

Sandra Ignacia Ramírez Jiménez



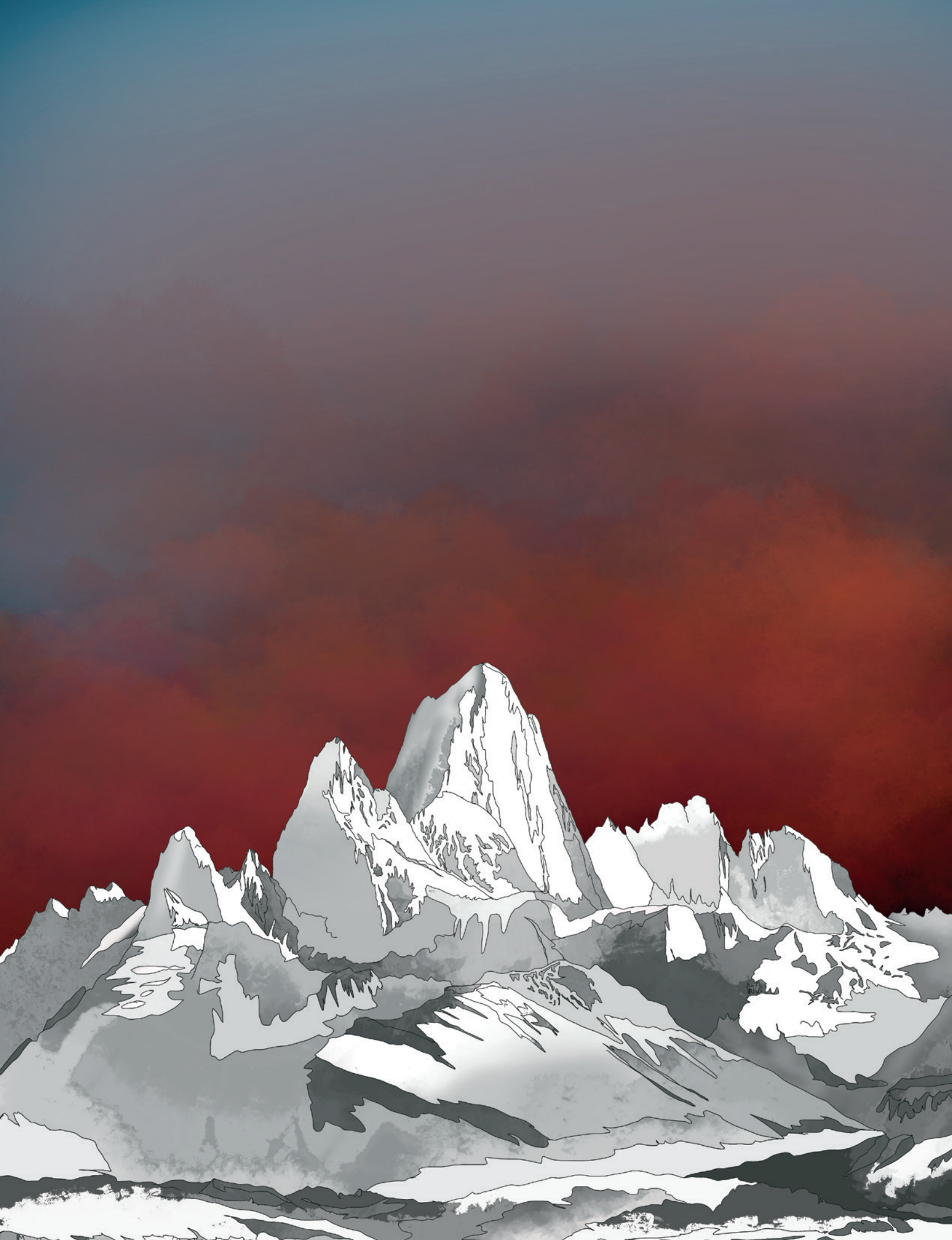
# La vida al extremo en la superficie de Marte

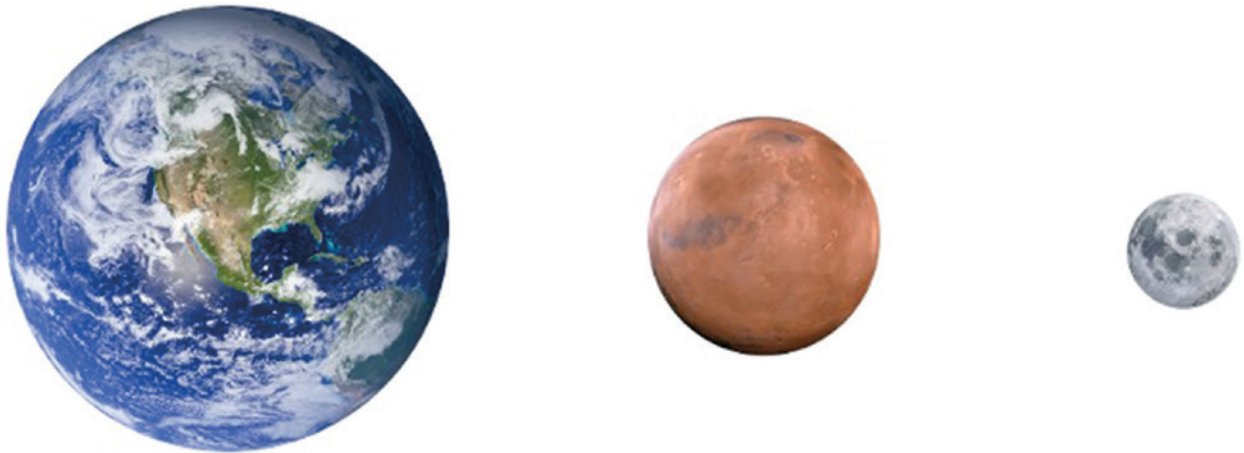
¿Qué pasaría si una bacteria que requiere ambientes altamente salinos para vivir se pone en contacto con lodos enriquecidos en sales de cloratos y percloratos como los de la actual superficie de Marte? En el Laboratorio de Simulación de Ambientes Planetarios del Centro de Investigaciones Químicas de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos (CIQ-UAEM) investigamos preguntas como ésta en el marco de la astrobiología.

## La astrobiología

La astrobiología es un área de estudio multidisciplinaria ya que para el cumplimiento de sus objetivos incluye conocimientos de diferentes áreas, como la astronomía especializada en el estudio de la génesis y evolución de galaxias y de sistemas planetarios; la biología que se ocupa de la distribución y evolución de los seres vivos; la geología que investiga las características propias de un planeta y la posibilidad de la existencia de ambientes habitables en éstos; la química que estudia cómo pudieron haberse sintetizado las primeras biomoléculas importantes para los seres vivos en las condiciones de la Tierra primitiva, entre otras.

Las personas dedicadas a la astrobiología han identificado tres requisitos indispensables para todos los seres vivos terrestres: agua líquida, elementos químicos útiles para la síntesis de biomoléculas (como azúcares o proteínas) y una fuente de energía utilizable para las funciones básicas de los seres vivos (como crecer o reproducirse, por mencionar algunas). Si en algún planeta o satélite se cumple alguno de estos requisitos, se convierte entonces en un objeto de interés astrobiológico en el que se evalúa la posibilidad de albergar alguna forma de vida terrestre, ya que hasta el momento es el único ejemplo de vida que se conoce. En este sentido, las evidencias que indican que probablemente existen salmueras de percloratos y cloratos sobre la actual superficie del planeta Marte y las que apuntan hacia un antiguo Marte sobre el que corría agua líquida, lo sitúan como uno de los planetas del sistema solar de más interés para la astrobiología.





**Figura 1.** El planeta Marte (centro) comparado con la Tierra (izquierda) y la Luna (derecha). El tamaño de los objetos está a escala.

### El agua en Marte

Marte fue un planeta geológicamente activo que tuvo agua líquida sobre su superficie, según lo indica el descubrimiento de evidencias de erosión fluvial, las observaciones de gigantescos valles y cañones, así como de lechos de ríos, ahora secos. La presencia de minerales hidratados, como olivino y sulfatos de calcio y magnesio, en rocas ígneas analizadas robóticamente en la superficie del Marte actual, sólo puede explicarse como una consecuencia de eventos hidrotermales, indicativos de la existencia de agua líquida en algún momento de la historia del planeta rojo. En la Figura 1 se compara el tamaño de Marte con el de la Tierra y de la Luna.

La información espectral en la región del infrarrojo colectada por el Compact Reconnaissance Imaging Spectrometer for Mars (CRISM) a bordo del orbitador Mars Reconnaissance (MRO) indica la presencia de sales hidratadas en laderas que presentan cambios y movimientos estacionales, mejor conocidas como *recurring slope lineae*. La hidratación observada puede deberse a la propia actividad estacional de estas laderas o puede ser el resultado de una cierta cantidad de humedad atrapada en esas regiones de la superficie de Marte. Las señales espectrales que se observan son consistentes con la presencia de perclorato de magnesio, clorato de magnesio, así como perclorato de sodio. El instrumento Mars Advanced Radar for Subsurface and Ionosphere Sounding (MARSIS), a bordo de la misión Mars Express,

encontró en la región Planum Australe una salmuera de perclorato atrapada debajo del hielo del polo sur marciano, lo que demuestra que el agua líquida puede permanecer estable a una profundidad de aproximadamente 1.5 km, incrementando con ello el interés por la exploración de Marte. Esa agua enriquecida con altas concentraciones de sales de perclorato define a una salmuera.

La información del cuadro 1 indica que Marte se encuentra un poco más alejado del Sol que la Tierra y por ello recibe menos radiación solar, lo que lo hace un planeta más frío. Su tamaño es ligeramente menor al de la Tierra en un 10% y gira sobre su propio eje en poco más de 24 horas, lo que provoca que su día sea más largo que un día terrestre; pero completa una órbita alrededor del Sol en casi dos años terrestres. La gravedad en su superficie es de sólo un tercio de la gravedad de la Tierra. La atmósfera marciana contiene principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), un poco de argón (Ar) y nitrógeno molecular ( $\text{N}_2$ ). La exploración realizada por diversas misiones robóticas ha permitido identificar algunos compuestos orgánicos en su superficie, así como salmueras y agua líquida en el subsuelo. Alrededor de Marte orbitan los satélites naturales Fobos y Deimos.

### Los organismos extremófilos

El descubrimiento de organismos que habitan en ambientes extremos ha hecho más plausible la búsqueda

**Cuadro 1.** Parámetros principales de Marte y la Tierra.

Parámetro	Marte	Tierra
Distancia al Sol (10 <sup>6</sup> km)	228	150
Periodo orbital (días terrestres)	686.971	365.256
Periodo de rotación	24 h 37 m	23 h 56 m 4.1 s
Masa (kg)	6.4171 × 10 <sup>23</sup>	5.972 × 10 <sup>24</sup>
Densidad media (g/cm <sup>3</sup> )	3.93	5.514
Radio ecuatorial (km)	3 397	40 075
Gravedad en la superficie (m/s <sup>2</sup> )	3.711	9.807
Inclinación axial	25.19°	23.44°
Temperatura en la superficie (K)		
Mínima	130	184
Media	210	288
Máxima	308	330
Presión en la superficie (kPa)	0.636	101.325
Compuestos orgánicos	Clorobenceno en ppb Dicloroalcanos (C <sub>2</sub> -C <sub>4</sub> ) en ppb	Abundantes y diversos
Composición atmosférica (% volumen)	95 CO <sub>2</sub> , 1.93 Ar, 1.89 N <sub>2</sub> , 0.146 O <sub>2</sub> , 0.056 CO, 0.021 H <sub>2</sub> O <sub>v</sub> , 0.01 NO <sub>x</sub>	78.08 N <sub>2</sub> , 20.95 O <sub>2</sub> , 1.00 H <sub>2</sub> O <sub>v</sub> , 0.93 Ar, 0.04 CO <sub>2</sub> , 0.00182 Ne, 0.00052 He, 0.00017 CH <sub>4</sub> , 0.00011 Kr, 0.00006 H <sub>2</sub>
Agua líquida	Salmueras en la superficie y en el subsuelo	Océanos, mares, lagos, ríos, acuíferos
Satélites naturales	Fobos y Deimos	La Luna

queda de vida fuera de la Tierra. Los organismos extremófilos pueden ser clasificados de acuerdo con la condición fisicoquímica en la que proliferan (cuadro 2).

### Los organismos halófilos

Los ambientes salinos están ampliamente distribuidos en la Tierra, por lo que existe una gran diversidad de organismos adaptados a diferentes valores de salinidad, a los que se ha denominado halófilos y tienen representantes en los dominios *Archaea*, *Bacteria* y *Eukarya*, aunque son más abundantes en los dos primeros, los cuales incluyen organismos microscópicos unicelulares. La halofilia se define en términos de la concentración de cloruro de sodio (NaCl) presente en un ambiente específico; a partir de esa concentración, los organismos halófilos se clasifican en tres categorías: halotolerantes, para quienes la presencia de sal no es un requerimiento; halófilos moderados y halófilos extremos.

En la naturaleza, los ambientes hipersalinos corresponden con lugares como el Mar Muerto (Israel), el Gran Lago Salado (EE. UU.), el Lago Solar

(Egipto), o pozas salinas como las encontradas en Baja California (México) y California (EE. UU.). La característica principal es la baja disponibilidad de agua, provocada por la alta concentración de solutos iónicos disueltos (sales). Por ello, los organismos halófilos que se desarrollan en estos hábitats han desarrollado estrategias de adecuación que les permiten proliferar en estos ambientes.

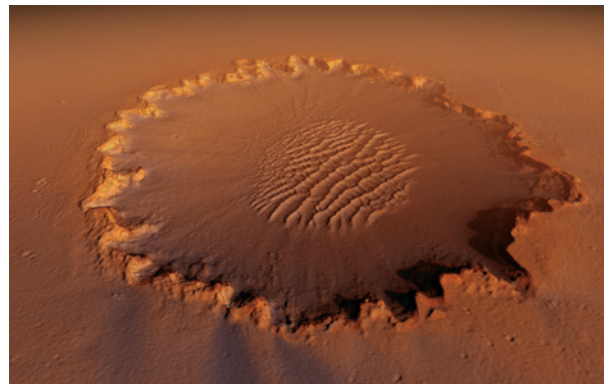
**Cuadro 2.** Clasificación y ejemplos de organismos extremófilos.

Parámetro ambiental	Tipo de extremófilo	Tolerancia
Temperatura	Hipertermófilo	> 80 °C
	Termófilo	60-80 °C
	Psicrófilo	< 15 °C
Radiación	Radorresistente	> 5 000 Gray
Presión	Barófilo	20 MPa
Desecación	Xerófilo	a <sub>w</sub> = 0.6
Salinidad	Halófilo moderado	0.6-2.5 M NaCl
	Halófilo extremo	2.5-5.0 M NaCl
pH	Acidófilo	pH > 9
	Alcalófilo	pH < 6

### Estrategias de halotolerancia

Químicamente hablando, existe una gran cantidad de sustancias, distintas al NaCl, a las que genéricamente se les puede llamar *sal*. Al NaCl se le conoce coloquialmente como sal de mesa, pero se trata sólo de un ejemplo de muchas otras sustancias químicas que los especialistas identifican como sales. Cuando una bacteria se encuentra en un medio con una alta concentración de sales, internaliza iones positivos como sodio o potasio ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), o negativos como cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), a manera de un mecanismo de primera respuesta para contrarrestar rápidamente el flujo de agua de su citoplasma hacia el exterior de la célula, evitando con ello la deshidratación. Una vez que alcanza un balance osmótico, es decir, que logra equilibrar la cantidad de iones en su citoplasma con la cantidad de iones del exterior, la bacteria reemplaza a los iones inorgánicos por pequeñas moléculas orgánicas, llamadas solutos compatibles.

Los solutos compatibles acumulados en el citoplasma bacteriano son moléculas neutras que no interfieren con las funciones celulares. Se utilizan principalmente para mantener el turgor celular y dar estabilidad a enzimas y biomoléculas en presencia de altas concentraciones de sal. Pueden ser sintetizados por las bacterias que los utilizan o pueden internalizarlos desde el medio en que se encuentran los microorganismos. Los solutos compatibles acumulados preferentemente por bacterias halófilas o halotolerantes incluyen azúcares, alcoholes, aminoácidos o algún derivado de este tipo de moléculas. Entre ellos,



los más comunes son la betaína, la ectoína, la hidroxiectoína, la glutamina, la trehalosa y el glutamato (véase la Figura 2).

La otra estrategia para contender con el estrés osmótico es la acumulación de cloruro de potasio (KCl), un ejemplo de otra sal utilizada por bacterias halófilas extremas y arqueas. Estos organismos han adquirido características que les permiten proliferar en ambientes con concentraciones mayores a 2.5 M de NaCl: acumulan iones  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en su citoplasma, al tiempo que mantienen una baja concentración de iones  $\text{Na}^+$ . Las arqueas aerobias halófilas del orden Halobacteriales acumulan KCl en concentraciones tan altas como las concentraciones de NaCl que se encuentran en el medio que las rodea. Las bacterias del orden Halanaerobiales, que incluyen principalmente a bacterias fermentadoras y homoacetogénicas anaerobias, utilizan esta estrategia prefiriéndola sobre la acumulación de solutos compatibles debido a que esta última es energéticamente más costosa y estos organismos generalmente se desarrollan en ambientes con baja disponibilidad de recursos energéticos.

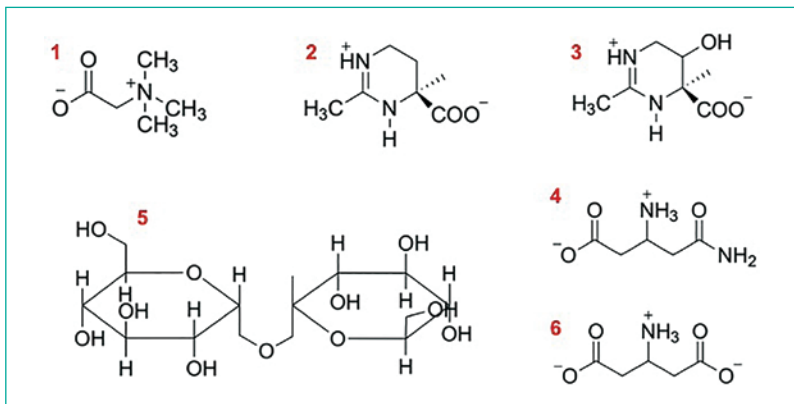


Figura 2. Solutos compatibles acumulados por bacterias halófilas o halotolerantes: 1) betaína, 2) ectoína, 3) hidroxiectoína, 4) glutamina, 5) trehalosa, y 6) glutamato.

### Los modelos bacterianos y la tenacidad de la vida

En 2008 la misión Phoenix de la NASA descubrió la existencia de cloratos ( $\text{ClO}_3^-$ ) y percloratos ( $\text{ClO}_4^-$ ) en la superficie de Marte. Estos compuestos químicos tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua y formar salmueras o lodos enriquecidos con ellos, en la actual superficie marciana. Desde una perspectiva química, la combinación de  $\text{ClO}_3^-$  o de  $\text{ClO}_4^-$  con algún metal como sodio (Na), mag-

nesio (Mg), o potasio (K) origina una sal, distinta del NaCl, pero sal al fin y al cabo. Para evaluar si el agua atrapada por los cloratos y los percloratos de la superficie de Marte puede facilitar la proliferación de alguna forma de vida como la conocida en la Tierra, en el Laboratorio de Simulación de Ambientes Planetarios (CIQ-UAEM) consideramos como modelo de estudio a la bacteria halotolerante *Bacillus pumilus* y a la bacteria halófila *Cobetia marina*, con el fin de determinar su capacidad de sobrevivir a las condiciones de salinidad, definida por dos distintas sales de perclorato, de la actual superficie del planeta Marte. Se prepararon medios de cultivo modificados con diferentes concentraciones de perclorato de sodio ( $\text{NaClO}_4$ ) y de perclorato de magnesio ( $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ ) en los que se colocaron a las bacterias. Durante algunas semanas se realizaron observaciones minuciosas de los medios de cultivo hasta que comenzó a notarse una marcada turbidez, indicativa de que las bacterias iban aumentando en número. Esto significaba que esos pequeños seres habían logrado sobreponerse, no sólo a la concentración de perclorato reportada para la superficie de Marte, sino que fueron capaces de crecer en medios que contenían hasta 17 veces esa concentración; ¿cómo lograron hacerlo?

### Las herramientas químicas en acción

■ En el Centro de Investigaciones Químicas de la UAEM se ubica el Laboratorio Nacional de Estructuras de Macromoléculas, que cuenta con instrumentos altamente especializados para determinar, entre otras cosas, la identidad de muchas sustancias químicas. La información proporcionada por esos instrumentos permitió establecer que cuando *Bacillus pumilus* y *Cobetia marina* son expuestas a la concentración de percloratos que se encuentra en la superficie del planeta rojo, el soluto compatible que incorporan en mayor cantidad es la betaína, seguida de la ectoína y cantidades menores de hidroxiectoína (Figura 2). Además, cuando la concentración de perclorato disminuye, se nota una mayor acumulación de ectoína, pero si la concentración de perclorato aumenta, la acumulación de ectoína disminuye y se nota un aumento en la cantidad de betaína y de hidroxiectoína.

Estos resultados permiten proponer que estas bacterias halófilas terrestres podrían sobrevivir a las condiciones de salinidad de la actual superficie de Marte. ¿Podrían sobrevivir a las otras condiciones ambientales marcianas? No lo sabemos aún, pero seguimos investigando. Este tipo de experimentos podrían apoyar a los grandes proyectos de exploración de Marte y tal vez motiven a las jóvenes generaciones a incorporarse a estos retos intelectuales, como alguna vez ocurrió con el ejemplo y las enseñanzas de un gran científico mexicano, el doctor Rafael Navarro González, quien formó parte de algunas de las más relevantes misiones de exploración de Marte y que afirmaba que hay que atreverse a soñar, ya que con dedicación y empeño los sueños se cumplen.

### A manera de conclusión

■ Las regiones que mantienen agua enriquecida con sales de percloratos y cloratos en el subsuelo de Marte han inspirado el estudio de las capacidades de adecuación de bacterias halófilas terrestres, estudios cuyos resultados indican que, en términos exclusivamente de la salinidad, la vida terrestre tiene posibilidades de subsistir potenciando la exploración y colonización del planeta rojo.

### Sandra Ignacia Ramírez Jiménez

Centro de Investigaciones Químicas, Universidad Autónoma del Estado de Morelos.

ramirez\_sandra@uaem.mx

### Lecturas recomendadas

Montoya, L. y S. I. Ramírez Jiménez (2013), “Vida microscópica en mundos salados”, *Ciencia y Desarrollo*, marzo-abril, 39:7-14

Ramírez Jiménez, S. I., M. Aguirre Ramírez y P. U. Martínez Pabello (2021), “Marte: experimentos de simulación y misiones de exploración espacial”, *Inventio: La Génesis de la Cultura Universitaria en Morelos*, 17(43):13-29.

Montoya, L., G. Cordero y S. I. Ramírez (2022), “Astrobiología. Una visión transdisciplinaria de la vida en el universo”, en *Astrobiología: una visión transdisciplinaria de la vida en el universo*, México, FCE/UNAM/ICN.