendió un estudio del tapete microbiano de Laguna Figueroa con especial énfasis en las especies microbianas que forman estructuras morfológicamente distintas (MARGULIS et al, 1983). En 1979 se empezó un estudio in situ, utilizando microscopía electrónica de transmisión, de los sedimentos biolaminados (STOLZ, 1983 a,b). Estos estudios se vieron dificultados por las copiosas lluvias caídas durante los inviernos de 1978-79 y 1979-80 depositándose hasta 10 cm. de sedimento siliciclástico encima de los biolaminados. La inundación y recubrimiento posterior ha tenido un efecto catastrófico sobre la comunidad microbiana. Por otra parte, en cambio, ha sugerido soluciones a la descripción del mecanismo por el que probablemente se han preservado y silicificado los sedimentos biolaminados y la comunidad microbiana asociada.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se obtuvieron muestras en el estanque norte, (Fig. 1, punto 3) (HORODYSKI et al, 1977 p. 683) del tapete microbiano laminado en 1977, 1979, 1981 y 1982 (Fig. 11). Se realizaron observaciones al microscopio óptico en muestras frescas y fijadas; éstas se llevaron a cabo con un microscopio de campo Nikon y un microscopio binocular Wild así como un Nikon Fluorophot de campo claro y óptica de contraste de fases, y un Nikon Optiphot con campo claro y óptica Nomarski en el que se montó una cámara de 35 mm. El material de campo se examinó con lentes manuales y el microscopio de campo Nikon H. Para la microscopía electrónica de transmisión, las muestras se fijaron en el campo con glutaraldeído al 2.5% en un buffer de agua marina del mismo sitio, con citrato sódico, postfijado en osmium teróxido, tenido en bloque con 0.5% de acetato de uranilo, deshidratándola en una serie de etanol y embebido en el medio de Spurr's (STOLZ, 1983 a). Se cortaron secciones del material embebido con un ultramicrotomo Sorval Porter Blum MT2 usando cuchillas de cristal de 0.25 pulgadas, teñidas 2 minutos, con azul de toluidina 1% y observadas en el Nikon Optiphot con óptica Nomarski (Figs. 4, 6, 7 y 9).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La comunidad microbiana estratificada de la llanura vaporítica de Laguna Figueroa fue originalmente caracterizada como un tapiz llano y laminado, dominado por las cianobacterias filamentosas con vaina *Microcoleus chthonoplastes* (como *Entophysalis* y *Lyngbya*) así como por las bacterias púrpuras fotosintéticas, como *Chromatium* (HORODYSKI et al, 1977). El examen de estas comunidades in situ, con microscopio electrónico de transmisión, reveló la presencia de otras especies de cianobacterias (*Pleurocapsa* y otros cocos no identificados), bacterias fotosintéticas púrpuras (*Thiocapsa fennigii*, *Ectothiorhodospira*) y bacterias fotosintéticas verdes (*Chloroflexus*) (STOLZ, 1983 a,b).

Anualmente se depositan de 1 a 3 mm. de sedimentos biolaminados (HORODYSKI et al., 1973). En un corte típico se puede observar una costra superficial de evaporitas debajo de la cual se encuentra una capa de 2 mm. dominada por *Microcoleus* y varios centímetros de sedimento laminado.

En el verano de 1979, después de la primera inundación acaecida aquella primavera, se depositó aproximadamente un metro de agua, sedimento siliciclástico y yeso sobre el sedimento biolaminado. El microbio más activo en la fabricación del tapiz, *Microcoleus chthonoplastes*, así como *Chloroflexus* y *Ectothiorhodospira*, ya no se encontraban en el sedimento biolaminado. A pesar de persistir una capa brillantemente coloreada en púrpura, indicadora de actividad fotosintética de bacterias anoxigénicas, se interrumpió la producción de nuevas láminas. Puesto que los principales constructores del tapiz son organismos móviles hemos supuesto que su desaparición fue activa: una situación de poca luz, desfavorable y condiciones de agua dulce profunda forzaron a los microbios a desplazarse a otros hábitats. Este tipo de movilidad que les lleva a alejarse de las condiciones desfavorables se ha observado en el laboratorio.

La superficie de evaporitas estuvo inundada por 3 m. de agua meteórica durante todo 1980; cuando la llanura de evaporitas se secó se habían depositado 2,5 cm. de sedimentos sulfatados y siliciclásticos sobre los biolaminados (Fig. 6). Los únicos miembros de la comunidad fotosintética original que quedaron fueron especies de bacterias fotosintéticas púrpura (*Thiocapsa*, *Chromatium* y otras no identificadas).

En el verano de 1982, los sedimentos sulfatados, siliciclásticos y evaporitas residuales habían sido rebajados debido en parte a la actividad de bacterias sulfato-reductoras así como a otras bacterias, formándose un lodo gelatinoso anaeróbico y rico en azufre. En una sección típica se podía observar una capa de 1 mm. de evaporitas y de la comunidad de superficie; debajo, hasta 10 cm. de lodo anóxico. La comunidad de superficie era ahora nueva, distinta a la anterior, con especies de cianobacterias (*Oscillatoria*, *Spirulina*) y bacterias fotosintetizadoras púrpu-

ras (*Chromatium*, *Thiocapsa*), comenzando otra vez la precipitación de evaporitas. El examen microscópico del lodo rico en azufre reveló una comunidad de microbios heterótrofos y vainas bien preservadas de bacterias filamentosas y cocoides (Fig. 9). Pensamos que este material del lodo fue producido por la comunidad de superficie (9.4), puesto que este sedimento alóctono estaba desprovisto de materia orgánica cuando se depositó. Los materiales que se observan en 9.3 son típicos de lodo resultante de las inundaciones. Se trata de organismos procedentes de la capa superficial (9.4).

Las sorprendentes similitudes entre los sedimentos biolaminados de Laguna Figueroa y los sedimentos laminados y crestas asociadas de la Serie Swaziland (p.e. los grupos Fig Tree y Onverwacht con la facies Swartkoppie entre ellos) no parece que sean simples coincidencias (Fig. 10). El entorno de la deposición de las facies Swartkoppie era de aguas poco profundas cerca de la costa (KNOLL & BARGHOORN, 1977), mientras que la Laguna Figueroa es una llanura de evaporitas que se inunda ocasionalmente. El aumento de carbono en las láminas de la formación Sheba (grupo Fig Tree) se ha calculado en un 0.42% del peso y se piensa que es el resultado de actividad biológica (REIMER et al, 1979). Además, se han encontrado recientemente microfósiles cocoides y filamentosos en silexitas negras asociadas con sedimentos laminados de la Kromberg Formation del grupo Onverwacht (WALSH & LOWE, 1983).

Es característico encontrar microfósiles bien preservados en silexitas ricas en materia orgánica y de grano fino, asociados con sedimentos laminados (AWRAMIK, 1982). Las silexitas de la Serie Swaziland no son una excepción. Se han encontrado microfósiles en las facies Swartkoppie (KNOLL & BARGHOORN, 1977).

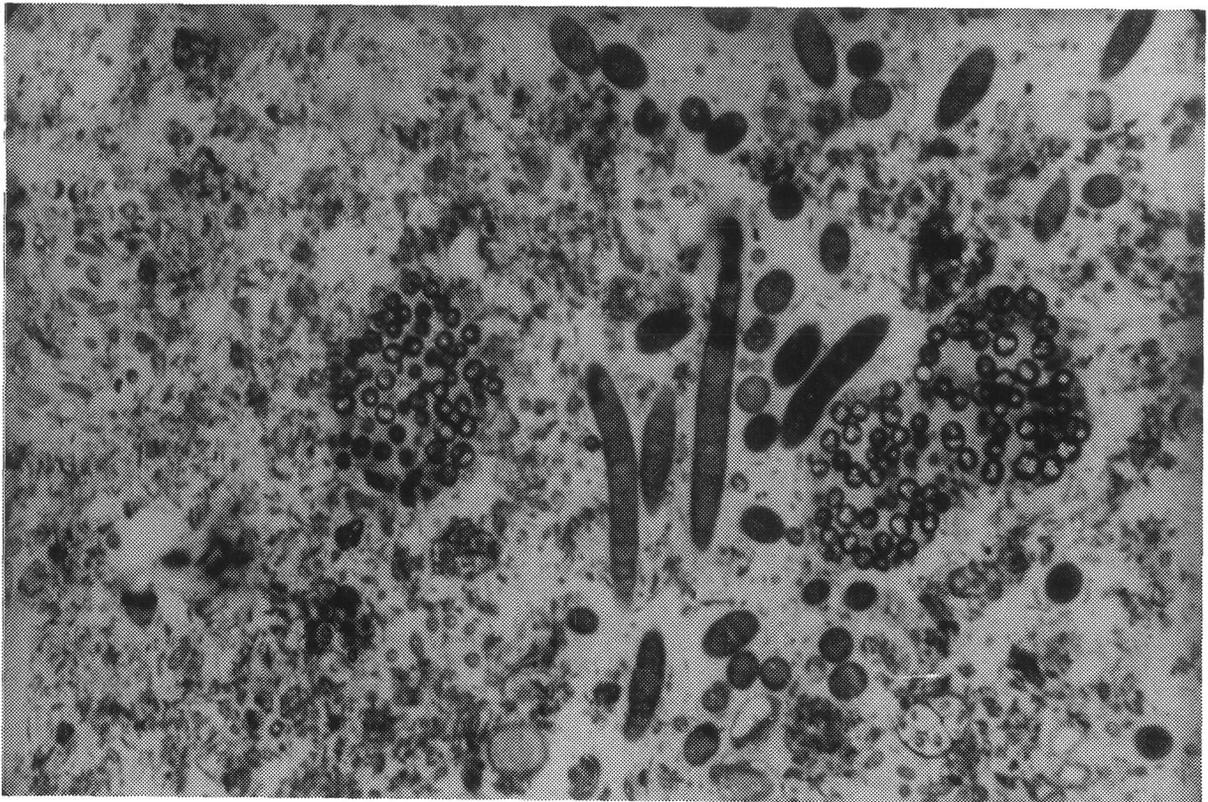
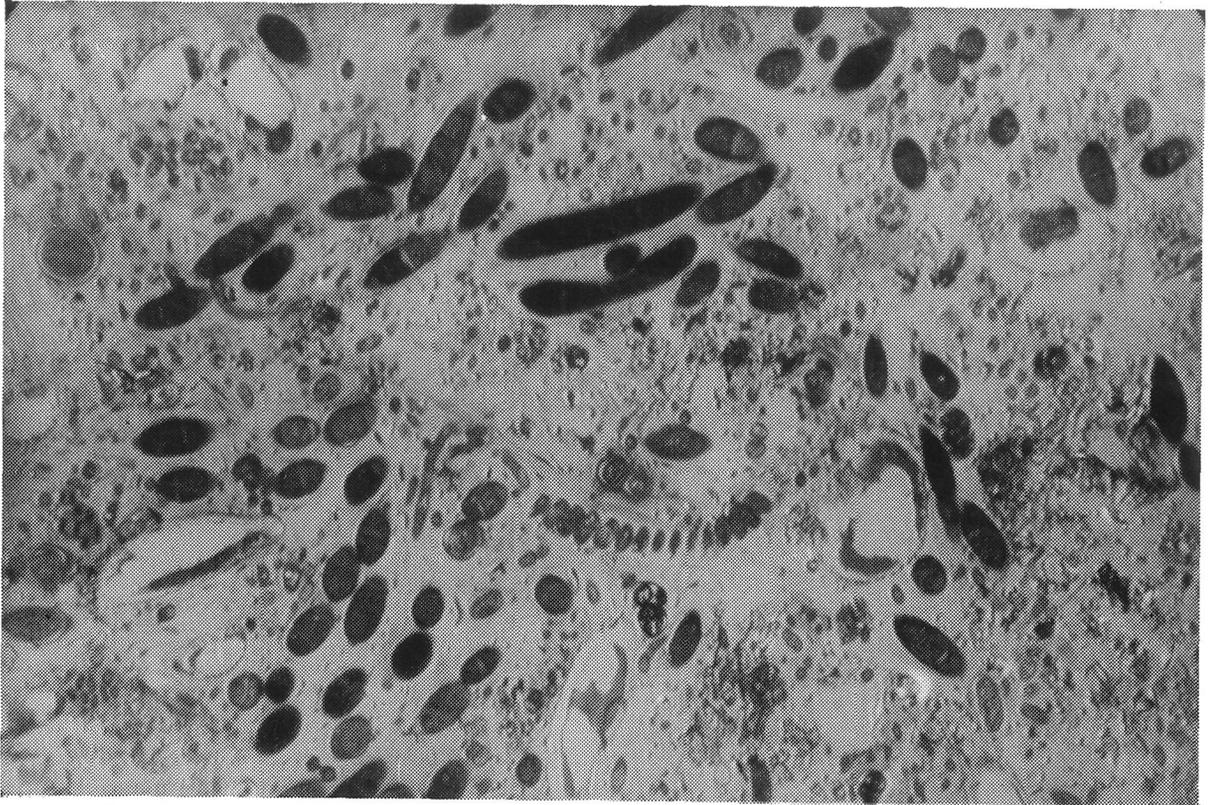
Una explicación plausible es que el entorno formado por los lodos asociados a los sedimentos laminados anóxicos y ácidos sea óptimo para la preservación de materia orgánica. Como se pudo ver en el tapiz de 1982 en Laguna Figueroa, se pueden producir grandes cantidades de materia orgánica que se preserva en el lodo subyacente. A pesar de que el sedimento biolaminado también será preservado, no quedan en el mas trazas de la actividad de los organismos que lo produjeron, que el material orgánico en el lodo subyacente.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio se llevó a cabo con la ayuda de NASA NGR 004-025, la Fundación Lounsbery y la Boston University Graduate School. Agradecemos a E.S. Barghoorn, A. Knoll, H. Eugster y M. Walsh su ayuda durante la investigación, así como la colaboración en la versión castellana de Antonio Arribas y Emiliano Jiménez Fuentes.

BIBLIOGRAFÍA

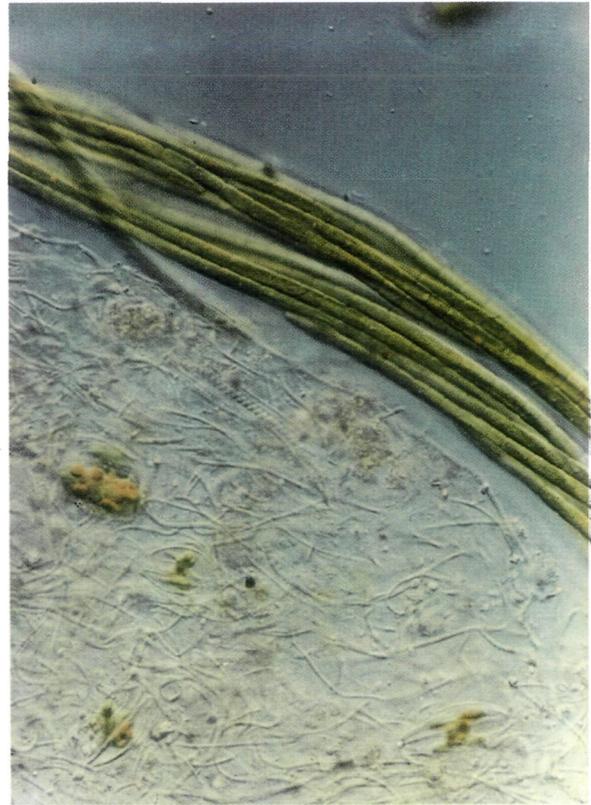
- AWRAMIK, S.M. (1982). The pre-Phanerozoic fossil record. In *Mineral Deposits and the Evolution of the Biosphere*, H.D. Holland and M. Schidlowski eds. Springer, Berlin; pp. 67-82.
- COHEN, Y., CASTENHOLZ, R.W., HALVORSON, H.D., eds. (1984). *Microbial Mats, Stromatolites*. Alan R. Liss Publ.; 105 Fifth Av. N.Y. 10011NY.
- FRIEDMAN, G.M., & KRUMBEIN, W.E. (1985). Hypersaline Ecosystems: The Sabkha Gavish. *Ecological Studies*, Vol. 53.
- HORODYSKI, R.J., BLOESSER, B., & VONDER HAAR, S.J. (1977). Laminated algal mats from the coastal lagoon, Laguna Mormona, Baja California, Mexico. *J. Sedimentary Petrology*, 47: 680-696.
- KNOLL, A., & BARGHOORN, E.S. (1977). Archean microfossils showing cell division from the Swaziland System of South Africa. *Science*; 198: 396-398.
- MARGULIS, L., BARGHOORN, E.S., ASHENDORF, D., BANERJEE, S., CHASE, D., FRANCIS, S., GIOVANNONI, S., & STOLZ, J. (1980). The microbial community in the layered sediments at Laguna Figueroa, Baja California, Mexico: Does it have Precambrian analogues?. *Precambrian Research*; 11: 93-123.
- MARGULIS, L., GROSOVSKY, B.D.D., STOLZ, J., GONG-COLLINS, E.J., LENK, S., READ, D., & LÓPEZ-CORTÉS, A. (1983). Distinctive microbial structures and the prePhanerozoic fossil record. *Precambrian Research*; 20: 433-477.
- MARGULIS, L., LÓPEZ BALUJA, L., AWARMIK, S.M., & SAGAN, D. (1986). Community living long before man. In *Mans Effect on the Global Environment*: ed. A.A. Orio & D. Bokin, Elsevier (1986). *The Science of the Total Environment* 56: 379-397.
- REIMER, T.O., BARGHOORN, E.S., & MARGULIS, L. (1979). Primary productivity in an early Archean microbial ecosystem. *Precambrian Research*; 9: 93-104.
- SCHOPF, J.W. ed. (1983). *Earth's earliest biosphere: Its origin and evolution*. Princeton University Press. Princeton. New Jersey. 543 pp.
- STOLZ, J.F. (1983). Fine structure of the stratified microbial community at Laguna Figueroa, Baja California, Mexico: I Methods of in situ study of the laminated sediments. *Precambrian Research*; 20: 479-492.
- STOLZ, J.F., & HALVORSON, H.D. (1984). Fine structure of the stratified microbial community at Laguna Figueroa, Baja California, Mexico II. Transmission electron microscopy as a diagnostic tool in studying microbial communities in situ. In *Microbial Mats*. Y. Cohen, R. Castenholz, H. Halvorson eds. Alan Liss Publ. pp. 23-39.
- WALSH, M.M., & LOWE, D.R. (1985). Filamentous microfossils from the 3500 Myr old cherts of the Onverwacht Group Barberton Mountainland, South Africa. *Nature*; 314: 531-532.
- WALTER, M. (ed.), (1976). *Stromatolites*, Elsevier 790 pp.



9.4 comunidad de superficie 1982 azul de toluidina — 1 μ m



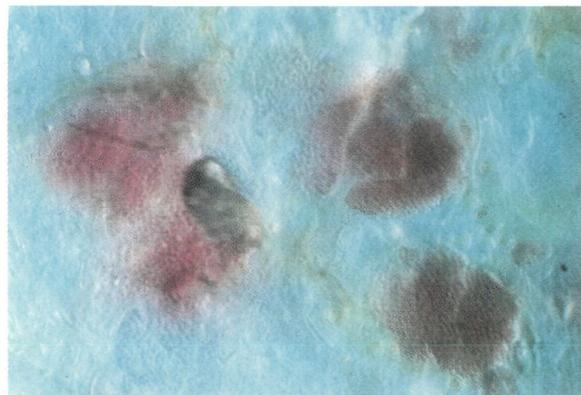
4.1 paisaje 1977 — 10 cm



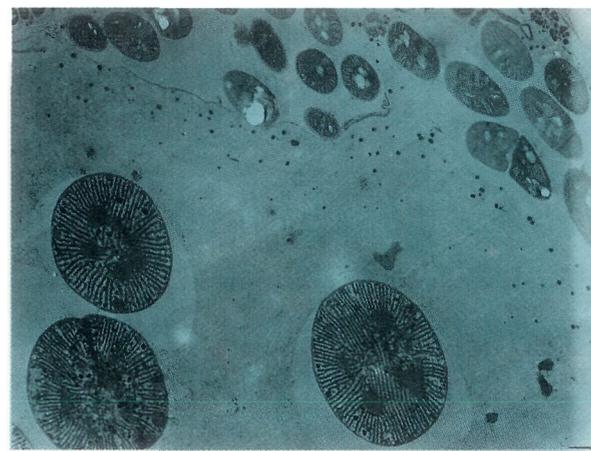
4.3 *Microcoleus chthonoplastes* — 5 μ m



4.2 sección del tapete — 1 cm

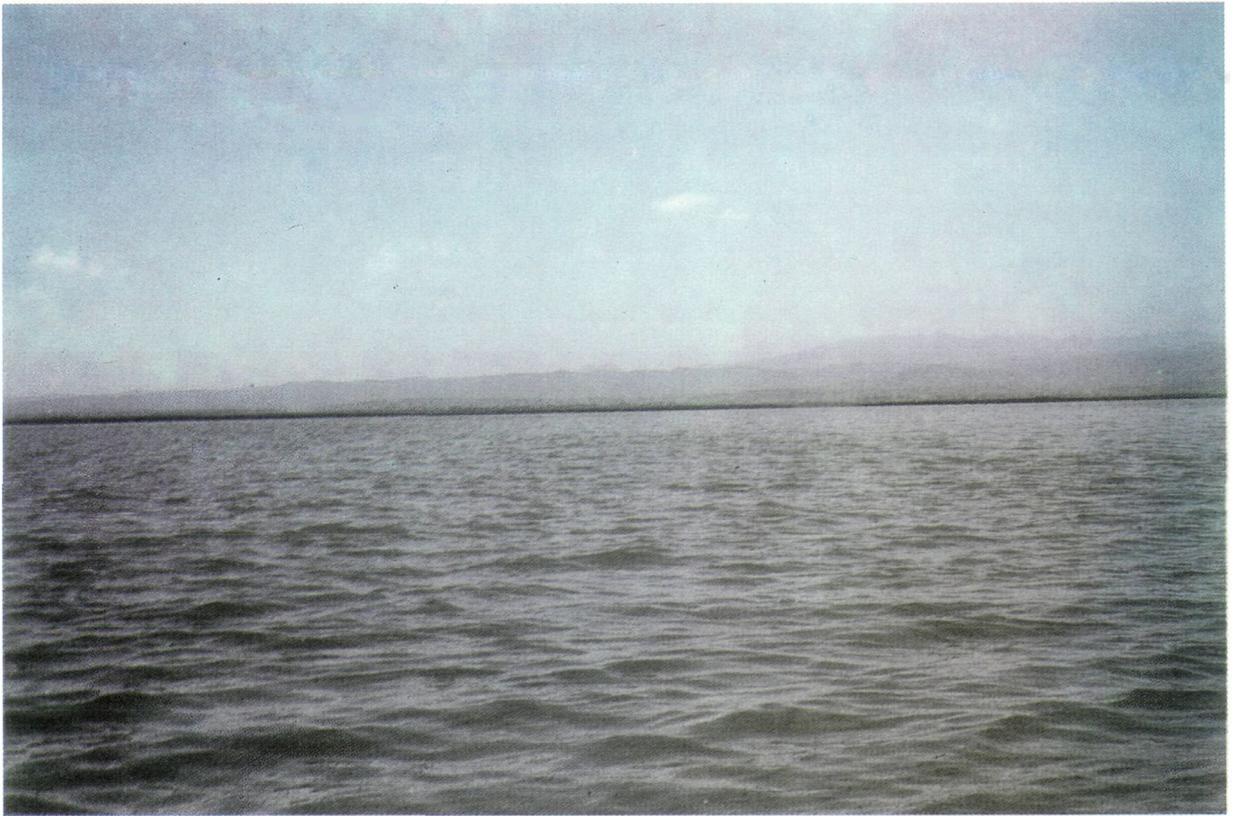


4.5 *Thiocapsa* sp. — 10 μ m



4.4 tilacoides *M. chthonoplastes* — 1 μ m

Figura 4. Distintos aspectos del tapete microbiano en el estanque norte en 1977, dominado por *M. chthonoplastes* y *Thiocapsa*, 4.3 microscopio óptico, 4.4 microscopio electrónico de transmisión.



5.1 inundación 1980, marzo



5.2 muestra de tapete sumergido 1979, mayo

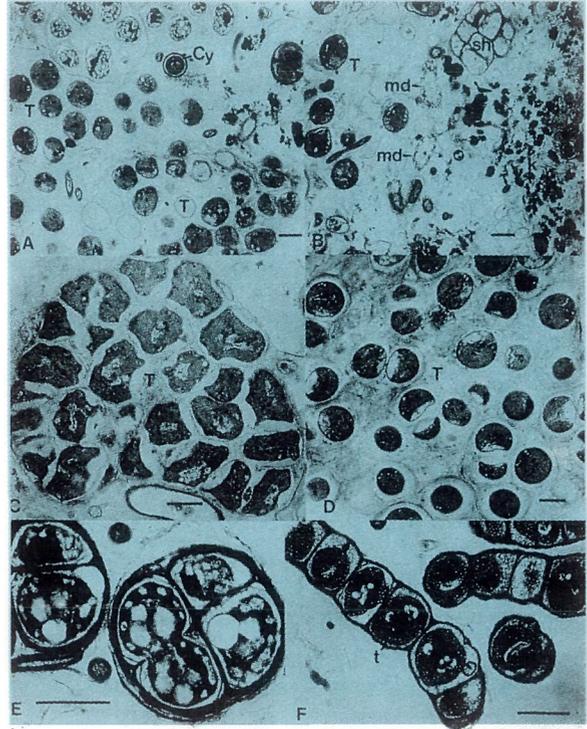
Figura 5. Las inundaciones ocurridas en 1979 y 1980 eliminaron a la población de *M. cthonoplastes*. Véanse en figura 6, figura 9.3 A,B y figura 11 otros aspectos del tapiz en 1979.



6.1 paisaje



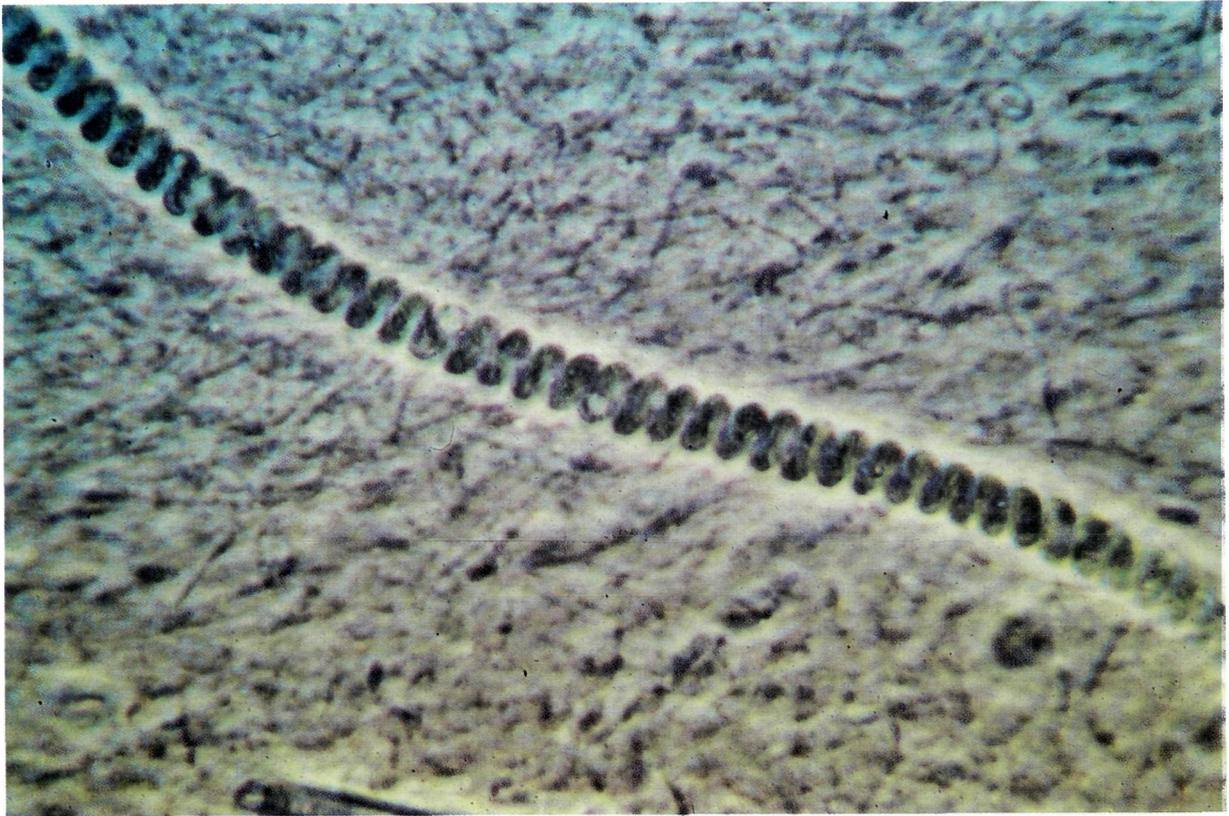
6.2 corte 1979



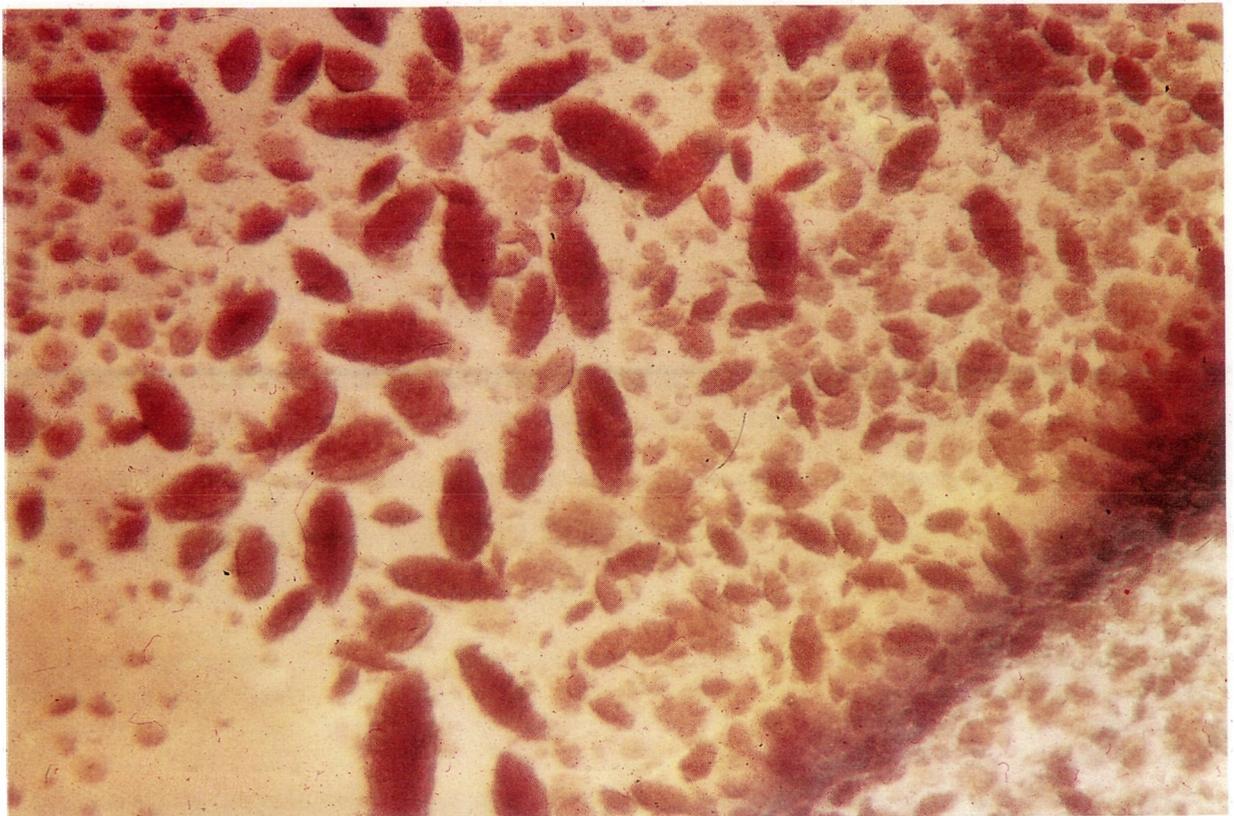
6.3 ultraestructura barra 1µm
 T *Thiocapsa*
 Cy *cyanobacteria*
 Sh vaina
 md restos de diatomea
 E probablemente bacteria púrpura
Ectothiorhodospira

6.3

Figura 6. Aspectos del tapiz en Agosto de 1979, véanse figura 9.3 A,B y figura 11. La población de *M. cthonoplastes* ha sido diezmada.



7.1 *Spirulina s.p.* — 2 μ m



7.2 colonias de bacterias — 0.1 mm

Figura 7.1 *Spirulina sp.* teñida en azul de toluidina.

7.2 Colonias de bacterias que oxidan manganeso, de ahí el color pardo. La formación de colonias está relacionada con la penetración del sustrato, en este caso agar.



8.1 recolonización del tapiz 1981

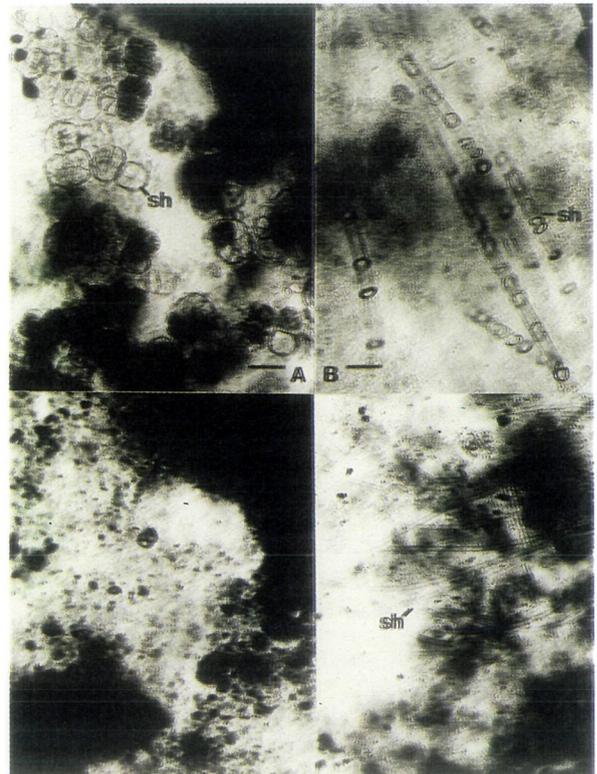


8.2 canales 1982

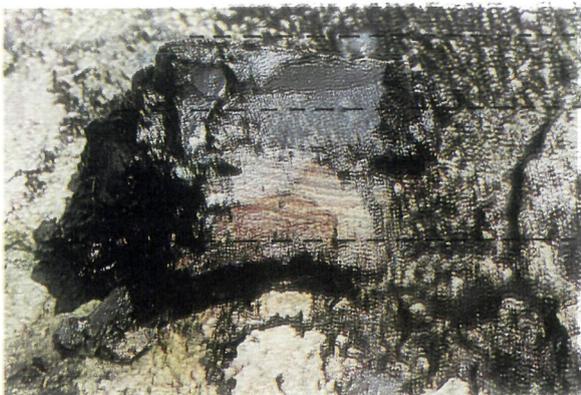
Figura 8. Aspectos de la recolonización del tapiz después de las inundaciones, partiendo de la vegetación en las dunas, en canales.



9.1 suelo 1982



9.3 A,B 1979 capa 6
C,D 1982 barro de la inundación
barra 10 μm



9.2 muestra

Figura 9. Aspectos del tapiz en 1982, en el que se ha desarrollado una nueva comunidad de superficie en la capa que cubre el barro anóxico.



10.1 bandas laminadas de un estromatolito, Fig Tree $> 3.4 \times 10^9$ años de edad



10.2 muestra del sedimento laminado. Baja California, Laguna Figueroa, 1982 barra 1 cm

Figura 10. Comparación entre un pedernal estromatolítico ($> 3.4 \times 10^9$ años) procedente de Fig Tree $20^{\circ} 24' S$, $28^{\circ} 12' E$, y el sedimento laminado de una muestra del suelo en 1982 en Laguna Figueroa, Baja California Norte.

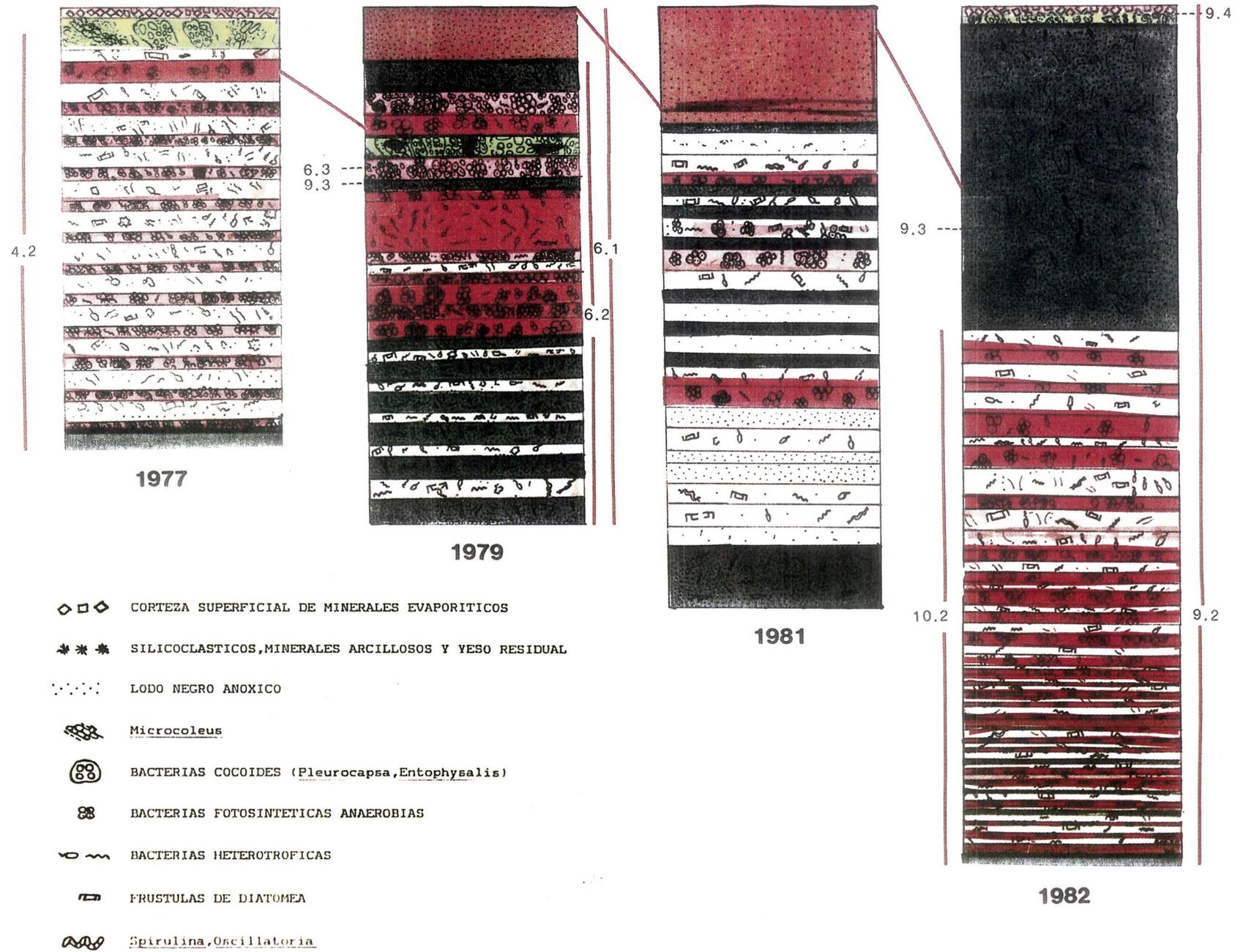


Figura 11. Comparación entre secciones transversales típicas del sedimento de la llanura de evaporitas. Escala 1 cm. Dibujo Dorion Sagan. Las cifras indican la correspondencia con las otras figuras.

