

Habitabilidad y vida más allá de la Tierra

Habitability and life beyond Earth

ALFONSO F. DÁVILA

National Aeronautics and Space Administration (NASA), Exobiology Division. Moffett Field, CA 94035.
E-Mail: alfonso.davila@nasa.gov

Resumen En este artículo se presentan los principios fundamentales de la búsqueda de vida más allá de la Tierra. La primera parte del artículo repasa la búsqueda de ambientes extraterrestres habitables, bien en la actualidad o en el pasado, a partir de los límites a los límites ambientales de la vida en la Tierra. El descubrimiento de un ambiente habitable, o con un alto potencial de habitabilidad fuera de la Tierra justificaría la búsqueda en él de biomarcadores: sustancias químicas y sus mezclas, o patrones morfológicos, cuya formación requiere un agente biológico. Tras más de 50 años de misiones robóticas a otros planetas, todavía no disponemos de una estrategia definida y consensuada para la búsqueda de biomarcadores en ambientes extraterrestres. Por ello, las misiones robóticas de búsqueda de vida más allá de la Tierra son complejas, e intrínsecamente imperfectas. Como ejemplo concreto, la segunda mitad del artículo recoge el concepto de habitabilidad y de búsqueda de biomarcadores aplicados al caso de Marte, un planeta con una compleja historia geológica y un alto potencial de haber albergado vida hace miles de millones de años (Ma), y quizás incluso hasta periodos más recientes.

Palabras clave: Habitabilidad, agua, biomarcadores, vida, Marte.

Abstract *This paper summarizes the fundamental principles in the search for life beyond Earth. The first step is the search for habitable environments, today or in the past, based on the environmental limits of life on Earth. The discovery of a habitable environment beyond Earth, or an environment with a high habitability potential, would justify the search for biomarkers: substances, or mixtures of chemical substances, or morphological patterns whose formation requires a biological agent. After more than 50 years of planetary robotic exploration, we still lack an adequate and agreed-upon strategy for the search for biomarkers in extraterrestrial environments. Therefore, life detection missions beyond Earth are intrinsically complex, and imperfect. As an example, the second half of the paper focuses on the habitability and search for biomarkers on Mars, a planet with a complex geologic history, and a potential abode for life billions of years ago, and possibly even in recent times.*

Keywords: *Habitability, water, biomarkers, life, Mars.*

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de vida más allá de la Tierra es uno de los retos científicos más complejos y fascinantes de nuestro tiempo. La dificultad radica, en gran medida, en que nuestra visión de los seres vivos es limitada—está basada únicamente en nuestro conocimiento de la vida en la Tierra. Por ello, toda estrategia de búsqueda adolece de un cierto terracentrismo. Sin embargo la labor es necesaria si realmente queremos llegar a comprender los aspectos más fundamentales del fenómeno que llamamos vida.

Marte ocupa un lugar central en la búsqueda de vida extraterrestre por su historia geológica pa-

recida a la de nuestro planeta, y que incluye periodos durante los cuales la superficie del planeta reunió las condiciones necesarias para albergar vida, y por su cercanía a la Tierra, lo que permite enviar misiones robóticas de forma más o menos continuada. A medida que aumenta nuestro conocimiento de la historia geológica de Marte, los modelos de habitabilidad se hacen más completos, robustos y detallados, e incluyen factores climáticos y geoquímicos. A su vez, los modelos permiten definir el tipo de biomarcadores que cabría buscar, y los lugares más probables para encontrarlos, así como los instrumentos más adecuados para su búsqueda.

Este artículo está dividido en dos partes. En la primera repasaremos los conceptos de habitabilidad y biomarcadores desde un punto de vista general, y en la segunda mitad hablaremos específicamente de la habitabilidad y las estrategias de búsqueda de biomarcadores en Marte.

EL CONCEPTO DE HABITABILIDAD

La *habitabilidad* es una medida del potencial para el desarrollo continuado de la vida en un ambiente determinado, como por ejemplo un lago, un desierto o un planeta (Odum, 1971). Distintas disciplinas científicas han utilizado a lo largo de los años variantes del concepto de habitabilidad. En ecología, la habitabilidad se centra a menudo en la capacidad de un ambiente para soportar, o no, el crecimiento de una especie o un tipo de organismo, teniendo en cuenta las interacciones entre el ambiente y el ecosistema. En el ámbito de las ciencias planetarias, el concepto de habitabilidad se entiende de forma más general a partir de una serie de requisitos básicos necesarios para la vida tal y como la conocemos (Kasting y Catling, 2003; Hoehler, 2007; Shock and Holland, 2007; Cockell *et al.*, 2016).

Los requisitos utilizados en las ciencias planetarias para determinar la habitabilidad de un ambiente pueden cambiar en función de las escalas espacio-temporales consideradas. Así, a la escala de un Sistema Solar, la *Zona Habitable Circunstelar* (CHZ, por sus siglas en inglés) es la región alrededor de una estrella donde planetas rocosos con suficiente presión atmosférica pueden contener agua líquida en su superficie (Kasting *et al.*, 1993). En su versión más simplificada, los modelos de habitabilidad circunstelar se basan únicamente en la distancia de un planeta respecto a su estrella, y si bien estos modelos son útiles para clasificar de forma genérica los planetas extrasolares (planetas que orbitan otras estrellas), son poco prácticos a una escala espacial más inmediata. Por ejemplo, la Luna se encuentra dentro de la zona habitable de nuestro Sistema Solar, y sin embargo no es un lugar habitable. Modelos más completos de habitabilidad circunstelar deben incorporar otros parámetros como la presión y composición atmosféricas, la presencia de campos magnéticos, y de procesos geológicos como la tectónica de placas (Schulze-Makuch *et al.*, 2011). A escala planetaria, un ambiente se considera habitable si, además de agua líquida, también contiene nutrientes y fuentes de energía bajo condiciones físico-químicas compatibles con los procesos biológicos más básicos (Cockell *et al.*, 2016) (Fig. 1). Esta definición es más específica, restrictiva y funcional, y permite comparar de una forma cualitativa, y en ocasiones cuantitativa, las condiciones de habitabilidad en distintos ambientes, como por ejemplo un lago y un desierto.

La definición más inmediata de habitabilidad emana de los requisitos necesarios para la vida en la Tierra, el único ejemplo que conocemos. Sin embargo existen razones de peso por las que estos tres requisitos básicos deberían ser, si no universales, sí muy comunes para la vida en el Universo.

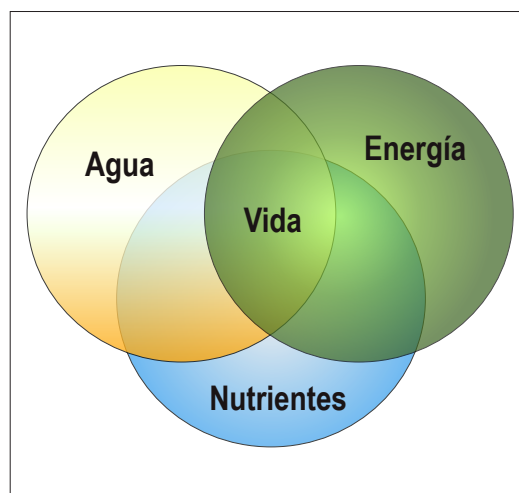


Fig. 1. Requisitos básicos para que un ambiente sea habitable para la vida tal y como la conocemos. Es posible que existan formas de vida en el Universo que se desarrollen en medios distintos al agua, o que utilicen otros tipos de nutrientes esenciales o formas de energía.

La molécula de agua (H₂O) juega un papel fundamental en la vida tal y como la conocemos. El origen de la vida ocurrió en un ambiente acuoso, y los principales procesos celulares ocurren en soluciones acuosas. La importancia del agua para la vida reside en tres propiedades fundamentales: capacidad para disolver compuestos iónicos, elevado calor específico y una mayor densidad en la fase líquida que en la fase sólida.

Además de agua líquida, todos los organismos terrestres requieren un aporte continuo de Carbono (C), Hidrógeno (H), Oxígeno (O), Nitrógeno (N), Fósforo (P) y Azufre (S). Estos seis elementos, comúnmente conocidos como “CHNOPS”, son indispensables para la vida tal y como la conocemos, al formar parte de biomoléculas como las proteínas, los lípidos y los ácidos nucleicos (ADN, ARN). Por lo tanto se asume que tienen que estar presentes en un ambiente para que éste sea habitable. Entre los elementos indispensables para la vida, el Carbono juega un papel central al ser el elemento principal responsable de la estructura molecular y la química de los seres vivos terrestres. El átomo de Carbono es versátil y puede combinarse con hasta cuatro elementos de forma simultánea, lo que le permite generar un gran número de soluciones moleculares con distintas propiedades estructurales y químicas. Así, los átomos de Carbono se pueden encadenar para formar macromoléculas como el ADN o las proteínas, dando lugar a estructuras complejas tridimensionales con propiedades emergentes¹ indispensables para la vida, como por ejemplo la catálisis química. Es posible concebir seres vivos no basados en el Carbono, pero ninguno de los elementos propuestos como posibles alternativas para estructurar a los seres vivos, por ejemplo el Silicio (Si), es comparable en versatilidad al Carbono, que además

¹ Propiedades que surgen en los niveles más altos de un sistema jerárquico debido a propiedades, procesos o agregados que ocurren en los niveles inferiores.

es uno de los elementos más abundantes en el Universo.

La mayoría de los procesos vitales consumen energía, y el metabolismo es la forma que tienen los seres vivos de generar energía útil para las células. Los seres vivos utilizan dos fuentes básicas de energía en la naturaleza: solar y química. Ciertos organismos denominados fotosintéticos, como por ejemplo las plantas, son capaces de captar energía solar y transformarla en energía química—que almacenan en forma de sustancias como los carbohidratos. Otros organismos extraen energía alimentándose de otros seres vivos, y hay organismos capaces de extraer energía de ciertas reacciones químicas entre compuestos inorgánicos que contienen elementos como el azufre o el nitrógeno.

Por último, para que un ambiente sea habitable, además de contener los tres ingredientes básicos para la vida, éstos deben coexistir en un rango específico de condiciones físicas y químicas. La vida, tal y como la conocemos, solamente puede existir dentro de un espacio multidimensional definido por factores físico-químicos como la temperatura, la salinidad, o el pH, entre otros (Tabla I) (McKay, 2014). Por ejemplo, hay organismos capaces de crecer a 121°C (Kashefi y Lovley, 2003), pero todos los seres vivos mueren a temperaturas superiores a 130°C debido a la inestabilidad de sus biomoléculas a tan altas temperaturas. El estudio de los llamados ambientes extremos ha permitido definir de una forma más o menos clara este espacio multidimensional para los organismos terrestres, que en su conjunto define los límites ambientales de habitabilidad para la vida en la Tierra.

Es posible que existan formas de vida en el universo no basadas en el carbono o en el agua, o seres vivos capaces de utilizar fuentes de energía alternativas a la luz o a las reacciones químicas, o incluso organismos capaces de sobrevivir más allá de los límites ambientales de la vida en la Tierra (Schulze-Makuch y Irwin, 2006). Sin embargo, el listado de requisitos y propiedades fundamentales para la vida tal y como la conocemos es útil a la hora de buscar formas de vida en ambientes parecidos a la Tierra, donde existen o existieron el agua líquida y las mismas fuentes de energía y nutrientes.

Cabe siempre recordar que un ambiente habitable no tiene necesariamente que estar habitado (Cockell *et al.*, 2012), y hay que tener presente que las condiciones de habitabilidad en un planeta pueden cambiar en el espacio y en el tiempo. Por ejemplo la Tierra ha sido un planeta habitable (y habitado) desde el origen de la vida, hace por lo menos 3.800 millones de años (Ma) (Mojzsis *et al.*, 1996; Nutman *et al.*, 2016). Sin embargo hay ambientes terrestres que no son habitables, o que están muy cerca de los límites de habitabilidad conocidos. Como veremos, se considera que la superficie de Marte fue habitable hace miles de millones de años, pero es hoy en día un lugar inhóspito y hostil para la vida.

EL CONCEPTO DE BIOMARCADOR

Los biomarcadores son sustancias químicas, mezclas de sustancias químicas o patrones morfológicos cuya formación requiere un agente biológico (Summons *et al.*, 2007). Los biomarcadores pueden ser indicadores de formas de vida existentes en la actualidad, o de formas de vida que existieron en el pasado pero se extinguieron, en cuyo caso hablamos de biomarcadores fósiles (Eigenbrode, 2007). En general, diferenciamos tres tipos básicos de biomarcadores: morfológicos, químicos y orgánicos (Des Marais *et al.*, 2008).

Biomarcadores morfológicos

El crecimiento y desarrollo celular, o el de un organismo multicelular o conjunto de organismos, a menudo genera estructuras y formas macroscópicas que son características de procesos biológicos. Por ejemplo, la conchas de un molusco o los huesos de un animal son estructuras con morfologías tan complejas que no pueden formarse en ausencia de vida, y como tal representan biomarcadores morfológicos. Por su resistencia, estos biomarcadores pueden quedar preservados en el registro fósil mucho después de la muerte del organismo. Sin embargo, los organismos microscópicos unicelulares, las primeras formas de vida en evolucionar, raras veces generan biomarcadores morfológicos porque casi nunca sintetizan estructuras minerales que puedan

PARÁMETRO	LÍMITE	NOTAS
Temperatura mínima	-15°C	Temperatura mínima registrada de división celular. Muchos microorganismos pueden sobrevivir, aún sin crecer y reproducirse, a temperaturas más bajas.
Temperatura máxima	122°C	Debido a la solubilidad de lípidos en agua y a la desestabilización de proteínas
Presión máxima	1.100 atm	
Luz mínima	Sin límite	Existen ecosistemas microbianos independientes de la luz solar
pH	0-12.5	
Salinidad	Solución saturada en NaCl	
Actividad agua (Aw)	0.6	Ciertos hongos y levaduras
	0.8	Algunas bacterias
Radiación UV	≥1.000 J m ⁻²	<i>Deinococcus radiodurans</i>
Radiación ionizante	50 Gy/hr	<i>Deinococcus radiodurans</i> es capaz de crecer bajo dosis continua
	12.000 Gy	Puede ser más alta en células secas o congeladas

Tabla I. Los límites ambientales de la vida tal y como la conocemos (basado en McKay, 2014).



Fig. 2. Estromatolitos con forma cónica fosilizados hace unos 3.500 Ma (Pilbara-Australia). Existen ejemplos modernos de estas bio-estructuras fósiles en muchos ambientes terrestres.

resistir el paso del tiempo. Aunque existen excepciones. En ambientes acuáticos someros algunos organismos unicelulares generan precipitados minerales macroscópicos, como por ejemplo los estromatolitos. Estas rocas de origen biológico pueden servir como biomarcadores mucho después de la muerte de los microorganismos que las formaron, incluso después de la desaparición del ambiente original en el que se formaron. De hecho, los estromatolitos fósiles son una de las evidencias más antiguas de vida en nuestro planeta (Nutman *et al.*, 2016) (Fig. 2).

Biomarcadores químicos

Muchos procesos biológicos generan condiciones termodinámicas y geoquímicas difíciles de reproducir bajo condiciones abióticas, dando lugar a los denominados biomarcadores químicos. Por ejemplo, la relación entre los isótopos naturales del Carbono ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) en compuestos orgánicos a menudo se utiliza como indicador de actividad biológica, porque ambos isótopos son utilizados de forma distinta por los seres vivos (Mojzsis *et al.*, 1996). En concreto, energéticamente es más favorable para los organismos utilizar el isótopo ligero (^{12}C) y, como resultado, los compuestos orgánicos sintetizados por los seres vivos suelen tener un cierto fraccionamiento isotópico, al estar enriquecidos en ^{12}C respecto a compuestos orgánicos no biológicos. Otros ejemplo de biomarcador químico es la coexistencia de compuestos que están en desequilibrio termodinámico. Por ejemplo, la atmósfera terrestre contiene un 21% de oxígeno (O_2), y un 0.00007% de metano (CH_4). Pese a su baja concentración, el metano no debería estar presente en la atmósfera ya que se oxida en presencia de O_2 convirtiéndose en dióxido de carbono (CO_2) y agua. La coexistencia de ambos gases en la atmósfera durante largos periodos de tiempo significa que están siendo regenerados de forma continua, y si bien tanto el O_2 como el CH_4 se pueden formar por procesos abióticos, el único mecanismo conocido capaz de generar las concentraciones observadas en la atmósfera durante escalas de tiempo geológicas es la vida (Hitchcock y Lovelock, 1967). Por este motivo, este tipo de desequilibrios químicos se pueden utilizar como biomarcadores.

Biomarcadores orgánicos

Los biomarcadores orgánicos son moléculas sintetizadas por seres vivos cuyas características químicas

y/o estructurales son indicadores de actividad biológica (Summons *et al.*, 2007). Quizás el ejemplo más familiar sea la molécula de ADN utilizada para almacenar información genética (Fig. 3A). No existe ningún proceso abiótico capaz de generar una molécula tan compleja como el ADN, y por lo tanto su presencia en una muestra puede considerarse evidencia de vida. Sin embargo, moléculas complejas como el ADN son también frágiles y susceptibles a degradación con el paso del tiempo. Por ello, este tipo de biomarcadores se utilizan por lo general para detectar formas de vida actuales, o que desaparecieron en un periodo relativamente reciente, hace menos de un millón de años (Allentoft *et al.*, 2012).

La preferencia por parte de los seres vivos de ciertas propiedades moleculares también genera biomarcadores orgánicos. Por ejemplo, los aminoácidos, los ladrillos básicos con los que se forman las proteínas, existen en la naturaleza en dos

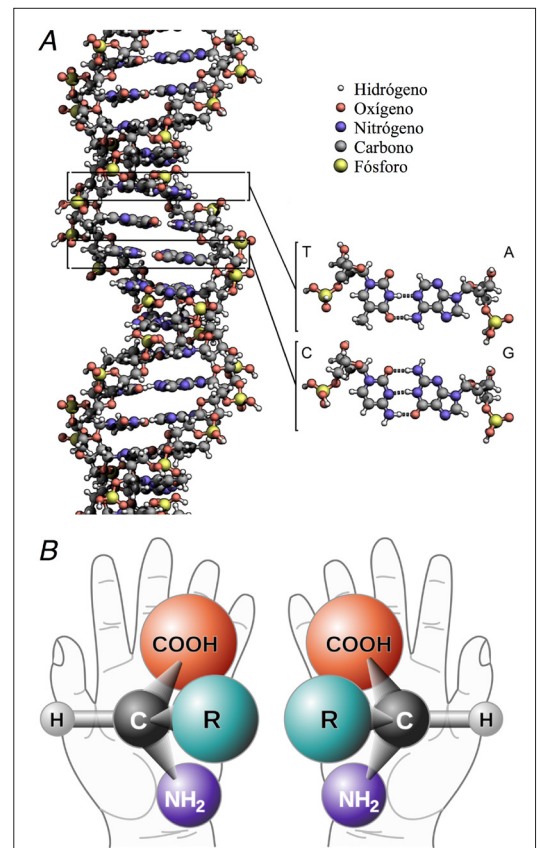


Fig. 3. Ejemplos de biomarcadores orgánicos. (A) Una molécula tan compleja como el ADN solamente se puede producir por procesos biológicos. Como tal, es un biomarcador muy robusto. Sin embargo, es poco probable que procesos evolutivos en otros planetas diesen lugar a la misma molécula compleja, por lo tanto, hasta donde sabemos, el ADN no sería un biomarcador universal (Fuente: <https://en.wikipedia.org/wiki/DNA>). (B) Los aminoácidos (y muchas otras moléculas orgánicas) tienen dos formas quirales denominadas levógira (L) y dextrógira (D), químicamente idénticas pero estructuralmente diferentes, de forma que una es la imagen especular de la otra. La vida en la Tierra únicamente utiliza la forma L para sintetizar proteínas, y esta selectividad podría representar un biomarcador. Es muy posible que muchas formas de vida en el Universo muestren el mismo tipo de selectividad molecular (Fuente: [https://en.wikipedia.org/wiki/Chirality_\(chemistry\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Chirality_(chemistry))).

formas quirales denominadas levógira (L) y dextrógira (D) (también llamados isómeros ópticos o estereoisómeros). Ambas formas son químicamente idénticas, pero estructuralmente diferentes, de forma que un estereoisómero es la imagen especular del otro (Fig. 3B). En mezclas de aminoácidos formadas por procesos abióticos, las formas L y D aparecen en proporciones iguales o muy parecidas. Dichas muestras se denominan racémicas. Sin embargo, los seres vivos terrestres únicamente utilizan el estereoisómero L para formar sus proteínas. Ello se debe a que solamente mezclas de estereoisómeros puras pueden generar las estructuras tridimensionales complejas que confieren las propiedades catalíticas y estructurales de las proteínas. Cuando un organismo muere, sus proteínas se descomponen dando lugar a mezclas no-racémicas de aminoácidos (un solo estereoisómero representa el 100% de la mezcla) que se pueden utilizar como biomarcador (Bada y McDonald, 1995; Botta y Bada, 2008; Davila y McKay, 2014; Creamer *et al.*, 2016). Sin embargo, con el paso del tiempo (millones de años) los aminoácidos tienden a racemizarse de forma espontánea, y pueden llegar a perder su carácter biológico (Bada y McDonald, 1995).

Los lípidos son un tercer tipo de biomarcadores orgánicos que se caracterizan por su resistencia a la degradación (Eigenbrode *et al.*, 2007). En los organismos unicelulares los lípidos se concentran principalmente en la membrana celular, y estructuralmente se caracterizan por tener cadenas largas de átomos de Carbono e Hidrógeno, que dan lugar a los llamados *hidrocarburos* al descomponerse la molécula primaria. Una vez formados, los hidrocarburos son muy resistentes a la degradación y por lo tanto ese tipo de moléculas pueden utilizarse como biomarcadores fósiles en escalas de tiempo de cientos de millones de años (Brocks y Summons, 2014).

EL CONCEPTO DE GEOMARCADOR

Como veremos en la siguiente sección, si alguna vez existieron formas de vida en Marte es probable que éstas se extinguieran hace cientos o miles de millones de años. En este caso, la búsqueda de evidencias de vida se convierte en una tarea detectivesca que va más allá de la búsqueda de biomarcadores en el registro sedimentario, y requiere de un estudio detallado de las condiciones (paleo)ambientales en las que formaron dichos sedimentos. Ello permite identificar ambientes que pudieron haber sido habitables en el pasado (aunque no lo sean en el presente), y entre ellos, permite valorar qué ambientes pudieron favorecer la preservación de biomarcadores. El estudio de las condiciones (paleo)ambientales se realiza mediante una serie de *geomarcadores*, o características mineralógicas, geoquímicas, y sedimentológicas, que permiten reconstruir las condiciones físico-químicas bajo las que se formaron los distintos depósitos sedimentarios (Martínez-Frías *et al.*, 2007). Así, el descubrimiento de ciertos geomarcadores en el registro geológico de Marte por parte de misiones como “Mars Exploration Rovers” (MER) o

“Mars Science Laboratory” (MSL) han permitido demostrar la existencia en el pasado de ambientes acuáticos que pudieron haber albergado la vida tal y como la conocemos (Squyres *et al.*, 2004; Grzinger *et al.*, 2012)

LA HISTORIA DE LA HABITABILIDAD EN MARTE

Las misiones *Viking* de la agencia espacial Americana (NASA, por sus siglas en inglés) realizaron la primera y, hasta la fecha, única búsqueda de vida en Marte en la década de 1970 (Klein *et al.*, 1972). Si bien los resultados obtenidos por las dos sondas gemelas en la superficie del planeta todavía no han sido del todo comprendidos, el consenso de la comunidad científica es que los datos indican que no existe vida en la superficie del planeta en la actualidad (Klein, 1999). Ello se debe a que Marte es hoy un desierto gélido extremo y absoluto. La superficie recibe dosis esterilizantes de radiación ultravioleta (UV) y la cantidad de agua en la atmósfera es unas 100 veces menor que en las regiones más áridas de la Tierra (Haberle *et al.*, 2001). La temperatura extremadamente fría y la baja presión atmosférica, cerca del punto triple del agua, hacen que el agua líquida sea inestable, y por lo tanto la superficie puede considerarse inhabitable.

Pero Marte no fue siempre así. Hace unos 4.000 Ma Marte fue un planeta tremendamente dinámico, parecido a la Tierra primigenia (Carr y Head, 2010). Durante este periodo Marte generó un campo magnético global (Acuña *et al.*, 1998), y la superficie del planeta fue bombardeada por millones de impactos de meteoritos y asteroides, algunos de ellos de tal magnitud que convirtieron la corteza del planeta en un océano de roca fundida. La energía liberada por los impactos de menor calibre pudo generar sistemas hidrotermales de duraciones estimadas entre miles y cientos de miles de años (Abramov y Kring, 2005). Al mismo tiempo, partes del interior del planeta fueron literalmente regurgitadas, formando grandes provincias volcánicas, incluida la región conocida como Tharsis, donde se ubica el Monte Olimpo, el volcán más grande del Sistema Solar. Las condiciones ambientales durante este periodo todavía no han sido del todo esclarecidas, pero las emisiones volcánicas junto con los impactos de meteoritos de mayor tamaño posiblemente causaron grandes cambios climáticos, llegando a modificar al menos de forma temporal la mezcla de gases en la atmósfera y la temperatura en la superficie del planeta (Carr y Head, 2010).

Hasta hace unos 3.000 Ma Marte mantuvo un sistema hidrológico de suficiente entidad como para formar grandes redes fluviales que inundaron miles de cuencas sedimentarias dando lugar a lagos, y quizás también a pequeños mares (Fig. 4) (Mustard *et al.*, 2008; DiAchille Hynek, 2010; Hynek *et al.*, 2010). Incluso se ha especulado sobre la existencia de un gran océano en las tierras bajas del hemisferio Norte (Baker *et al.*, 1991). A partir de datos obtenidos por el robot *Curiosity* de la NASA se sabe que al menos el lago del cráter Gale reunió las condiciones básicas de habitabilidad (agua

líquida, nutrientes y fuentes de energía) bajo condiciones físico-químicas compatibles con los procesos vitales (Grotzinger *et al.*, 2015). Sin embargo, uno de los misterios todavía por resolver con respecto a la evolución de Marte es la temperatura global cuando todavía existían lagos en la superficie del planeta. A menudo se habla de un Marte primigenio “cálido y húmedo”, con una atmósfera densa y enriquecida en CO₂ capaz de mantener la temperatura media en la superficie del planeta por encima de los 0°C. Sin embargo, tanto los modelos climáticos como las estructuras geomorfológicas en la superficie del Marte y la composición de ciertos sedimentos sugieren que Marte siempre fue un planeta más o menos gélido, parecido a la regiones polares terrestres (Fairén *et al.*, 2009; Fairén, 2010), donde el agua está en forma de hielo y nieve durante gran parte del año, pero existe un ciclo hidrológico completo gracias a las altas temperaturas que se alcanzan en verano, capaz de alimentar ríos, lagos, glaciares, etc.

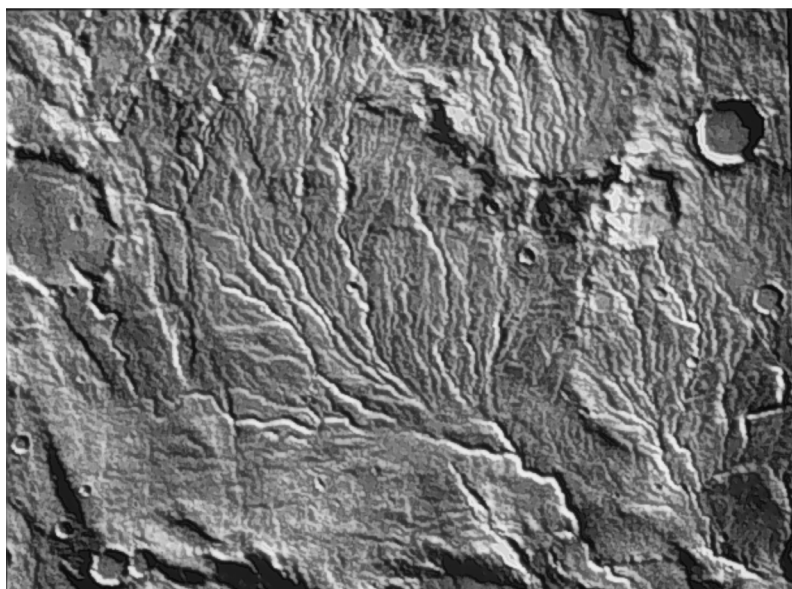


Fig. 4. Ejemplo de red fluvial en la superficie de Marte formada durante el periodo Noeico, indicativa de un ciclo hidrológico relativamente intenso en la superficie del planeta. Foto crédito: NASA

LOS ÚLTIMOS AMBIENTES HABITABLES EN MARTE

La mayoría de los modelos asumen que el periodo habitable de Marte terminó con la desaparición de ríos y lagos hace unos 3.000-3.500 Ma (McKay y Davis, 1991). Sin embargo, esta visión es incompleta. Muchos seres vivos (entre los que nos incluimos los humanos) habitan ambientes no acuáticos y la colonización de tierras emergidas en la Tierra ocurrió aproximadamente hace 3.000 Ma, cuando todavía existían grandes masas de agua líquida en Marte (Carr y Head, 2010). Los primeros organismos terrestres² fueron *procariontes* (bacterias y/o

² El término “terrestre” en las siguientes secciones se refiere a seres vivos que habitan ambientes no acuáticos (tierras emergidas), no a habitantes del planeta Tierra. Centraremos la discusión en microorganismos terrestres, no en organismos multicelulares como las plantas y animales.

arqueas) pertenecientes al sub-grupo conocido como *Terrabacteria*³ (Battistuzzi y Hedges, 2009). Los representantes de este sub-grupo poseen adaptaciones específicas para sobrevivir en ambientes no acuáticos, como por el ejemplo la resistencia a la desecación, a la radiación ultravioleta (UV), o a concentraciones altas de sales, y su supervivencia depende de fuentes de agua atmosféricas como la lluvia, la nieve, o el rocío (Pointing y Benlap, 2012).

Si alguna vez existió vida en Marte capaz de colonizar las tierras emergidas de una forma similar a los organismos que pertenecen al grupo *Terrabacteria*, entonces la vida en el planeta pudo haber existido mucho después de la desaparición de lagos y ríos (McKay *et al.*, 1992; Davila y Schulze-Makuch, 2016). Microorganismos especialistas en sobrevivir en ausencia de grandes cantidades de agua podrían haber colonizado nichos como el regolito, los glaciares, el permafrost y las rocas, y utilizar fuentes atmosféricas de agua como la lluvia o la nieve. Los ecosistemas microbianos en ambientes desérticos de la Tierra proporcionan ejemplos del tipo de formas de vida que pudieron existir en Marte tras la desaparición de las grandes masas de agua de la superficie (Fairén *et al.*, 2010). A medida que un ambiente se hace más árido⁴, las comunidades de organismos responden colonizando distintos tipos de sustratos para maximizar el acceso a agua líquida (Pointing y Benlap, 2012). Ello resulta en cambios ecológicos profundos y en comunidades cada vez más sencillas y localizadas. En las regiones más secas de la Tierra, los ambientes habitables se reducen a ciertos sustratos rocosos. Las comunidades de microorganismos que habitan sustratos rocosos se denominan comunidades litobióticas⁵, de las que existen tres tipos básicos: Las comunidades *epilíticas* (*epi*=sobre, *lítica*=roca) que colonizan la superficie de rocas, las comunidades *hipolíticas* (*hipo*=bajo, *lítica*=roca) que colonizan la parte ventral de ciertas rocas y piedras, y las comunidades *endolíticas* (*endo*=dentro, *lítica*=roca) que colonizan el interior de ciertas rocas porosas (Friedmann, 1980; Nienow, 2009; Wierzchos *et al.*, 2012) (Fig. 5). La colonización de sustratos rocosos es una estrategia de supervivencia frente a la escasez de agua, ya que cuando se humedece, el sustrato rocoso es capaz de retener el agua líquida durante más tiempo que los suelos. Además, el sustrato rocoso sirve de protección contra la radiación UV y la erosión por viento, factores que también limitan la habitabilidad en zonas áridas (Golubic *et al.*, 1981). Los últimos reductos habitables en las regiones más secas de nuestro planeta se encuentran en el interior de rocas de sal (Wierzchos *et al.*, 2006). Las de-

³ El otro gran sub-grupo de organismos procariontes acuáticos se denomina Hidrobacteria.

⁴ No todos los desiertos son iguales. Las zonas desérticas se clasifican en función de su índice de aridez (AI, por sus siglas en inglés), definido como la relación entre la precipitación media anual y la evapotranspiración. Así, los desiertos se clasifican en semi-áridos (0.20 < AI < 0.50), áridos (0.05 < AI < 0.20) e hiperáridos (AI < 0.05).

⁵ Del griego *lithos*-λίθος ‘piedra’ + *bios*-βίος ‘vida’

nominadas sales higroscópicas se caracterizan por su capacidad para absorber agua incluso en fase vapor. Cuando la humedad relativa alcanza un valor crítico, los cristales de sal se disuelven formando una salmuera, por un proceso conocido como deliquesencia. La estrategia de colonizar rocas de sal para aprovechar los periodos de deliquesencia se ha observado en el desierto de Atacama, en el norte de Chile (Davila *et al.*, 2008; Wierzchos *et al.*, 2006, 2012a,b).

Así pues, el periodo de habitabilidad de Marte pudo haberse extendido más allá de la existencia de grandes masas de agua en la superficie del planeta, si uno considera las estrategias de supervivencia empleadas por microorganismos en ambientes desérticos de la Tierra. Pero con el aumento de la aridez, los ecosistemas habrían sido cada vez más sencillos y localizados, formando el equivalente a oasis biológicos en un mundo mayormente abiótico. Cabe preguntarse entonces, ¿Cuándo fue el último periodo habitable en la superficie de Marte?

Una forma de acotar el último periodo habitable en la superficie de Marte es comparando el grado de aridez en la superficie del planeta con los desiertos más secos de la Tierra. Cabe enfatizar que dicha comparación es limitada, ya que además de la falta de agua, existen otros factores que hacen de la superficie de Marte un ambiente extremadamente hostil, como las bajas temperaturas, la intensa radiación UV, y la escasa presión atmosférica. Sin embargo, como primera aproximación, la comparación puede resultar útil. La cantidad de agua atmosférica en las partes más secas del desierto de Atacama es aproximadamente 1 mm⁶. Esta cantidad de agua es suficiente para sustentar a las comunidades de microorganismos que habitan el interior de rocas de sales higroscópicas, y por lo tanto se puede considerar, por el momento, como la mínima cantidad de agua necesaria para sustentar la vida en un ambiente desértico. En comparación, la cantidad de agua en la atmósfera marciana en la actualidad oscila entre 3 y 100 μm (los valores más altos se observan en las regiones polares, encima de los casquetes de hielo), esto es entre 10 y 300 veces menos que en las partes más secas del desierto de Atacama (Haberle *et al.*, 2001). Sin embargo, los modelos climáticos de Marte indican que durante periodos de alta oblicuidad acontecidos en los últimos 10 Ma, la cantidad de agua en la atmósfera de Marte puede aumentar hasta 3000 μm precipitables en zonas polares, y 50 μm precipitables en zonas más ecuatoriales (Forget *et al.*, 2006), valores comparables a los del desierto de Atacama.

Como dato significativo, recientemente se han detectado en algunas zonas de Marte unos rasgos aparentemente formados por agua líquida, posiblemente debido a la deliquesencia de sales higroscópicas como el perclorato (McEwen *et al.*, 2011; Ojha

6 La cantidad de agua en la atmósfera se suele medir como la columna de agua precipitable (PWV, por sus siglas en inglés), y que se define como el espesor de agua que se alcanzaría si todo el vapor de agua contenido en una columna de 1 m² de diámetro y 10 km de altura precipitase en forma de lluvia.



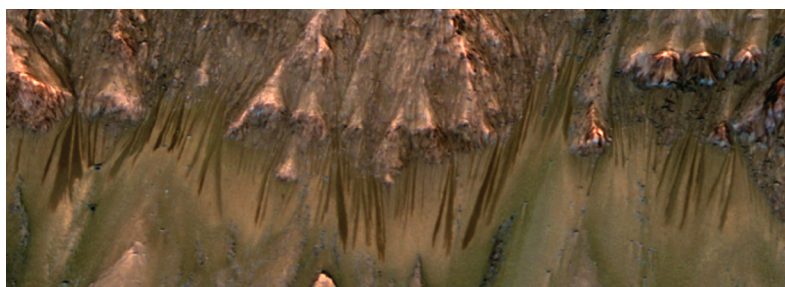
Fig. 5. Comunidades endolíticas (verde) habitan el interior de rocas de areniscas en los Valles Secos de la Antártida, uno de los lugares más fríos y secos del planeta, considerado un ambiente análogo a Marte.

et al., 2015) (Fig. 6). Si bien la naturaleza exacta de estas estructuras todavía se desconoce, la posibilidad de que la deliquesencia de sales pueda generar agua líquida en Marte en la actualidad sugiere que la ventana de habitabilidad de Marte se puede haber cerrado en épocas relativamente recientes (durante la segunda parte del periodo Amazónico, hace menos de 1800 Ma) (Davila y Schulze-Makuch, 2016).

LA BÚSQUEDA DE BIOMARCADORES EN MARTE

Como ya mencionamos anteriormente, las misiones *Viking* realizaron la primera búsqueda de vida en Marte. La estrategia de las misiones *Viking* se basaba en la hipótesis de que existen en la actualidad seres vivos en el regolito marciano, y su presencia podría detectarse al estimular su actividad metabólica mediante experimentos de incubación, por ejemplo en forma de intercambio de gases debido a la respiración, a la fijación de carbono, o al consumo de nutrientes (Klein *et al.*, 1972). Ninguno de los experimentos realizados por las dos sondas arrojó resultados que demostrasen de forma concluyente la presencia de seres vivos (Klein *et al.*, 1999), y en la actualidad muchos investigadores consideran que la incubación para estimular la actividad metabólica de microorganismos no es la estrategia más adecuada para buscar evidencias de vida. Además, como vimos en el apartado anterior, el regolito marciano puede que no fuera el mejor sitio para buscar evidencias de vida.

Fig. 6. Rasgos oscuros en la superficie de Marte aparentemente formados por agua líquida. Estos rasgos alargados se forman en las laderas de muchos cráteres de impacto durante la primavera y el verano. Es posible que estén causados por procesos de deliquesencia de ciertas sales, o por depósitos de hielo cerca de la superficie. Foto crédito: NASA



Sin embargo, después de 40 años todavía no existe una estrategia definida y consensuada para la búsqueda de biomarcadores en Marte. La búsqueda de biomarcadores morfológicos puede hacerse de forma relativamente sencilla utilizando cámaras, pero este tipo de biomarcadores suelen ser ambiguos, sobretudo en rocas formadas hace miles de millones de años. Los biomarcadores orgánicos son más definitivos, pero también son más frágiles y su detección requiere de instrumentos muy sofisticados, caros y complejos. A la hora de diseñar estrategias de búsqueda de biomarcadores en Marte, o en cualquier otro lugar del Sistema Solar, hay que barajar aspectos científicos, pero también aspectos tecnológicos y económicos. A menudo, la mejor estrategia científica es incompatible con las realidades tecnológicas y económicas del momento, y por ello las misiones robóticas a otros planetas son el resultado de compromisos a menudo poco satisfactorios desde un punto de vista puramente científico. Aspectos económicos y tecnológicos aparte, hay dos factores principales a tener en cuenta para la búsqueda de biomarcadores en Marte: (1) el tipo de ambiente estudiado, y (2) la universalidad del biomarcador.

Distintos ambientes, distintos biomarcadores

El tipo de biomarcador que se busque depende en gran medida del tipo de ambiente estudiado. Como norma general, se asume que las rocas sedimentarias formadas hace miles de millones de años no deberían contener biomarcadores orgánicos, debido a procesos diagenéticos como la oxidación, la hidrólisis, o los efectos derivados de la radiación, que causan la descomposición de macromoléculas orgánicas y la consecuente pérdida de su impronta biológica. Pese a las bajas temperaturas de Marte y a la extrema aridez, biomoléculas complejas como el ADN o las proteínas deberían degradarse en decenas de millones de años (Allentoft *et al.*, 2012). En casos excepcionales algunos biomarcadores orgánicos como los hidrocarburos podrían quedar preservados durante cientos de millones de años (Eigenbrode, 2007). Por ello, las misiones robóticas que estudien rocas sedimentarias formadas durante los periodos Noeico (4.500-3.800 Ma) o Hespérico (3.800-3.000 Ma), muy probablemente se centrarán en la búsqueda de biomarcadores morfológicos o químicos, muy resistentes a la degradación, pero de mayor ambigüedad. Por otro lado, las misiones robóticas que estudien ambientes que pudieron ser habitables en épocas más recientes, como por ejemplo depósitos de sales higroscópicas o zonas polares donde existe hielo cerca de la superficie (McKay *et al.*, 2013), podrían buscar biomarcadores orgánicos como aminoácidos u otras biomoléculas más complejas.

La universalidad del biomarcador

Una de las grandes dificultades a la hora de establecer el tipo de biomarcadores que se podrían buscar en Marte es su *universalidad*. Todos los biomarcadores conocidos se basan en el estudio de la vida en la Tierra. Por ello la búsqueda de un biomarcador específico en Marte debe ir precedida

de argumentos sólidos de por qué cabría esperar que la vida en Marte también produjera dicho biomarcador. La universalidad es un factor menor en el caso de los biomarcadores morfológicos y químicos ya que éstos se caracterizan por salirse de un patrón abiótico conocido. De forma figurativa, y a veces literal, este tipo de biomarcadores “saltan a la vista” (véase la Fig. 3). Por otro lado los biomarcadores orgánicos pueden ser muy difíciles de detectar, sobretudo si aparecen en concentraciones bajas o están parcialmente alterados, sin embargo una vez detectados su interpretación como biomarcador suele ser robusta. Ahora bien, tanto la composición como la estructura de las biomoléculas son el resultado de complejos procesos evolutivos que ocurren durante millones de años como respuesta a cambios en el ambiente. Por ello es improbable que entre dos ambientes aislados como la Tierra y Marte los procesos evolutivos diesen lugar a las mismas biomoléculas complejas. Por ejemplo, es poco probable que seres vivos en Marte utilizaran el ADN como molécula para almacenar su información genética⁷ (y es imposible predecir el tipo de molécula que podrían haber utilizado en su lugar). Lo mismo puede haber ocurrido con otras biomoléculas complejas como las proteínas, que podrían estar formadas por aminoácidos distintos a los que utilizan los organismos terrestres. Una forma de evitar estas idiosincrasias es centrar la búsqueda en patrones o rasgos que sean independientes de la estructura y composición de las biomoléculas, como por ejemplo, la presencia exclusiva de ciertos enantiómeros (Davila y McKay, 2014). Así, es probable que seres vivos en Marte solamente utilizaran L- o D-aminoácidos para formar sus proteínas, dando lugar a mezclas no-racémicas que podrían utilizarse como biomarcadores, aún sin saber la composición exacta de los aminoácidos en la mezcla.

Cuando todas las dificultades y limitaciones están encima de la mesa, queda claro que la búsqueda de biomarcadores en Marte no es tarea sencilla. Y ello queda reflejado en las distintas estrategias de exploración que las agencias espaciales asumen. En los próximos diez años va a haber por los menos dos misiones a la superficie de Marte que tratarán de buscar evidencias de vida pasada en el planeta. La Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), enviará a Marte el rover de la misión ExoMars en 2020, capaz de tomar muestras de hasta dos metros de profundidad, y estudiar su mineralogía y contenido orgánico. Uno de los instrumentos a bordo del rover (MOMA—Mars Organics Molecule Analyzer) tiene como objetivos detectar moléculas orgánicas, y determinar su origen. Además, el rover tendrá un sistema de cámaras y otros instrumentos para estudiar rocas sedimentarias, y buscar posibles biomarcadores morfológicos. ExoMars es por tanto una misión concebida para

⁷ Un posible escenario bajo el cuál seres vivos en Marte podrían contener ADN sería el intercambio de vida entre Marte y la Tierra a través de meteoritos. En ese caso, la vida en ambos planetas compartiría un mismo origen. Este escenario encaja en el concepto de panspermia.

detectar un rango amplio de biomarcadores. Por otro lado la NASA enviará también en 2020 un rover a la superficie del planeta cuyo objetivo será el estudio de la composición de rocas sedimentarias y la selección de una treintena de muestras para que sean transportadas a la Tierra en el futuro (quizás a mediados de la próxima década⁸) (Mustard *et al.*, 2013). Esta estrategia, conocida en inglés como Mars Sample Return (MSR) se basa en la idea de que la única forma de establecer con certeza si existen biomarcadores en Marte es a través del estudio de las muestras con las técnicas más avanzadas en los laboratorios más sofisticados en la Tierra.

CONCLUSIONES

La búsqueda de vida más allá de la Tierra es uno de los retos científicos más complejos y fascinantes de nuestro tiempo. Marte ocupa un lugar central en esta búsqueda por su historia geológica y por su cercanía a la Tierra, lo que permite enviar misiones robóticas de forma más o menos continuada.

En la actualidad la superficie de Marte es un lugar inhóspito y hostil, pero el planeta fue muy distinto en el pasado y hoy sabemos que poco después de su formación reunió las condiciones necesarias para albergar vida, agua líquida, nutrientes y fuentes de energía.

Los biomarcadores son sustancias químicas o patrones morfológicos cuya formación requiere un agente biológico, el cual puede estar vivo o muerto en el momento de su detección. Dado que la vida en la Tierra es el único ejemplo del que disponemos, siempre hay que tener en cuenta que todos los biomarcadores conocidos adolecen de *terracentrismo*. En general, diferenciamos tres tipos básicos de biomarcadores: morfológicos, químicos y orgánicos.

El periodo de habitabilidad de Marte pudo haberse extendido más allá de la existencia de grandes masas de agua en la superficie del planeta, si uno considera las estrategias de supervivencia empleadas por microorganismos en ambientes desérticos en la Tierra. Pero con el aumento de la aridez los ecosistemas habrían sido cada vez más sencillos y localizados, formando el equivalente a oasis de supervivencia.

La posibilidad de que la deliquesencia de sales pueda generar agua líquida en Marte en la actualidad sugiere que la ventana de habitabilidad en el planeta se puede haber cerrado en épocas relativamente recientes (durante el periodo Amazónico).

Todavía no disponemos de una estrategia definida y consensuada para la búsqueda de biomarcadores en Marte. La misión ExoMars de la Agencia Espacial Europea, que lanzará un rover a Marte en 2020, ha sido concebida para detectar un espectro amplio de posibles biomarcadores en la superficie del planeta. La misión Mars2020 de la NASA estu-

diará de la composición de rocas sedimentarias y seleccionará de una treintena de muestras para que sean transportadas a la Tierra en el futuro.

BIBLIOGRAFÍA

Abramov, O. y Kring, D.A. (2005). Impact-induced hydrothermal activity on early Mars. *Journal of Geophysical Research*, 110, E12S09.

Acuna, M.H., Connerney, J.E.P., Wasilewski, P., Lin, R.P., Anderson, K.A., Carlson, C.W., McFadden, J., Curtis, D.W., Mitchell, D., Reme, H., Mazelle, C., Sauvaud, J.A., D'Uston, C., Cros, A., Medale, J.L., Bauer, S.J., Cloutier, P., Mayhew, M., Winterhalter, D. y Ness, N. F. (1998). Magnetic Field and Plasma Observations at Mars: Initial Results of the Mars Global Surveyor Mission. *Science*, 279, 1676–1680

Allentoft, M.E., Collins, M., Harker, D., Haile, J., Oskam, C.L., Hale, M.L., Campos, P. F., Samaniego, J.A., Gilbert, M.T.P., Willerslev, E., Zhang, G., Scofield, R.P., Holdaway, R.N. y Bunce, M. (2012). The half-life of DNA in bone: measuring decay kinetics in 158 dated fossils. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279, 4724–4733.

Bada, J.L. y McDonald, G.D. (1995). Amino Acid Racemization on Mars: Implications for the Preservation of Biomolecules from an Extinct Martian Biota. *Icarus*, 114, 139–143.

Baker, V.R., Strom, R.G., Gulick, V.C., Kargel, J.S. y Komatsu, G. (1991). Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars. *Nature*, 352, 589–594.

Battistuzzi, F.U. y Hedges, S.B. (2009). A major clade of prokaryotes with ancient adaptations to life on land. *Molecular Biology and Evolution*, 26, 335–343.

Botta, O. y Bada, J.L. (2008). Strategies of Life Detection. In: Botta, O., Bada, J.L., Gomez-Elvira, J., Javaux, E., Selsis, F. y Summons, R. (Eds.). *Space Sciences Series of ISSI*, Springer US, Boston, MA, 2008, Vol. 25.

Brocks, J.J. y Summons, R.E. (2014). Sedimentary Hydrocarbons, Biomarkers for Early Life. In *Treatise on Geochemistry*, Elsevier, 61–103.

Carr, M.H. y Head, J. W. (2010). Geologic history of Mars. *Earth and Planetary Science Letters*, 294, 185–203.

Cockell, C.S., Balme, M., Bridges, J.C., Davila, A. y Schwenzer, S.P. (2012). Uninhabited habitats on Mars. *Icarus*, 217, 184–193.

Cockell, C.S., Bush, T., Bryce, C., Direito, S., Fox-Powell, M., Harrison, J.P., Lammer, H., Landenmark, H., Martin-Torres, J., Nicholson, N., Noack, L., O'Malley-James, J., Payler, S.J., Rushby, A., Samuels, T., Schwender, P., Wadworth, J. y Zorzano, M.P. (2016) Habitability: a Review. *Astrobiology*, 16, 89–117.

Creamer, J.S., Mora, M.F. y Willis, P. A. (2017). Enhanced resolution of chiral amino acids with capillary electrophoresis for biosignature detection in extraterrestrial samples. *Analytical Chemistry*, 89, 1329–1337.

Davila, A.F. y McKay, C.P. (2014). Chance and necessity in biochemistry: implications for the search for extraterrestrial biomarkers in Earth-like environments. *Astrobiology*, 14, 534–40.

Davila, A.F. y Schulze-Makuch, D. (2016). The Last Possible Outposts for Life on Mars. *Astrobiology*, 16, 159–68.

Davila, A.F., Duport, L.G., Melchiorri, R., Jaenchen, J., Valea, S., de los Ríos, A., Fairén, A.G., Mohlmann, D., McKay, C.P., Ascaso, C., y Wierzbos, J. (2010) Hygroscopic salts and the potential for life on Mars. *Astrobiology*, 10, 617–628.

⁸ En este caso, habría una segunda misión encargada de ir a Marte, recoger las muestras seleccionadas y transportarlas a la Tierra.

- Davila, A.F., Gómez-Silva, B., de los Ríos, A., Ascaso, C., Olivares, H., McKay, C.P., y Wierzchos, J. (2008) Facilitation of endolithic microbial survival in the hyper-arid core of the Atacama Desert by mineral deliquescence. *Journal of Geophysical Research*, 113. G01028. doi:10.1029/2007JG000561.
- Des Marais, D.J., Nuth, J.A., Allamandola, L.J., Boss, A.P., Farmer, J.D., Hoehler, T.M., Jakosky, B.M., Meadows, V.S., Pohorille, A., Runnegar, B. y Spormann, A.M. (2008). The NASA Astrobiology Roadmap. *Astrobiology*, 8, 715–730
- Di Achille, G. y Hynek, B.M. (2010). Ancient ocean on Mars supported by global distribution of deltas and valleys. *Nature Geoscience*, 3, 459–463.
- Eigenbrode, J. L. (2007). Fossil Lipids for Life-Detection: A Case Study from the Early Earth Record. *Space Science Reviews*, 135, 161–185
- Fairén, A.G. (2010). A cold and wet Mars. *Icarus*, 208, 165–175.
- Fairén, A.G., Davila, A.F., Gago-Duport, L., Amils, R. y McKay, C.P. (2009). Stability against freezing of aqueous solutions on early Mars. *Nature*, 459, 401–404
- Fairén, A.G., Davila, A.F., Lim, D., Bramall, N., Bonaccorsi, R., Zavaleta, J., Uceda, E.R., Stoker, C., Wierzchos, J., Dohm, J.M., Amils, R., Andersen, D. y McKay, C.P. (2010). Astrobiology through the ages of Mars: the study of terrestrial analogues to understand the habitability of Mars. *Astrobiology*, 10, 821–843.
- Forget, F., Haberle, R.M., Montmessin, F., Levrard, B. y Head, J. W. (2006). Formation of glaciers on Mars by atmospheric precipitation at high obliquity. *Science*, 311, 368–71.
- Friedmann, E.I. (1980). Endolithic microbial life in hot and cold deserts. *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 10, 223–35.
- Golubic, S., Friedmann, E.I. y Schneider, J. (1981) The Lithobiontic Ecological Niche, with Special Reference to Microorganisms. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 51, 475–478
- Grotzinger, J.P. et al. (2014). Habitable Fluvio-Lacustrine Environment at Yellowknife Bay, Gale Crater, Mars. *Science*, 343. DOI: 10.1126/science.1242777
- Haberle, R.M., McKay, C.P., Schaeffer, J., Cabrol, N.A., Grin, E.A., Zent, A.P. y Quinn, R. (2001). On the possibility of liquid water on present-day Mars. *Journal of Geophysical Research*, 106, 23317.
- Hitchcock, D.R. y Lovelock, J.E. (1967). Life detection by atmospheric analysis. *Icarus*, 7, 149–159.
- Hoehler, T.M. (2007). An energy balance concept for habitability. *Astrobiology*, 7, 824–38.
- Hynek, B.M., Beach, M., Hoke y M.R.T. (2010). Updated global map of Martian valley networks and implications for climate and hydrologic processes. *Journal of Geophysical Research*, 115, E09008.
- Kashefi, K. y Lovley, D.R. (2003) Extending the Upper Temperature Limit for Life. *Science*, 301, 934–934
- Kasting, J.F. y Catling, D. (2003) Evolution of a habitable planet. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41, 429–463.
- Klein, H.P. (1999). Did Viking Discover Life on Mars? *Origins of Life and Evolution of Biospheres*, 29, 625–631.
- Klein, H.P., Lederberg, J. y Rich, A. (1972). Biological experiments: The Viking Mars lander. *Icarus*, 16, 139–146.
- Martínez-Frías, J., Lázaro, E. y Esteve-Núñez, A. (2007). Geomarkers versus biomarkers: paleoenvironmental and astrobiological significance. *Ambio*, 36, 425–6.
- McEwen, A.S., Ojha, L., Dundas, C.M., Mattson, S.S., Byrne, S., Wray, J.J., Cull, S.C., Murchie, S.L., Thomas, N. y Gulick, V.C. (2011). Seasonal flows on warm Martian slopes. *Science*, 333, 740–743.
- McKay, C. P. (2014). Requirements and limits for life in the context of exoplanets. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 111, 12628–33.
- McKay, C.P. y Davis, W.L. (1991). Duration of liquid water habitats on early Mars. *Icarus*, 90, 214–221.
- McKay, C.P., Imre Friedman, E., Wharton, R.A. y Davies, W.L. (1992). History of water on Mars: A biological perspective. *Advances in Space Research*, 12, 231–238.
- McKay, C.P., Stoker, C.R., Glass, B.J., Dave, A.I., Davila, A.F., Heldmann, J.L., Marinova, M.M., Fairen, A.G., Quinn, R.C., Zacny, K.A., Paulsen, G., Smith, P.H., Parro, V., Andersen, D.T., Hecht, M.H., Lacelle, D., Pollard, W.H. y Davé, A.I. (2013) The Icebreaker Life Mission to Mars: A Search for Biomolecular Evidence for Life. *Astrobiology*, 13, 334–354.
- Mojzsis, S.J., Arrhenius, G., McKeegan, K.D., Harrison, T.M., Nutman, A.P. y Friend, C.R. (2014). Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. *Nature*, 384, 55–9.
- Mustard, J.F., Adler, M., Allwood, A., Bass, D.S., Beaty, D.W. III, J.F.B., Brinckerhoff, W.B., Carr, M., Marais, D.J. Des, Drake, B., Edgett, K.S., Eigenbrode, J., Elkins-Tanton, L.T., Grant, J.A., Milkovich, S.M., Ming, D., Moore, C., Murchie, S., Onstott, T.C., Ruff, S.W., Sephton, M.A., Steele, A. y Treiman, A. (2013). *Report of the Mars 2020 Science Definition Team*.
- Mustard, J.F., Murchie, S.L., Pelkey, S.M., Ehlmann, B.L., Milliken, R.E., Grant, J.A., Bibring, J.-P., Poulet, F., Bishop, J., Dobrea, E.N., Roach, L., Seelos, F., Arvidson, R. E., Wiseman, S., Green, R., Hash, C., Humm, D., Malaret, E., McGovern, J.A., Seelos, K., Clancy, T., Clark, R., Marais, D.D., Izenberg, N., Knudson, A., Langevin, Y., Martin, T., McGuire, P., Morris, R., Robinson, M., Roush, T., Smith, M., Swayze, G., Taylor, H., Titus, T. y Wolff, M. (2008). Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars Reconnaissance Orbiter CRISM instrument. *Nature*, 454, 305–9
- Nienow, J. A. (2009). *Encyclopedia of Microbiology*, Elsevier.
- Nutman, A.P., Bennett, V.C., Friend, C.R.L., Van Kranendonk, M.J. y Chivas, A.R. (2016). Rapid emergence of life shown by discovery of 3,700-million-year-old microbial structures. *Nature*, 537, 535–538.
- Odum, E. (1971). *Fundamentals of Ecology*, Saunders, Philadelphia, PA.
- Ojha, L., Wilhelm, M.B., Murchie, S.L., McEwen, A.S., Wray, J.J., Hanley, J., Massé, M. y Chojnacki, M. (2015). Spectral evidence for hydrated salts in recurring slope lineae on Mars. *Nature Geoscience*, 8, 829–832.
- Pointing, S.B. y Belpap, J. (2012) Microbial colonization and controls in dryland systems. *Nature Reviews Microbiology*, 10, 654.
- Schulze-Makuch, D. y Irwin, L.N. (2006). The prospect of alien life in exotic forms on other worlds. *Naturwissenschaften*, 93, 155–172.
- Schulze-Makuch, D., Méndez, A., Fairén, A.G., von Paris, P., Turse, C., Boyer, G., Davila, A.F., António, M.R. de S., Catling y D., Irwin, L.N. (2011). A two-tiered approach to assessing the habitability of exoplanets. *Astrobiology*, 11, 1041–52.
- Shock, E.L. y Holland, M.E. (2007). Quantitative Habitability. *Astrobiology*, 7, 839–851.
- Squyres, S.W., Grotzinger, J.P., Arvidson, R.E., Bell, J.F., Calvin, W., Christensen, P.R., Clark, B.C., Crisp, J.A., Farrand, W.H., Herkenhoff, K.E., Johnson, J.R., Klingelhöfer, G., Knoll, A.H., McLennan, S.M., McSween, H.Y., Morris, R.V., Rice, J. W., Rieder, R. y Soderblom, L.A. (2004). In situ

evidence for an ancient aqueous environment at Meridiani Planum, *Mars Science*, 306, 1709–1714.

Summons, R.E., Albrecht, P., McDonald, G. y Moldowan, J.M. (2007). Molecular Biosignatures. *Space Science Reviews*, 135, 133–159.

Wierzchos, J., Ascaso, C., y McKay, C. P. (2006) Endolithic cyanobacteria in halite rocks from the hyperarid core of the Atacama Desert. *Astrobiology*, 6, 415–422.

Wierzchos, J., Davila, A., Sánchez-Almazo, I.M., Hajnos, M., Swieboda, R., y Ascaso, C. (2012a) Novel water source

for endolithic life in the hyperarid core of the Atacama Desert. *Biogeosciences*, 9, 3071–3098.

Wierzchos, J., de los Ríos, A. y Ascaso, C. (2012b). Microorganisms in desert rocks, the edge of life on Earth. *Int. Microbiology*, 15, 173–83. ■

Este artículo fue recibido el día 25 de enero de 2017 y aceptado definitivamente para su publicación el 20 de febrero de 2017.