

¿Qué son los tapetes microbianos laminados?

Estudiar a los microorganismos y sus beneficios para la humanidad brinda múltiples oportunidades. Los tapetes microbianos son ecosistemas donde suceden procesos biogeoquímicos de importancia planetaria, ya que producen metabolitos con potencial aplicación industrial, biotecnológica y médica. Es esencial preservarlos para su correcto aprovechamiento, dado que poseen innumerables secretos por descubrirse.

Los microorganismos y su origen

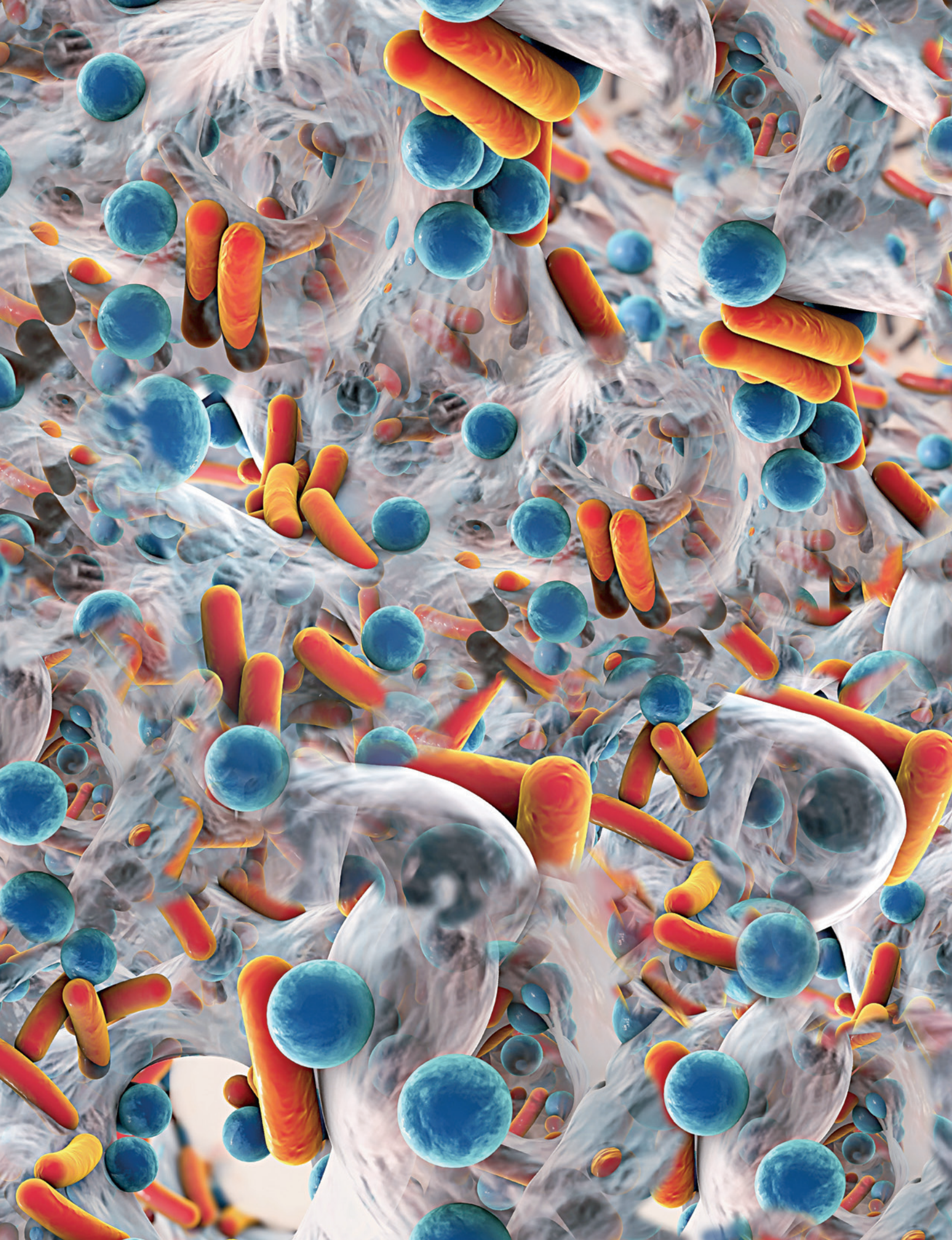
Para estudiar a los microorganismos podemos subdividirlos en siete grandes grupos; de éstos, cuatro pertenecen al dominio eucarionte (microalgas, “mohos limosos”, protozoarios y hongos) y dos son procariontes (bacterias y arqueas). El último grupo es de los virus y viroides, clasificados por separado debido a que son entes biológicos sin capacidad de reproducción propia. En el presente artículo, los microorganismos de interés son las bacterias y arqueas, puesto que producen moléculas de gran utilidad biotecnológica (por ejemplo, plásticos biocompostables), industrial (cremas cosméticas, elaboración del papel, agentes gelificantes, aglutinantes y recubrimientos para alimentos) y médica (nuevos antibióticos).

Menos de 200 años han pasado desde que se reconoció la importancia de los microorganismos para la salud animal (incluida la humana) y vegetal; asimismo, hace menos de 100 años también se develó su relación con la salud de los ambientes naturales de los que dependemos los organismos **metazoarios**. Con ello, es primordial reconocer que, sin el surgimiento de estos seres microscópicos, la “macro” flora y fauna, que cohabitamos con ellos, no podríamos existir.

A la fecha, los esfuerzos para explicar el surgimiento de los primeros seres vivos en la Tierra no han concluido. Durante casi tres siglos, se han postulado diversas teorías científicas tratando de dilucidar estos procesos. Algunas de las más renombradas son aquellas de Georges-Louis Leclerc, conde de Buffon (1749), Thomas Henry Huxley (1868) y Ernst Haeckel (1879, 1897) sobre las moléculas orgánicas; Aleksandr I. Oparin (1924, 1938) sobre los **coacervados** y una atmósfera reductora; John B. S. Haldane (1929) sobre la “sopa prebiótica” en un océano primitivo; su confirmación experimental por parte de Harold Urey y Staley Miller (1953); pasando por la

Metazoarios
Clasificación taxonómica de los organismos animales multicelulares.

Coacervados
Agregados esféricos de moléculas lipídicas; pueden ser los precursores de las células.



hipótesis de la “Panspermia” de Joan Oró (1961), la teoría endosimbiótica de Lynn Margulis (1967) (véase la Figura 1), y hasta las más recientes que postulan el origen de la vida en ventilas hidrotermales (Martin y Rusell, 2003), mediado por elementos metálicos como el hierro (Fe), níquel (Ni) y molibdeno (Mo); minerales como awaruita (Ni₃Fe) y greiguita (Fe₃S₄),

además del hidrógeno molecular (H₂) como donador de electrones (Preiner y cols., 2020).

Otras figuras científicas, desde sus disciplinas de estudio y teorías postuladas, de una u otra manera han hecho importantes aportaciones al estudio del origen de la vida y, gracias a ello, se ha ido amasando una gran cantidad de evidencia experimental. Sin embar-

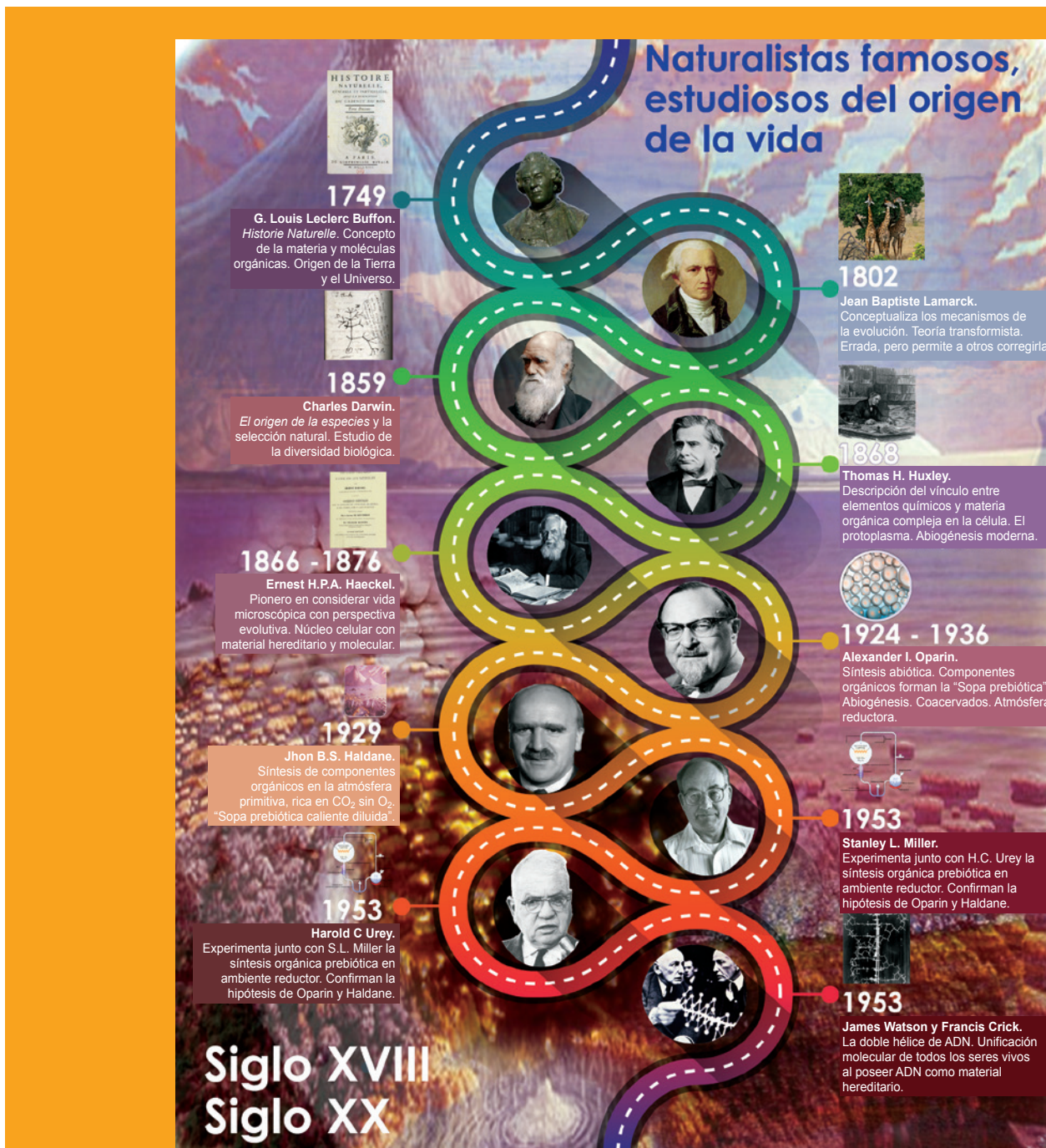


Figura 1. Algunos de los más importantes científicos naturalistas de la historia. Sus teorías han aportado al conocimiento para develar los orígenes de la vida. Fuente: Karl Harrison/3DChem.com.

go, aún existe un debate respecto a las formas y tiempos en que las primeras moléculas orgánicas surgieron y formaron en conjunto un primer ente biológico. Algunas retoman postulados de otras para evaluar sus hipótesis y contribuir poco a poco con las piezas de este complejo rompecabezas. No obstante, el objeto de este manuscrito no es analizar el origen de la vida,

pero recomendamos acudir a las revisiones exhaustivas hechas por reconocidos divulgadores de la ciencia en México, como Antonio Lazcano Araujo.

Volviendo al tema, se calcula que los primeros microorganismos surgieron entre los 3 800 y 3 200 millones de años (eón Arqueano). En general, se acepta que la Tierra tiene entre 4 600 y 4 200 millones

Naturalistas famosos, estudiosos del origen de la vida

1957
Andrei N. Belozerskii.
 Describe el papel de los ácidos nucleicos y el RNA en la evolución biológica.

1961
Joan Oró i Florensa.
 Elementos químicos y moléculas orgánicas acarreadas a la Tierra en cometas. Teoría de la Panspermia.

1962
Alexander Rich.
 RNA como origen de la vida. Esteroquímica de polinucleótidos con capacidad catalítica.

1968
Carl R. Woese.
 RNA como origen de la vida. El 16S rRNA como reloj molecular. Medición de distancias evolutivas de seres vivos. Tercer dominio de la vida las *archaea*.

1968
Leslie E Orgel.
 RNA como origen de la vida. Replicación genética y metabolismo relacionados entre sí, no separados.

1967 - 1981
Lynn Margulis.
 Teoría endosimbiótica. Orígenes de célula eucarionte a partir *archaea*.

Índice isotópico estable

Relación fraccional entre la cantidad de variantes en masa atómica de los elementos químicos.

Estimación filogenética

Cálculo estadístico de relación ancestro-descendiente entre dos o más organismos o secuencias de genes.

Biopelículas

Matriz de sustancias poliméricas extracelulares de bacterias y arqueas como subproductos de su metabolismo.

Cadena respiratoria

Transporte de electrones para generar energía (ATP) por reacciones redox y gradiente electroquímico.

de años, desde que se enfrió y fue bombardeada por meteoritos y cometas que –se sugiere– aportaron el agua al planeta y así comenzaron a formar una atmósfera primitiva. Concluido este periodo, durante aproximadamente 500 millones de años, hace 3 800 a 3 500 millones de años, se registraron formas de vida en un planeta con una atmósfera con gases de metano (CH₄), amonio (NH₃), dióxido de carbono (CO₂), vapor de agua (H₂O) y otros.

La vida microbiana de tipo bacteria y arquea dominó por alrededor de 3 000 millones de años, mucho antes de que las plantas, animales y hongos se diversificaran y colonizaran la superficie terrestre. Retomando las teorías de Oparin y Haldane, la vida pudo surgir en pozas de agua primigenias, en ambientes similares a los que actualmente conocemos como tapetes microbianos fototróficos (que hacen fotosíntesis), los cuales tuvieron un papel ecológico primordial en la Tierra primitiva, de manera análoga a los bosques de lluvia y selvas actuales, con respecto a la fijación de carbono (C) inorgánico. En dicha época, los microorganismos fijaban C debido a la gran disponibilidad de CO₂, y la fotosíntesis se realizaba anaeróbicamente (en ausencia de oxígeno [O₂]).

A partir de los procesos de evolución y selección natural, un antepasado de las cianobacterias fue capaz de liberar el O₂ como subproducto de la fotosíntesis, y otros microorganismos lo utilizaron como último receptor de electrones en su **cadena respiratoria**. Este suceso evolutivo, junto con la fotólisis del O₂ del agua, y otros aportes del manto terrestre, permitieron una de las más críticas modificaciones ambientales que ha sufrido el planeta: la oxigenación de la atmósfera, conocida como el gran evento de oxidación (2 500 millones de años). Aunque aún existen discrepancias en cuanto a la forma, número y época exacta en que los eventos de oxigenación sucedieron, esto acarrearía cambios primordiales en la evolución biogeoquímica y biológica de la Tierra.

¿Y cómo sabemos esto?

La comunidad científica se basa en evidencias para conjugar una serie de estudios de diversas disciplinas, como las señales biogeoquímicas capturadas en

las rocas, por ejemplo, al evaluar la variación de los **índices isotópicos estables** de ¹²C y ¹³C, mediante **estimaciones filogenéticas** de enzimas que utilizan y producen O₂ (Jabłońska y Tawfik, 2021), así como hallazgos de microfósiles (Pang y cols., 2018; Homann, 2019), los cuales son microestructuras que presumiblemente pertenecieron a los microorganismos del pasado. Existen evidencias fósiles, conocidas como estromatolitos, en regiones como Shark Bay en Australia, Cuatro Ciénegas en Coahuila o la laguna de Bacalar en Quintana Roo. De lo que conocemos, son las formas representativas de vida más antiguas que existen.

Los estromatolitos se forman gracias a condiciones ambientales particulares de temperatura, salinidad, pH, presencia de carbonato de calcio (CaCO₃), así como la ausencia de organismos que pudieran perturbar drásticamente su proceso de sedimentación y consolidación. En un inicio se forman **biopelículas** (*biofilm*) constituidas por biomasa microbiana y fragmentos minerales, junto con residuos metabólicos debido a su crecimiento. Su acrecentamiento se deposita capa tras capa hasta formar un tapete microbiano laminado (TML), el cual continúa capturando sedimentos de rocas y otros materiales inorgánicos, además de precipitar minerales como parte del metabolismo de los microorganismos que lo conforman. En ocasiones, esto genera una estructura sólida conocida como microbilita, la cual, con el tiempo, puede crecer lo suficiente hasta formar un estromatolito (véase la Figura 2).

Hay estructuras similares derivadas de este tipo de acreción órganosedimentaria, con condiciones particulares para su formación, como los thrombolitos, oncolitos, dendrolitos y leiolitos, las cuales se diferencian por el tipo y la forma como se depositan los sedimentos que las conforman. Al igual que los fósiles de plantas, organismos invertebrados y vertebrados, o los dinosaurios que quedaron capturados en la roca, los estromatolitos son una “fotografía” del pasado en la que es posible observar la presencia de las láminas que formaron el TML. Incluso en algunos tapetes fosilizados (de 3 500 a 3 200 millones de años) se han preservado microfósiles de protocianobacterias y otras estructuras posiblemente de origen microbiano (Homann, 2019).



Figura 2. Representación de la formación de estromatolitos. Los recuadros muestran microfósiles presumiblemente de protocianobacterias.

■ Tapetes microbianos laminados

■ Los TML son comunidades microbianas (bacterias, arqueas y algunos eucariontes como microalgas) autotróficas, autosustentables, formadas por biomineralización directa o indirecta, sedimentación y acumulación de biomasa residual de los microorganismos que los conforman. Se pueden desarrollar desde las profundidades marinas y ambientes subterráneos, hasta grandes altitudes, como laderas de volcanes, así como en zonas donde las condiciones bióticas son extremas y prácticamente ni plantas ni animales pueden sobrevivir. Algunos ejemplos de los ecosistemas extremos donde se encuentran los TML son: manantiales calientes (geiseres), ventilas hidrotermales (grandes profundidades marinas), así como lagos y cuerpos de agua alcalinos o hipersalinos. Estos entornos ecológicos, conocidos como ambientes extremos, son de suma importancia y requieren que se garantice su preservación, pues albergan a microorganismos que actúan sobre los ciclos biogeoquímicos del planeta en la fijación de elementos como C, nitrógeno (N), entre otros. Además, poseen características metabólicas que proveen al ser humano con productos derivados que son útiles en distintas áreas.

■ Innovadores moleculares

■ Debido a la cercanía física de los miembros que forman el TML, están en una condición ideal para in-

tercambiar información genética que permita la evolución molecular de metabolitos derivados y la generación de nuevos metabolismos. Estos ambientes albergan microorganismos que nos aportan beneficios en forma de metabolitos secundarios o enzimas, útiles en sectores comerciales como la industria del papel, el desarrollo de detergentes, la industria de la leche (productos deslactosados), así como en la industria alimenticia, donde los procesos de inocuidad requieren calentar los productos a temperaturas relativamente altas (60 °C).

Además del ámbito industrial, otros grupos investigan cómo las interacciones entre los microorganismos de estos ambientes producen sustancias que limitan el desarrollo de otros individuos. En la comunidad del TML se producen moléculas orgánicas, conocidas como bacteriocinas, que actúan como antibióticos y que pueden ser una fuente importante de nuevas biomoléculas útiles en el área médica. En investigaciones recientes se ha mostrado que hay cepas de arqueas extremas que producen distintos tipos de moléculas antimicrobianas, lo que permitirá desarrollar nuevos medicamentos contra las bacterias resistentes a los antibióticos actuales. Asimismo, otros grupos estudian cómo las bacterias colonizan el cuerpo humano y buscan maneras de aprovechar esta cualidad, para usarlas como vehículos que liberen o produzcan moléculas bioactivas con efectos antitumorales. Actualmente también se llevan a cabo

diversas investigaciones en torno a los beneficios de la microbiota que habita nuestro tracto digestivo y cómo influyen en nuestro metabolismo, respuesta a enfermedades e, incluso, el estado de ánimo.

Otros metabolitos producidos son algunos polímeros bacterianos con propiedades plásticas, que podrían sustituir a los plásticos convencionales, ya que son biocompostables. Nuestro grupo ha desarrollado investigaciones en esta área para aislar bacterias y arqueas capaces de producir este tipo de polímeros, conocidos como polihidroxialcanoatos (PHA). Otra de nuestras investigaciones tiene el objetivo de obtener bioenergéticos. En este contexto, comprender las interacciones entre las bacterias y arqueas que habitan los TML de ambientes marinos hipersalinos nos ha permitido generar información sobre la biodiversidad de estos microorganismos involucrados en la descomposición de la materia y la producción de biogás, como el metano.

■ ■ ■ Las arqueas metanógenas

■ El metano (CH_4) es uno de los gases resultantes del proceso de descomposición de la materia bajo condiciones anóxicas. Los microorganismos del dominio arquea llamados metanógenos liberan este gas y pueden vivir incluso en condiciones extremas de temperatura ($4\text{ }^\circ\text{C}$ - $100\text{ }^\circ\text{C}$), pH (3-9) e hipersalinidad (30%). Los metanógenos usan sustratos como el dihidrógeno (H_2), acetato, formato, como fuente de energía y otros compuestos de tipo metilados (que presentan uno o varios radicales metilo; $\bullet\text{CH}_3$). Éstos cuentan con tres rutas de obtención de energía: 1) la metanogénesis hidrogenotrófica (reducción del CO_2/H_2); 2) la metanogénesis acetoclástica (fermentación del acetato); y 3) la metanogénesis metilotrófica, en la que los grupos metilados pueden ser parcialmente oxidados a CO_2 y H_2 . Esta tercera ruta catabólica presenta variantes dependiendo del orden taxonómico de las arqueas metanógenas. Es primordial destacar que estas variaciones del catabolismo en la generación del CH_4 se traducen en la posibilidad de descubrir nuevas rutas de la metanogénesis y, con ello, entender los procesos que estimulan su formación para aprovecharlos.

El CH_4 es considerado el segundo gas de efecto invernadero más importante para el calentamiento global, después del CO_2 . Sus fuentes de producción en el planeta se clasifican en: 1) emisiones naturales, como humedales, sistemas acuáticos (pantanos y TML marinos o dulceacuícolas), permafrost en la tundra y otras, que producen 30% del total, y 2) emisión antropogénica, como arrozales, crianza de ganado (vacuno, caprino, ovino, porcino), quema de combustibles fósiles, rellenos de basura, etc., que aportan el restante 70% de este gas. En este contexto, es esencial entender de manera detallada las rutas metabólicas mediante las cuales se produce el CH_4 , lo cual nos permitirá generar estrategias de manejo para evitar una sobreproducción de este gas de efecto invernadero.

El CH_4 generado de fuentes naturales puede ser de origen termogénico y biogénico. El primero proviene del manto terrestre, pues escapa a la atmósfera por fisuras en el suelo marino, exhalaciones volcánicas o quema de hidrocarburos. En tanto, el biogénico es emitido por los organismos vivos. De acuerdo con esta clasificación, el CH_4 termogénico representa 20%, mientras que el biogénico constituye 80%. En este sentido, mediante el índice isotópico de ^{12}C y ^{13}C es posible diferenciar entre el CH_4 de origen termogénico o biogénico. Este conocimiento se ha utilizado como un indicador de posibles formas de vida en otros planetas. Actualmente, en las misiones robóticas en Marte, como el Curiosity de la NASA, han detectado señales de CH_4 en la superficie, aunque aún no se ha diferenciado su origen, pero este descubrimiento sugeriría la presencia en el pasado, o quizás actual, de vida microbiana (véase la Figura 3).

■ ■ ■ Comentarios finales

■ El estudio de los microorganismos que habitan estos ambientes naturales nos permite profundizar y develar poco a poco aquellos “secretos metabólicos” que se originan en estas condiciones particulares de vida. Como ejemplo, el estudio de la metanogénesis nos permitirá diseñar estrategias de aprovechamiento de este gas natural. Para ello, es importante diferenciar la diversidad de arqueas y sus características

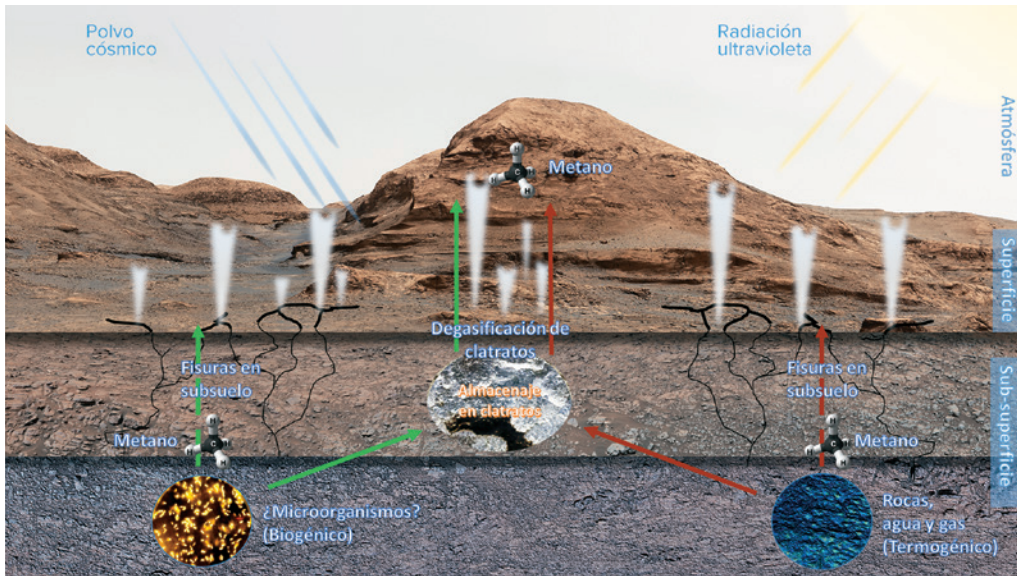


Figura 3. Esquema teórico de emisión de metano en el subsuelo marciano.

metabólicas mediante estudios como el de isótopos estables y metagenómica.

Gracias a las tecnologías de biología molecular y secuenciación masiva, hemos diseñado “moléculas señal” a partir de genes involucradas en el proceso de la metanogénesis, para, con ello, comenzar a entender cómo ocurre. Por más de 40 años, nuestro equipo (a cargo del Alejandro López Cortés) ha enfocado sus esfuerzos en esta línea de investigación. A la fecha, estamos estudiando la biósfera rara en ambientes hipersalinos, con la finalidad de desentrañar la diversidad y el metabolismo poco explorado de las arqueas metanogénicas. Con ello buscamos conocer qué miembros de la comunidad de arqueas metanogénicas en ambientes hipersalinos de los TML de Guerrero Negro, en Baja California Sur, localizados dentro de los estanques de producción de sal de la empresa Exportadora de Sal, S. A. (ESSA), se en-

cuentran bajamente representados, con la intención de ampliar nuestro conocimiento sobre sus complejas interacciones que resultan en la generación no sólo de gas CH_4 , sino también en la producción de un vasto reservorio de moléculas aprovechables para la humanidad.

Agradecemos al doctor Alejandro López Cortés por las revisiones que ayudaron a mejorar el contenido de este manuscrito. Esta investigación está siendo financiada por el proyecto 848287, Fordecyt-Pronaces.

Hever Latisnere Barragán

Laboratorio de Geomicrobiología y Biotecnología, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
hlatis04@cibnor.mx

Lecturas recomendadas

Homann, M. (2019), “Earliest life on Earth: Evidence from the Barberton Greenstone Belt, South Africa”, *Earth-Science Rev*, 196:102888.
Jabłońska, J. y D. S. Tawfik (2021), “The evolution of oxygen-utilizing enzymes suggests early biosphere oxygenation”, *Nat Ecol Evol*, 5:442-448.
Lazcano, A. (2010), “Historical development of origins research”, *Cold Spring Harb Perspect Biol*, 2: a002089.

Martin, W. y M. J. Rusell (2003), “On the origins of cells: a hypothesis for the evolutionary transitions from abiotic geochemistry to chemoautotrophic prokaryotes, and from prokaryotes to nucleated cells”, *Phil Trans R Soc Lond*, 358:59-85.
Pang, K. et al. (2018), “Nitrogen-Fixing Heterocystous Cyanobacteria in the Tonian Period”, *Current Biology*, 28:616-622.