Revista de Astrobiología. **N.4 - 2017**

Zoé

Ζωή

La aventura de la vida

Marte: objetivo astrobiológico

Meteorología marciana. Estaciones meteorológicas españolas en Marte
Siguiendo las huellas del metano en Marte
Buscando vida en ambientes profundos: La mina de Las Cruces
Marte en el laboratorio. Las cámaras de simulación
Plantas en Marte

Presentación

La comunidad científica y, en particular, la astrobiológica, considera el estudio de Marte como objetivo fundamental para entender el origen y evolución de la vida en el universo. Tanto Marte como la Tierra experimentaron procesos de formación similares y con edad similar. Y un factor importante, nuestro planeta vecino es accesible, podemos enviar instrumentación para su estudio con relativa facilidad, en comparación con otros planetas. Así pues, Marte es el mejor escenario para buscar respuesta a una de las grandes preguntas de la humanidad ¿Existe vida similar a la de la Tierra, aunque sea menos evolucionada, en otras partes del universo?

Tras décadas de exploración, sabemos que el Planeta Rojo tuvo abundante agua líquida en el pasado, actividad volcánica, evidencias de tsunamis en su mar primitivo provocados por impactos de meteoritos o grandes glaciares de hielo de agua. En el Marte actual existen grandes masas de agua congelada en el subsuelo (permafrost) y forman salmueras líquidas en las laderas de mayor insolación, e incluso se forman nubes de partículas de hielo. La presencia de cuevas y tubos de lava inducen a imaginar hábitats en el subsuelo que sirvan de refugio a una hipotética microbiota marciana, similar a las bacterias extremófilas que conocemos en la Tierra. Es más, no podemos excluir la posibilidad de que la Tierra fuese sembrada de la vida procedente de Marte. Las misiones de exploración actualmente en Marte y las nuevas programadas para 2018 y 2020 (Insight y Mars2020 de NASA y ExoMars 2020 de ESA) nos permitirán conocer aún mejor el planeta.

Los astrobiólogos estamos convencidos de que aún queda mucho que investigar mediante misiones de exploración robótica *in situ*. El estudio de los microorganismos extremófilos y de ambientes terrestres análogos a los que se han descubierto en Marte nos están permitiendo diseñar instrumentación y nuevos conceptos de misiones de exploración para la búsqueda de rastros de vida. Estamos viviendo momentos decisivos en la exploración planetaria y grandes y excitantes descubrimientos están por llegar. Z

Víctor Parro García

Vicedirector del Centro de Astrobiología

staff

DIRECTOR
José Miguel Mas Hesse, Jefe de la UCC-CAB.

COORDINACIÓN EDITORIAL
Paula Sánchez Narrillos y Juan Ángel Vaquerizo Gallego, UCC-CAB.

COLABORADORES
Eva Mateo Martí. Departamento de Evolución Molecular. CAB.
Olga Prieto Ballesteros. Departamento de Planetología y Habitabilidad. CAB.
Joana Neto Lima. Departamento de Planetología y Habitabilidad. CAB.
Alba San José. Departamento de Planetología y Habitabilidad. CAB.
Fernando Izquierdo. Departamento de Planetología y Habitabilidad. CAB.
Jorge Pla García. Departamento de Instrumentación Avanzada. CAB.
Fernando Tornos Arroyo. Departamento de Planetología y Habitabilidad. CAB.
José Eduardo González Pastor. Departamento de Evolución Molecular. CAB.

CONSEJO EDITORIAL
José Miguel Mas Hesse, Director del CAB.
Víctor Parro García, Vicedirector del CAB.
Francisco Najarro de la Parra, Jefe del Departamento de Astrofísica.
José Eduardo González Pastor, Jefe del Departamento de Evolución Molecular.
Olga Prieto Ballesteros, Jefe del Departamento de Planetología y Habitabilidad.
Eduardo Sebastián Martínez, Jefe del Departamento de Instrumentación Avanzada.

DISEÑO
Vicente Aparisi, Proyecto Gráfico y Dirección de Arte.

CATÁLOGO GENERAL DE PUBLICACIONES OFICIALES
http//publicacionesoficiales.boe.es

IMPRESIÓN
EDYCOM / Din Impresores

MIXTO
Papel procedente de fuentes responsables
FSC® C126208
www.fsc.org

Depósito legal: M-43644-2011
ISSN
2254-1691 (edición papel)
2254-190X (edición en línea)
NIPO
078-15-005-5 (edición papel)
078-15-006-0 (edición en línea)

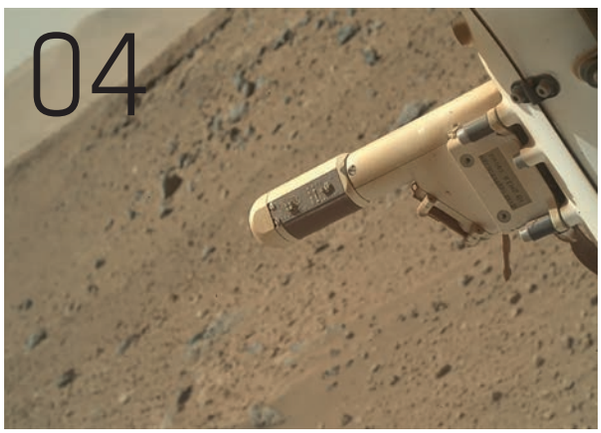
Centro de Astrobiología (INTA-CSIC)
Carretera de Ajalvir, km 4 - 28850 Torrejón de Ardoz (Madrid)
http://cab.inta-csic.es
E-mail: divulgacion@cab.inta-csic.es

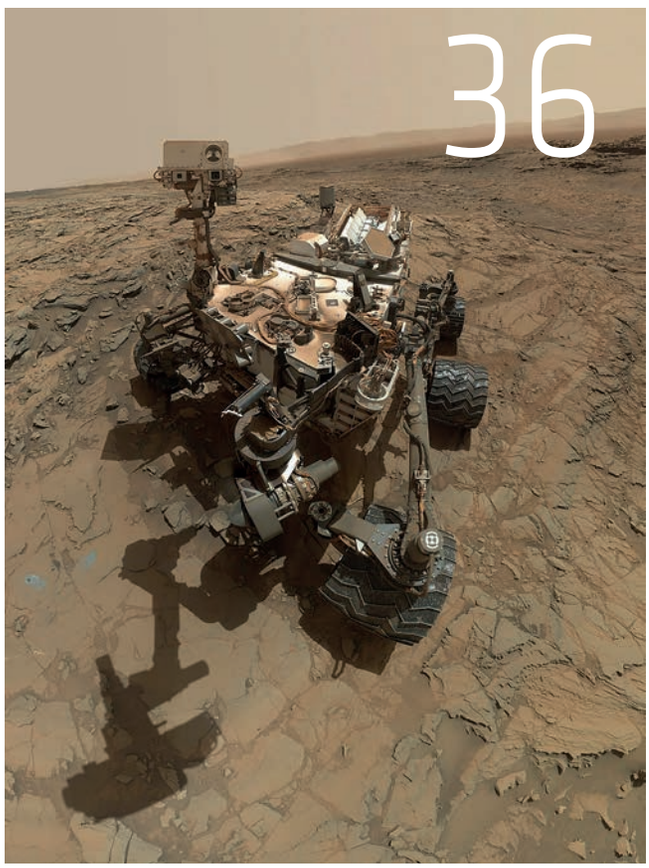
Zoé – Revista de Astrobiología es una publicación trimestral del Centro de Astrobiología (INTA-CSIC).
Zoé – Revista de Astrobiología no se hace responsable de las opiniones de los autores de los artículos.
Se autoriza la difusión de los contenidos de esta publicación previo permiso.

El crédito de portada es NASA/JPL

Contenidos

Marte: objetivo astrobiológico





4 • Meteorología marciana. Estaciones meteorológicas españolas en Marte

12 • Siguiendo las huellas del metano en Marte

20 • Buscando vida en ambientes profundos: La mina de Las Cruces

28 • Marte en el laboratorio. Las cámaras de simulación

32 • Plantas en Marte

36 • Marte: objetivo astrobiológico

02 • Editorial / Staff

Meteorología marciana. Estaciones meteorológicas españolas en Marte

Jorge Pla García. Departamento de Instrumentación Avanzada

España es una potencia mundial en meteorología marciana. Cuando el *rover Curiosity* de la NASA aterrizó en el cráter Gale de Marte en agosto de 2012 con la estación meteorológica española REMS (*Rover Environmental Monitoring Station*) a bordo (Figura 1), España entró a formar parte del exclusivo grupo de cinco instrumentos meteorológicos que alguna vez en la historia habían medido las condiciones meteorológicas desde la superficie del planeta rojo, siendo la primera no norteamericana en conseguirlo.

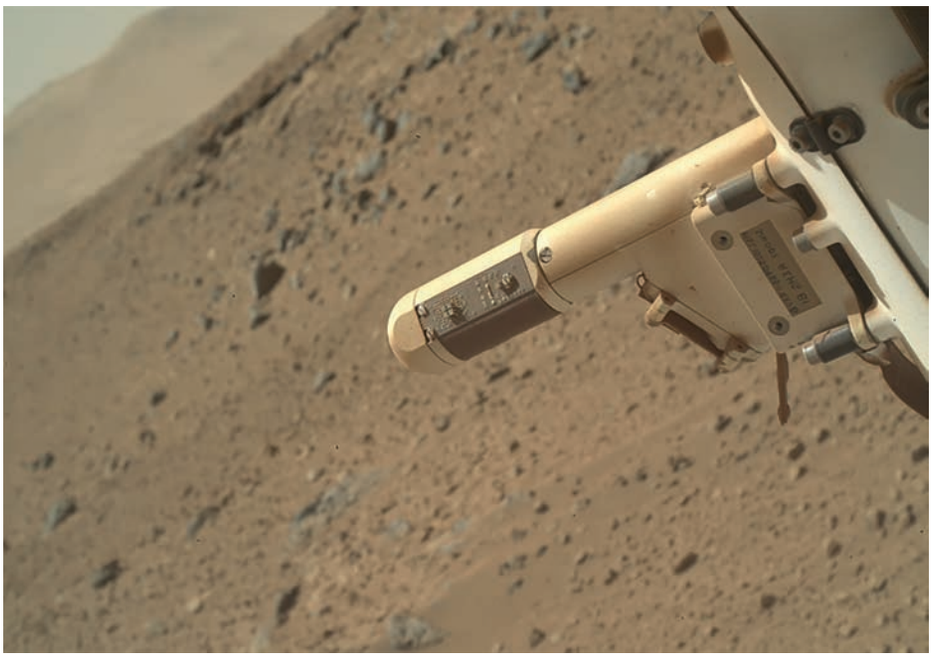


Figura 1. Detalle de los sensores de viento y temperatura de REMS en Marte NASA/JPL-CALTECH/CAB.

En el equipo REMS trabajamos realizando interpretaciones meteorológicas del cráter Gale. Para ello utilizamos los datos medidos in situ en Marte combinados con los resultados de sofisticados modelos meteorológicos marcianos, como se puede apreciar en la Figura 2, en la que los datos de presión de REMS se representan por las líneas discontinuas de colores (cada color representa uno de los cinco soles seleccionados) y los datos del modelo meteorológico MRAMS (*Mars Regional Atmospheric Modeling System*) se representan por la línea azul continua (adaptado de Pla-Garcia et al. 2016). Estos modelos surgieron a partir del auge de la exploración marciana en la década de los noventa junto con la optimización de los modelos meteorológicos terrestres, propiciando el escenario ideal para la adaptación de este tipo de modelos a la atmósfera de Marte. Su uso se ha convertido en una parte fundamental para la interpretación de los datos generados por las misiones espaciales

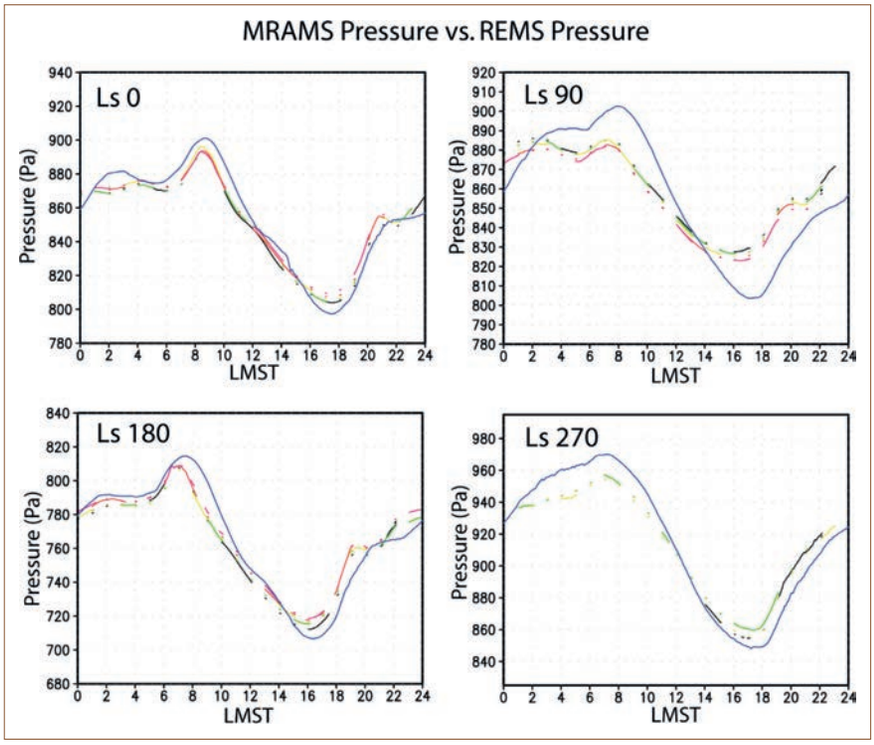


Figura 2. Señal de la presión diaria observada y modelada.

REMS realiza interpretaciones meteorológicas del cráter Gale de Marte. Para ello se utilizan los datos medidos *in situ* en el planeta rojo combinados con los resultados de sofisticados modelos meteorológicos marcianos.

al planeta rojo y para proporcionar las restricciones de sus condiciones ambientales. Además, se han convertido en una herramienta fundamental para la evaluación y mitigación de riesgos en la etapa de entrada, descenso y aterrizaje de las misiones al planeta rojo, y buena prueba de ello son las predicciones meteorológicas que estamos elaborando para el día del aterrizaje de la misión de NASA Mars2020.

El cráter Gale donde se encuentra REMS se sitúa cerca del ecuador de Marte, entre las tierras elevadas del hemisferio sur y las bajas del hemisferio norte, división denominada dicotomía marciana. Al estar cerca del ecuador, se dan las condiciones de estabilidad atmosférica y una gran repetitividad en las condiciones meteorológicas entre soles consecutivos (tal y como ha evidenciado REMS) debido a la ausencia de frentes, al igual que sucede en las regiones ecuatoriales aquí en la Tierra.

Nuestra idea, además de estudiar al detalle el clima de Marte, es la de elaborar cada mes marciano (dos meses terrestres) un detallado parte meteorológico del planeta rojo con un carácter claramente divulgativo. Se trata del primer parte meteorológico del cráter Gale dirigido al público general y está basado en los datos que recoge REMS y las simulaciones llevadas a cabo con los mencionados modelos numéricos de predicción meteorológica adaptados a Marte. Aunque previamente se publicaban los datos numéricos de los diferentes sensores de REMS con una pequeña descripción de lo que medía cada sensor, ahora estamos publicando informes meteorológicos mucho más exhaustivos dirigidos al público general detallando cómo se produce cada fenómeno atmosférico en Marte. Para que los informes puedan ser entendidos más fácilmente estamos incluyendo ejemplos de estos mismo fenómenos en la Tierra.

¿Qué hemos descubierto?

¡Marte es muy frío!

Ya sabíamos que las temperaturas en Marte eran muy bajas porque, además de estar situado a una distancia del Sol 1,52 veces más lejana que la Tierra y, por tanto, recibir solo un 43% de la luz solar que recibe nuestro planeta, su tenue atmósfera (unas 100 veces más liviana que la nuestra) es incapaz de retener el calor entrante. Ésta, junto con la ausencia de masas oceánicas y la baja inercia térmica del suelo marciano, producen una gran amplitud térmica diaria, ¡que puede llegar a una diferencia de temperatura entre el día y la noche de 80°C! Por su parte, la diferencia de temperatura entre el suelo y la capa atmosférica superficial dependerá de la cantidad

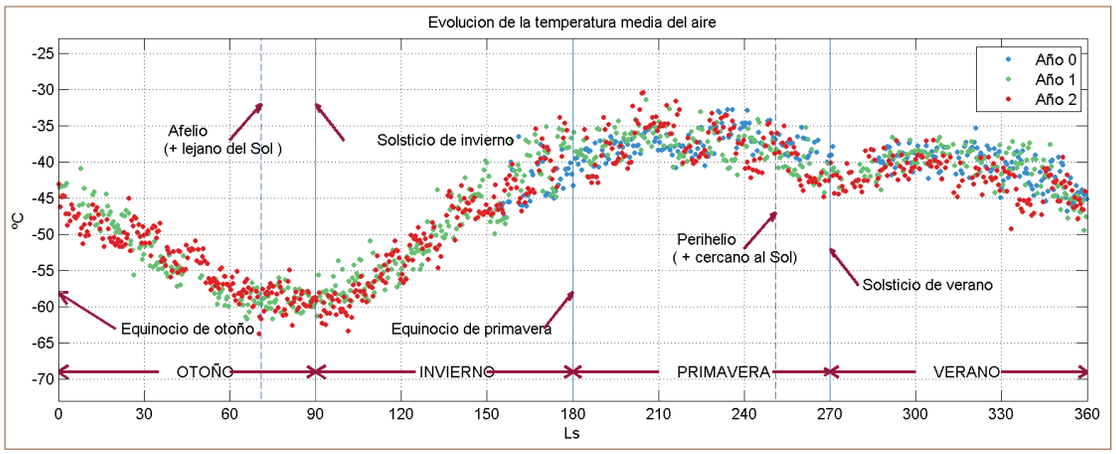


Figura 3. Evolución de la temperatura del aire media medida por el instrumento REMS dentro del cráter Gale. Los años hacen referencia al tiempo transcurrido desde el aterrizaje, donde el año 0 es el año marciano 33 (Fuente: CAB).

de radiación solar recibida, pudiendo llegar a tener 30°C de diferencia. El eje de rotación de Marte es además muy parecido al de la Tierra, con una inclinación de 25° (el de la Tierra es de 23,5°), pero con una excentricidad de su órbita alrededor del Sol mucho más grande (0,093, mientras que en la Tierra es de 0,017) lo cual produce una gran diferencia en la irradiación solar máxima recibida en el hemisferio norte comparada con el sur. Como consecuencia de este diferente aporte energético, las estaciones resultan más extremas en el hemisferio sur. Una muestra de ello es que las temperaturas veraniegas en este hemisferio pueden ser hasta 30°C más calientes que las del verano del hemisferio norte. La temperatura media del aire en Marte cerca de la superficie es alrededor de -55°C, la cual varía desde los +3,15°C de máxima en regiones cercanas al ecuador, hasta los -100°C de mínima en los casquetes polares. En la Figura 3 se puede apreciar la evolución de la temperatura media anual del aire registrada por REMS, la cual oscila entre -65°C y -30°C. La temperatura del aire más alta registrada en Marte (+3,15°C) fue medida precisamente en el cráter Gale por el instrumento REMS, justo después del mediodía del sol 754, momento en el que el cráter recibe mayor irradiación solar. Otras temperaturas máximas del aire cerca del ecuador marciano medidas a la misma altura sobre el suelo son las del aterrizador *Viking 1*, con -17,4°C y el *Pathfinder* con -11,6°C. Por lo tanto, aunque la escasez de medidas meteorológicas en Marte hace que estas no sean globalmente representativas, se podría concluir que registrar temperaturas del aire en Marte positivas es algo excepcional.

La atmósfera engorda con la descongelación de los casquetes

Aunque la atmósfera está compuesta casi en su totalidad de CO_2, la presión media global en superficie es de tan solo ~6mb (apenas un 1% de la presión terrestre). Tener 100 veces menos atmósfera hace que los fenómenos sean 100 veces menos potentes. La presión atmosférica media en Gale es alrededor de ~8mb (estamos en el fondo de un cráter de 4,5km de profundidad). La presión media nos informa de los cambios estacionales y, aunque parezca sorprendente, los casquetes polares marcianos tienen una gran influencia en la presión atmosférica global de Marte. Éstos están compuestos mayoritariamente por una capa permanente de hielo de agua de unos 2 km de profundidad en el casquete norte y de algo más de 3 km en el sur. El diámetro del casquete polar norte es de 1.000 km y el del sur de unos 350 km. Cada casquete contiene aproximadamente 1,6 millones de kilómetros cúbicos hielo de agua, es decir una cantidad de agua suficiente como para formar un océano global de 35 metros de profundidad. En cada casquete polar existe por encima de la capa de hielo de agua una capa superficial de hielo de CO_2. Una de las diferencias principales entre casquetes, además de su tamaño, es la profundidad de las capas superficiales de hielo de CO_2, siendo la del casquete polar norte de un metro de profundidad, sublimándose por completo en verano y congelándose en invierno; mientras que la del sur, de unos 8 metros de profundidad, aunque disminuye su grosor, permanece durante todo el año marciano por encima de la capa de hielo de agua subyacente, la cual no queda expuesta en ningún momento del año marciano. El ciclo de insolación solar da lugar a un intercambio de CO_2 entre casquetes. En el invierno del hemisferio norte (verano del hemisferio sur) el CO_2 de la atmósfera se congela sobre el casquete polar norte, y se sublima (pasa de fase hielo a gas) del casquete del polo sur. En invierno del hemisferio sur (verano del hemisferio norte) el proceso se invierte, lo que significa que cada año alrededor de un tercio de la atmósfera se intercambia entre los casquetes. Este ciclo controla por tanto el contenido global atmosférico de CO_2 y determina la presión media diaria en una determinada estación. La existencia de dos mínimos y dos máximos, unos relativos y otros absolutos, en la presión anual medida por REMS (Figura 4), corresponden a la alta excentricidad de la órbita de Marte y a una distribución

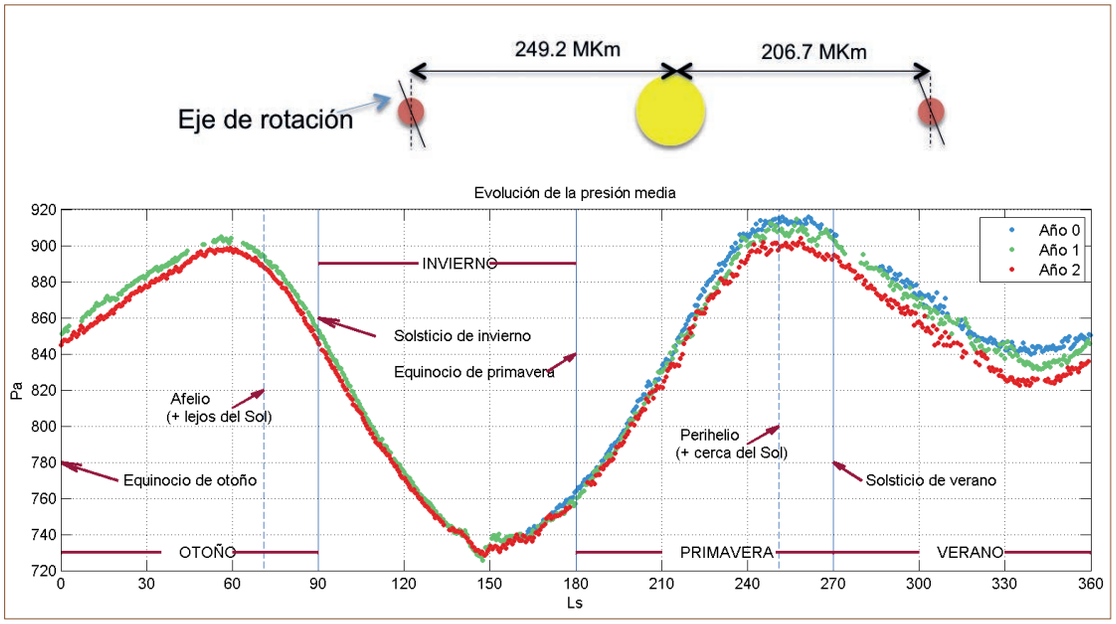


Figura 4. Evolución de la presión media medida por REMS dentro del cráter Gale. En la imagen superior se muestra la distancia Marte-Sol en sus posiciones más extremas. El eje de rotación de Marte es de 24,9°. (Fuente: CAB).

Las temperaturas en Marte son muy bajas, debido en parte a que su tenue atmósfera es incapaz de retener el calor entrante procedente del sol, del que está 1,52 veces más lejano que la Tierra. Así, la diferencia de temperatura entre el día y la noche puede ser de hasta 80°C.

asimétrica en la cantidad de hielo de CO_2 entre los casquetes polares.

Entorno meteorológico complejo: contexto multiescalar

Las interpretaciones meteorológicas extraídas de las observaciones realizadas con el instrumento REMS y las simulaciones realizadas con nuestro modelo atmosférico revelan el entorno meteorológico más complejo medido jamás en Marte[1]. Este puede ser considerado como la suma de los efectos derivados de las circulaciones atmosféricas de las diferentes escalas (Figura 5): planetaria (a nivel global), regional (entre las tierras altas del hemisferio sur y las bajas del hemisferio norte) y local (constreñida al cráter Gale).

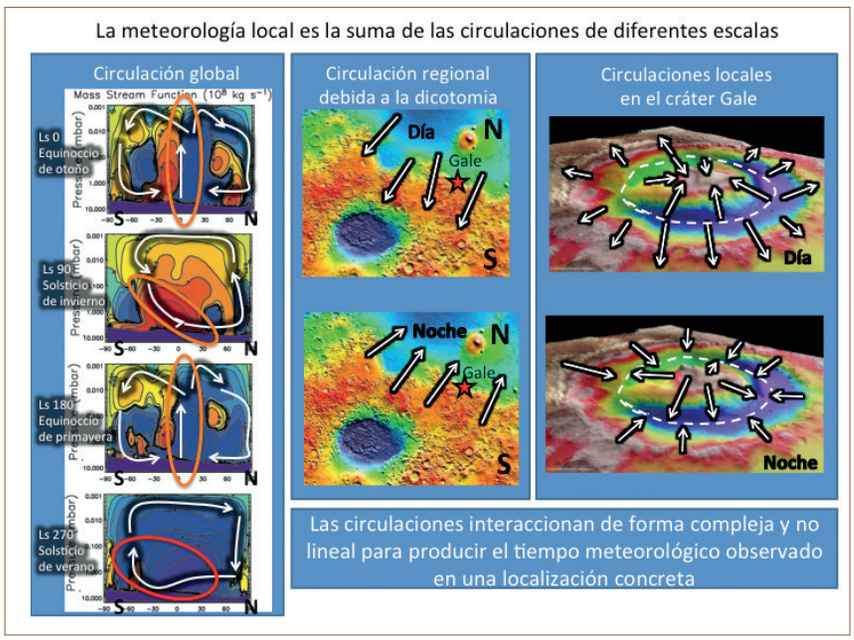


Figura 5. Escenario multiescalar. El cráter Gale se encuentra cerca del ecuador marciano.

Generación de ondas de gravedad

Otra novedad de este estudio es que desde la mitad de la primavera hasta la mitad del verano, los vientos (que son de componente norte) son de los más fuertes del año, especialmente por la noche. Estos vientos junto con el desarrollo después del atardecer de una capa de inversión térmica (masas de aire cercanas al suelo más frías que en altura) en los niveles más bajos del cráter Gale

1. Pla-García et al. (2016), The meteorology of Gale Crater as determined from Rover Environmental Monitoring Station observations and numerical modeling. Part I: Interpretation. Icarus, 280, 103-113

Figura 6. Nubes moldeadas por ondas de gravedad capturadas por la cámara Navcam de MSL utilizando un apuntamiento con un ángulo de baja elevación. Crédito: NASA/JPL-Caltech.

proporcionan las condiciones ideales para la generación de ondas de gravedad[2]. La sorpresa fue mayúscula para el equipo REMS cuando, solo una semana después de publicar el primer informe meteorológico reportando este fenómeno, se publicaron las primeras imágenes desde la superficie marciana de nubes marcianas moldeadas por estas ondas de montaña, las cuales se propagan desde el suelo hasta las capas altas donde esculpen las nubes, como puede apreciarse en la Figura 6.

Los vientos de ladera descendentes son también dinámicos

Los vientos descendentes anteriormente mencionados tienen tanta fuerza que son capaces de hundir hacía su interior masas de aire que son más calientes que las del cráter. Estas masas deberían ascender en lugar de descender, pero estos vientos lo que hacen es hundirlas hacia el interior del cráter, produciéndose una batalla de temperaturas en el suelo del mismo, con grandes oscilaciones en muy poco tiempo. Este fenómeno meteorológico (Figura 7), observado también en los Alpes (vientos Foehn) y en las Montañas Rocosas (vientos Chinook), registrado en el mes 10 del año marciano 33 y reportado en su correspondiente informe, produce además una ventilación completa del cráter muy rápidamente, algo único en el año marciano. Este periodo de ventilación tiene un fuerte impacto en los ciclos de agua, metano y polvo en Gale.

La importancia del polvo atmosférico

El polvo es uno de los actores principales de la atmósfera de Marte influyendo notablemente en la variabilidad atmosférica. El polvo en suspensión es tan fino que casi podríamos hablar de "humo" de polvo. Este polvo tiene un importante impacto radiativo: tanto la insolación como el flujo descendente infrarrojo se ven afectados por el contenido de polvo atmosférico. Generalmente, el polvo tiene un efecto anti-invernadero en las longitudes de onda solares, pero actúa con un efecto contrario en el infrarrojo. Por lo tanto,

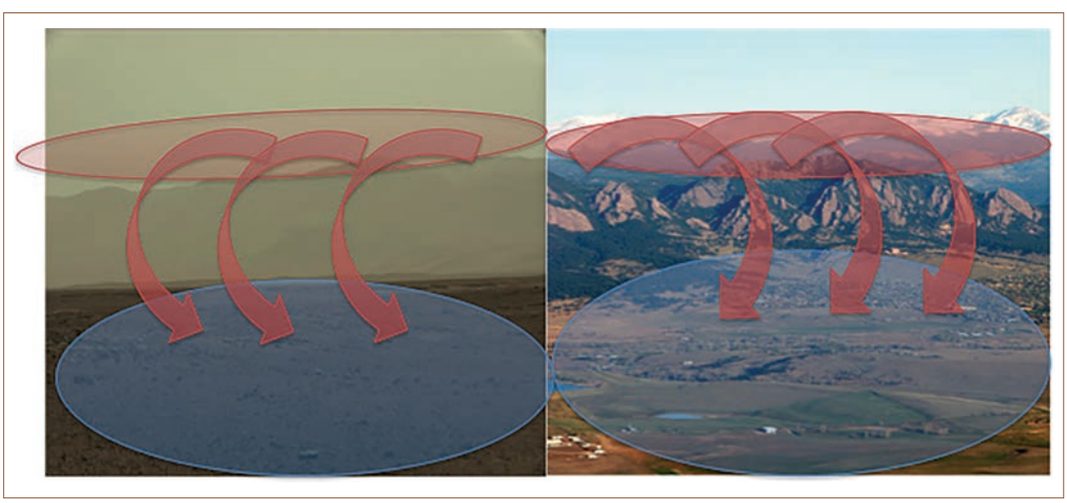


Figura 7. Fuertes vientos generan ondas de montaña que hunden las masas de aire calientes de zonas altas hacia las frías planicies de su base desencadenando una "batalla" de temperaturas tanto en Boulder, Colorado (derecha, fuente NCAR editada) como en el cráter Gale (izquierda, fuente NASA editada).

2. Una onda de gravedad es un fenómeno atmosférico en el que, como consecuencia de la incidencia de un flujo de aire sobre un accidente geográfico acentuado (montaña, cráter, etc..), dicha corriente adopta un comportamiento ondulatorio a sotavento del obstáculo, forzándose ascensos y descensos dinámicos del aire. Son cuatro las condiciones que deben de cumplirse para que se forme la onda: 1) la dirección del viento ha de ser perpendicular al accidente geográfico, 2) la intensidad del viento debe ser fuerte y 3) y aumentar con la altura, y además 4) debe estar presente una inversión térmica, de manera que la estabilidad atmosférica reinante garantice el confinamiento de la onda en los niveles inferiores.

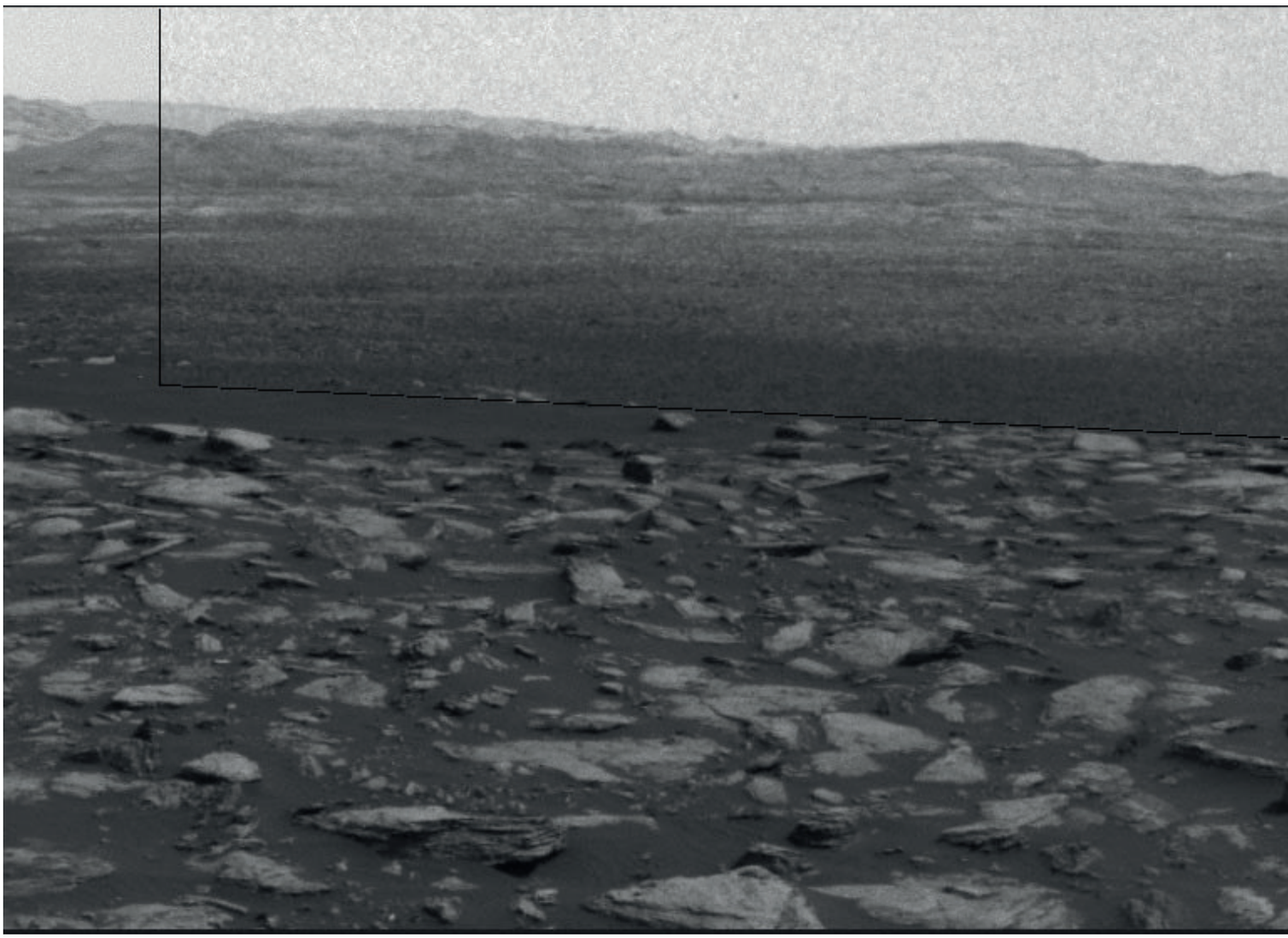
El polvo de la atmósfera de Marte influye notablemente en la variabilidad de ésta. Es tan fino que casi se podría hablar de "humo" de polvo. La temporada de polvo comienza cuando la radiación solar incidente en el hemisferio sur alcanza niveles importantes en el equinoccio de primavera y termina cuando ésta desciende en el de otoño.

un aumento de la cantidad de polvo atmosférico reduce en superficie el flujo entrante solar pero aumenta el flujo descendente infrarrojo. El resultado neto es una disminución en la amplitud de la señal diurna de la temperatura tanto del aire como del suelo, aumentando las temperaturas nocturnas y disminuyendo las diurnas hasta en 20°C. Esta alteración de las temperaturas tiene también un efecto en la presión y los vientos, los cuales modifican tanto el transporte de polvo en la atmósfera como la inyección de polvo a ésta desde la superficie, retroalimentando por tanto el proceso. El polvo atmosférico tiene un fuerte impacto en el clima y la circulación general de la atmósfera marciana y, por ende, en las operaciones de las misiones de exploración. La temporada de polvo comienza cuando la radiación solar incidente en el hemisferio sur alcanza niveles importantes en el equinoccio de primavera (Ls 180) y termina cuando esta desciende en el equinoccio de otoño (Ls 0). En la figura 8 puede apreciarse un sol representativo de la temporada alta de polvo.

Figura 8. Imagen tomada hacia los bordes del cráter por la cámara Mastcam en el Sol 1670, donde se aprecia la alta opacidad atmosférica debida al polvo en suspensión. Fuente: NASA/JPL-Caltech/MSSS. ■

Generación de remolinos de polvo o *dust devils*

Los remolinos de polvo, más conocidos como *dust devils*, se producen tanto en la Tierra como en Marte, por procesos turbulentos convectivos cuando una fuerte irradiación solar calienta una zona del suelo más que las de su alrededor haciendo que la masa de aire de esa zona del suelo más caliente ascienda por flotabilidad creando una baja presión por debajo de ella. Recordemos que la superficie de Marte tiene una composición irregular y hay zonas que se calientan más que otras. Esta zona de baja presión atrae a las masas de aire colindantes acelerando el viento en superficie y haciendo que la bolsa de aire comience a rotar arrastrando el polvo en



superficie e incorporándolo al remolino como sucedió durante el mes 11 del año marciano 33 (Figura 9). Los *dust devils* juegan un papel fundamental en el mantenimiento de la cantidad de polvo atmosférico ya que son los principales inyectores de polvo en la atmósfera.

En su recorrido ascendente hacia el monte central (Aeolis Mons) del cráter Gale, el *rover Curiosity* ha ido alejándose de la zona de subsidencia, donde las masas de aire convergen en altura y descienden aplastándose en el suelo (Figura 10), encontrándose cada vez con una capa limite planetaria más profunda, lo suficiente como para incrementar la turbulencia y permitir la formación de remolinos de polvo, los cuales, a diferencia de años anteriores (el *rover* se encontraba en las planicies centrales del cráter en la zona de mayor subsidencia), empiezan a verse con muchísima frecuencia a partir del tercer año de la misión en Marte. La estación meteorológica REMS (intentando detectar caídas rápidas de presión típicas de estos remolinos) y la cámara de navegación del *rover Navcam* trabajan conjuntamente para intentar detectarlos. Z

REMS sigue funcionando desde poco después del aterrizaje hasta el día de hoy, y sus excepcionales resultados han hecho que las dos futuras misiones de NASA a Marte incorporen respectivamente las estaciones meteorológicas españolas TWINS (*Temperature and Wind sensors for InSight mission*, sensores de temperatura y viento para la misión *InSight*) en el aterrizador *InSight*, que será lanzado la primavera de 2018 y MEDA (*Mars Environmental Dynamics Analyzer*, analizador de la dinámica ambiental de Marte) en el *rover Mars2020* que será lanzado en el 2020.

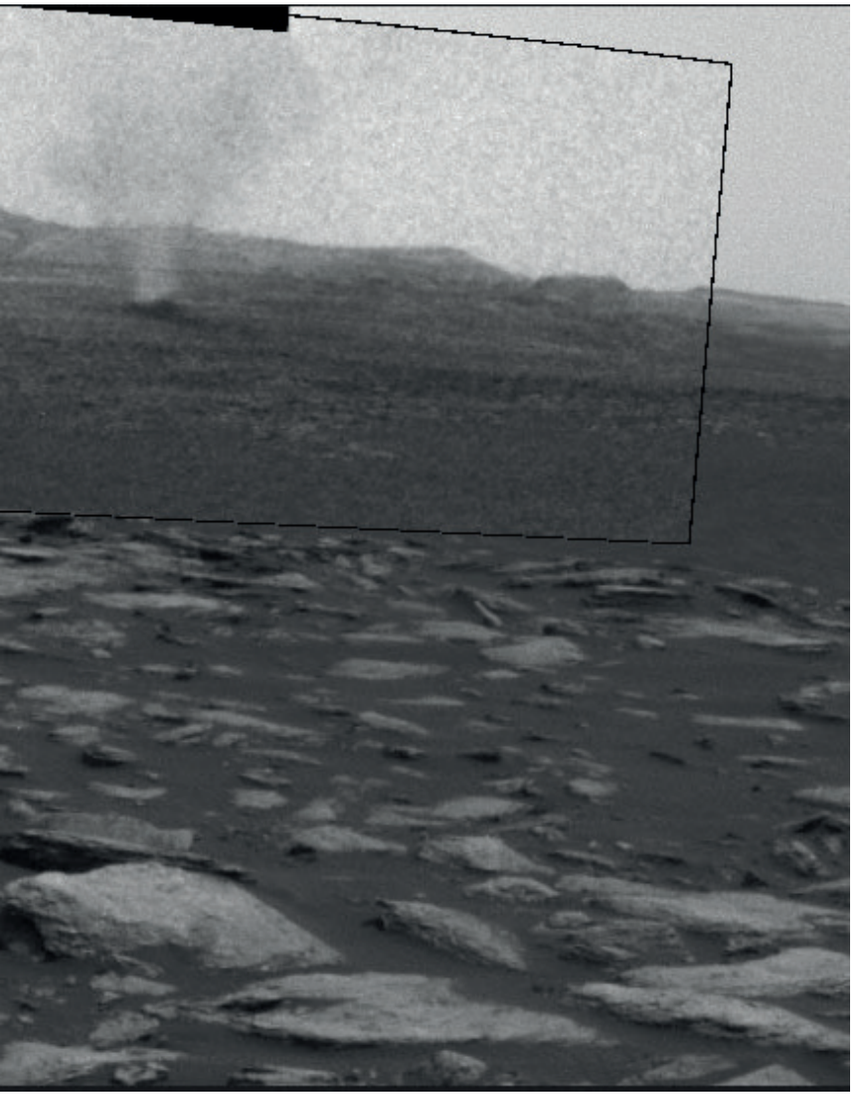


Figura 9. Esta imagen obtenida por el rover Curiosity en el mediodía del sol 1597 muestra un remolino de polvo o dust devil en acción dentro del cráter Gale (crédito imagen NASA/JPL-Caltech/TAMU).

Los remolinos de polvo o *dust devils* se producen por procesos turbulentos convectivos cuando una fuerte irradiación solar calienta una zona del suelo más que las de su alrededor, haciendo que la masa de aire de esa zona del suelo más caliente ascienda por flotabilidad creando una bajada de presión por debajo de ella.

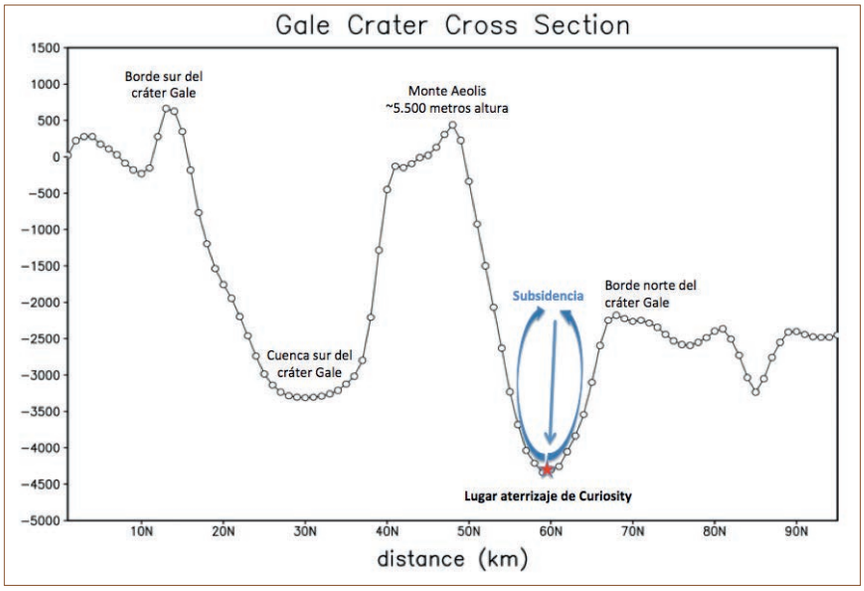


Figura 10. Fenómeno de subsidencia de masas de aire que debilitan la capa limite atmosférica.

Siguiendo las huellas del metano en Marte

Olga Prieto Ballesteros, Joana Neto-Lima, Alba San José, Fernando Izquierdo. Departamento de Planetología y Habitabilidad

La "fiebre del metano" vuelve a tomar fuerza en la exploración de Marte, esta vez aprovechando la llegada al planeta en octubre del 2016 de la sonda espacial *Exomars Trace Gas Orbiter* (TGO). Uno de los objetivos principales de la misión es precisamente caracterizar los gases atmosféricos que están presentes en concentraciones marginales, localizar sus fuentes, y determinar su evolución. La tenue atmósfera marciana, de apenas 3-10 milibares (una presión 100 veces menor que la terrestre), está dominada por CO_2 (96%), N_2 (2%) y Ar (1%). ¿Por qué es tan importante el 1% restante como para mandar una misión espacial? La respuesta se encuentra en la naturaleza de esas trazas, que incluyen O_2, CO, H_2O, H_2, O_3, CH_4 y otros hidrocarburos, es decir, volátiles que pueden jugar un papel esencial en la potencial biología y geología del planeta.

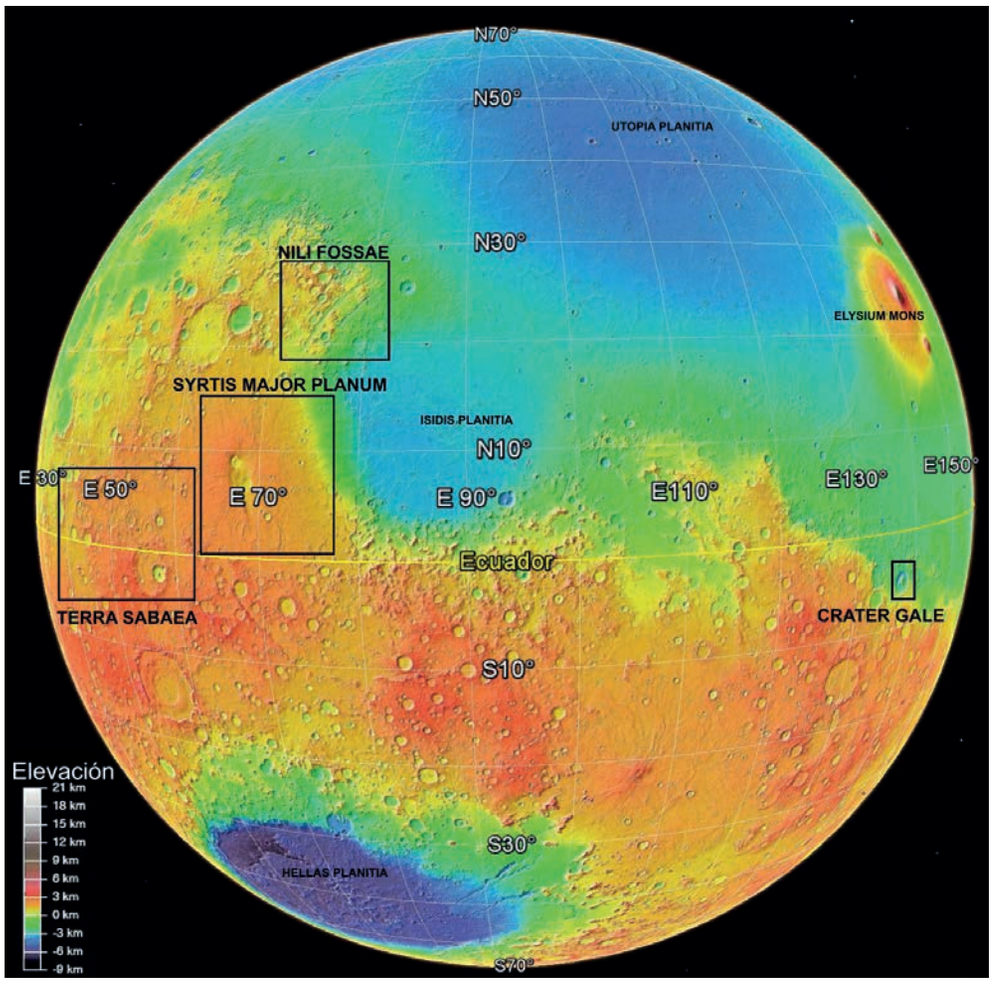
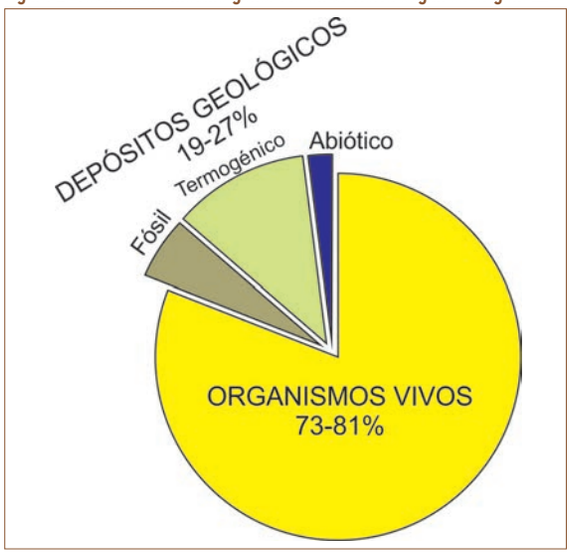


Figura 1. Imagen de altimetría de Marte donde se señalan las regiones mencionadas en el texto donde se ha detectado y medido la presencia de metano: Nili Fossae, Syrtis Major, Terra Sabae y el cráter Gale.

La presencia de metano en la actual atmósfera de Marte es algo inexplicable: si no hay una liberación constante del gas, la radiación ultravioleta degrada esta molécula rápidamente hasta eliminarla. Los modelos atmosféricos predicen que la vida del metano expira en 300-600 años terrestres, un periodo muy breve desde el punto de vista geológico. A pesar de ello, las observaciones realizadas desde la Tierra y en las últimas misiones a Marte han detectado una concentración global de 10 partes por billón (ppb) de este gas, que parece ser oscilante a nivel local y estacional. No se conoce cuál es la fuente del metano, sin embargo, cabe subrayar que la misión espacial europea Mars Express detectó señales anómalamente altas de este gas en regiones de Marte cuyas características geológicas indicaban haber tenido una historia asociada a flujos de agua, como Terra Sabae, Nili Fossae y Syrtis Major (ver figura 1). En el cráter Gale se ha medido recientemente una concentración media de 0,69+0,25 ppb y una anomalía de 7,2+2,1 ppb, que también se desvaneció con el tiempo. Probablemente hay otros factores que ayudan a la descomposición de este hidrocarburo en periodos incluso inferiores a un año terrestre. Este es otro misterio a resolver, que se añade a preguntas fundamentales como el origen del metano de Marte o la edad de la génesis. Algunas pistas para contestar estas preguntas se hallan en investigaciones planetológicas de analogías geológicas y geoquímicas de procesos que ocurren en la Tierra.

No se deben confundir los conceptos de origen y fuente del gas. El primer término se refiere a la formación del volátil, mien-

Figura 2. Volumen de metano generado en la Tierra según su origen.



La presencia de metano en la actual atmósfera de Marte es algo inexplicable: si no hay una liberación constante del gas, la radiación ultravioleta degrada esta molécula rápidamente hasta eliminarla.

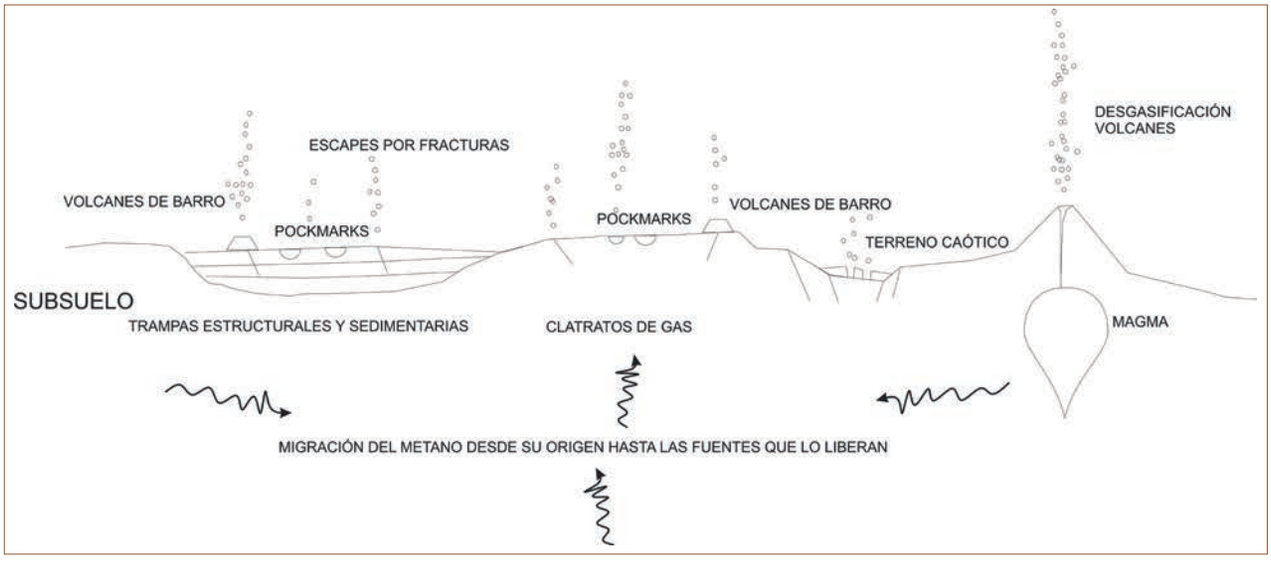


Figura 3. Esquema de las huellas geológicas que se pueden producir en Marte por la migración del metano desde depósitos sedimentarios y criogénicos de clatratos de gas.

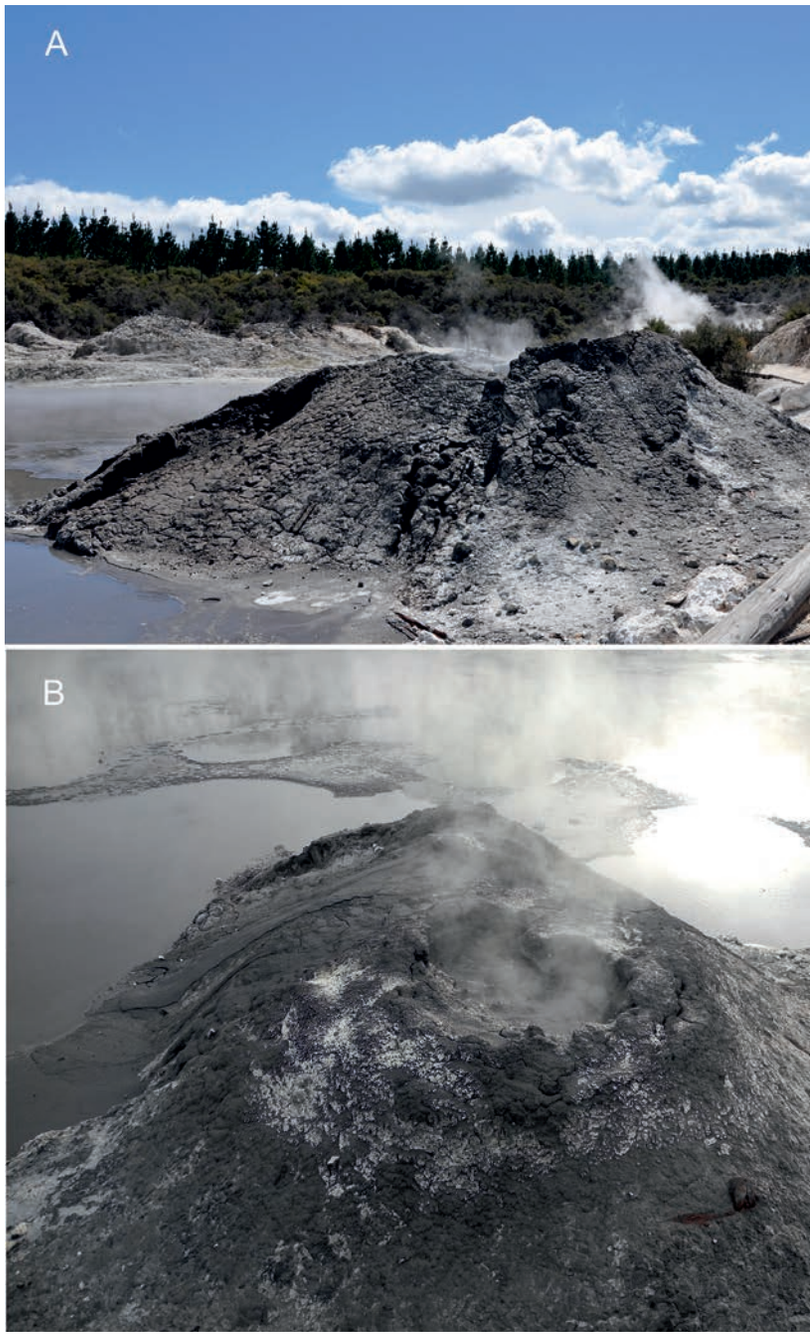
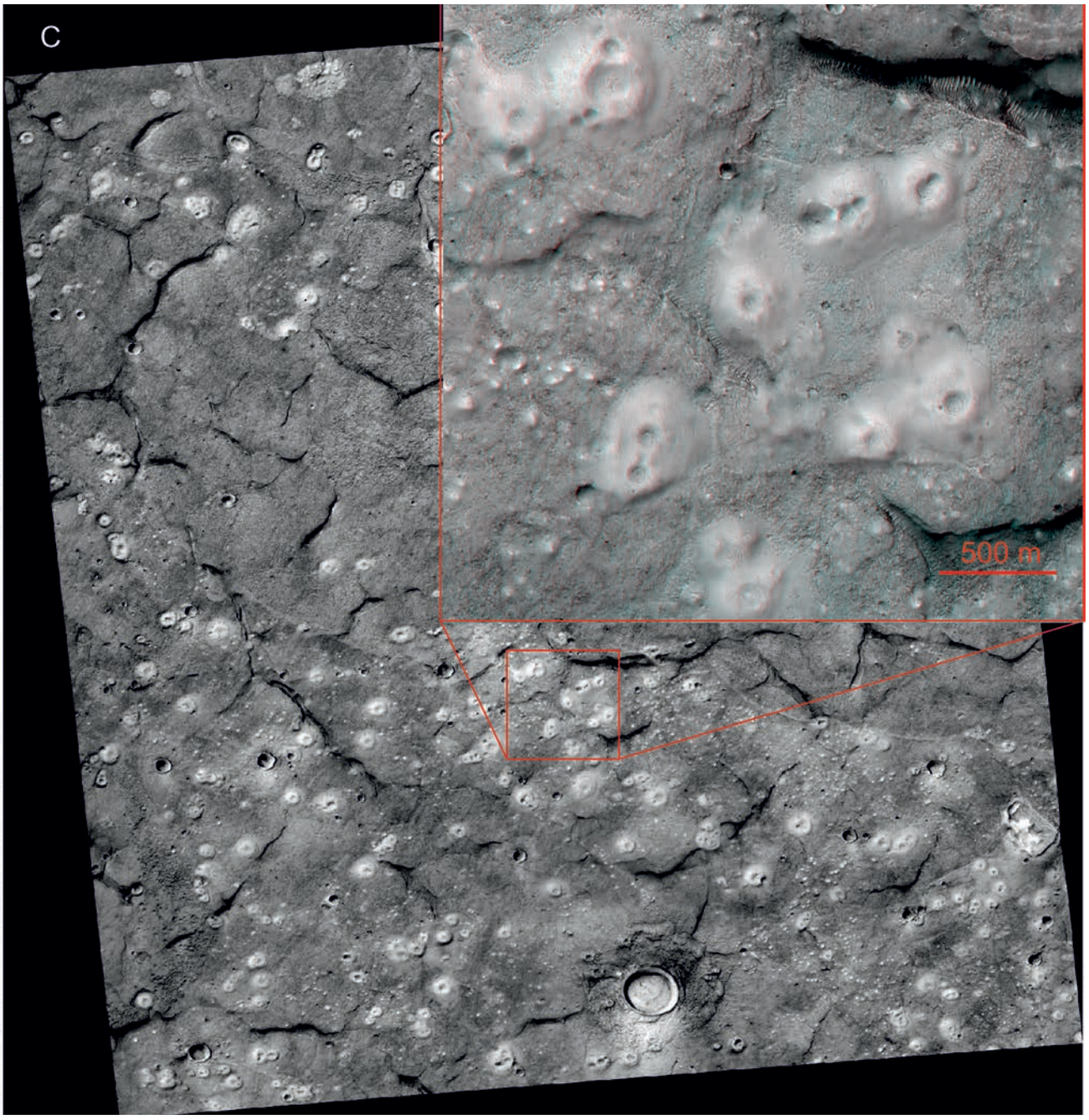


Figura 4. Los volcanes de barro son estructuras cónicas de escala métrica a kilométrica con un cráter central y laderas suaves de las que emergen flujos de lodos. Pueden ocurrir en tierra emergida o en el fondo de mares y lagos. Se forman por la migración de fluidos, mezclas de agua, gas y sedimentos finos que están sobrepresurizados. La movilización del fluido suele ocurrir por actividad sísmica. Los volcanes de barro aparecen asociados tanto a trampas sedimentarias de gas como a yacimientos de clatratos. En los volcanes de barro terrestres el gas suele ser de origen termogénico. Si se libera el metano en condiciones de fondo marino o lacustre no muy profundo, se forman carbonatos autigénicos por la oxidación del gas, normalmente mediada por microorganismos.
En Marte se han observado regiones con multitud de estructuras de volcanes de barro. Las figuras 4 A y B muestran un volcán de barro del parque Hell's Gate en Nueva Zelanda. En C se muestra un campo de volcanes de barro de Acidalia Planum, situado a 40º 04'N, 26º 45'O. La imagen general es CTX G01_018583_2203_XN_40N026W, y la aumentada es un anaglifo de las imágenes HiRise ESP_018583_2205 ESP_017950_2205. ■

SERPENTINIZACIÓN

La serpentinización es la reacción de alteración acuosa de rocas ultramáficas ricas en olivino [$(Mg, Fe)_2 SiO_4$] cuyo resultado es la formación de minerales hidratados del grupo de la serpentina. La hidrólisis del olivino rico en hierro en condiciones reductoras produce hidrógeno, y en presencia de CO_2, genera CH_4 (reacción de Fischer-Tropsch). Esta reacción exotérmica tiene gran interés astrobiológico ya que es utilizada por microorganismos autotróficos para mantener comunidades de organismos en sistemas hidrotermales de baja temperatura como los descubiertos en Lost City, en la dorsal medio Atlántica. Reacciones secundarias producen abundantes carbonatos, que forman las chimeneas y depósitos característicos de estos ambientes hidrotermales.
Las rocas ricas en olivino son abundantes en Marte. Gracias al instrumento CRISM de la misión MSL se ha detectado recientemente la presencia de serpentinita en diferentes zonas como Nili Fossae o Syrtis Major, en ocasiones asociadas a carbonatos. En el CAB se están llevando a cabo experimentos con el fin de entender este proceso en ambientes planetarios (Figura 7).

tras que el segundo determina la emisión desde el lugar donde se encuentra éste almacenado. El metano de la Tierra tiene origen biológico y abiótico. El biológico incluye dos tipos diferentes: 1) el biogénico, procedente tanto de organismos vivos como de microorganismos fosilizados, y 2) el termogénico, que deriva de la degradación de la materia orgánica, como el desprendido por el querógeno después de la diagénesis de sedimentos ricos en plancton y bentos. En la Tierra, el metano atmosférico es fundamentalmente del primer caso, producto directo del metabolismo de organismos vivos (figura 2). El metano de origen abiótico puede ser también de varios tipos, principalmente: 1) volcánico, liberado por la desgasificación planetaria; 2) hidrotermal, ocasionado por interacción entre la roca y un fluido acuoso. Este último caso incluye la metanización producida durante la serpentinización de



El metano de la Tierra tiene origen biológico y abiótico. A su vez, el biológico puede ser biogénico o termogénico, mientras que el abiótico se clasifica principalmente en volcánico o hidrotermal.

rocas ultramáficas. Aunque el impacto de la serpentinización en el volumen total de metano es despreciable en la Tierra, se ha sugerido que en Marte podría constituir el origen principal.

Independientemente de su origen, el metano formado en la sub-superficie se acumula con el tiempo en almacenes geológicos: en cuencas sedimentarias, en los poros de las rocas o entre capas impermeables, y en el interior de estructuras cristalinas de minerales como los clatratos de gas. El gas se libera a la atmósfera desde estos depósitos cuando actúan mecanismos que los perturban y forman conductos que conectan con la superficie, como actividad tectónica o ascenso de lavas (figura 3). La migración del metano en los depósitos sedimentarios ocurre por filtraciones en el substrato a diferente escala, creando estructuras particulares como volcanes de barro (figura 4) y *pockmarks* (figura 5). En depósitos ricos en

clatratos, la destrucción de estos hielos en respuesta a cambios de presión o de temperatura es siempre catastrófica, moldeando el terreno con un aspecto caótico (figura 6). Entender el clima actual de Marte y la interacción de la atmósfera con el substrato es, por lo tanto, esencial para determinar la estabilidad de los almacenes de gas del subsuelo, lo cual constituye un objetivo principal de instrumentos desarrollados en el CAB como REMS (*Rover Environmental Monitoring Station*) y MEDA (*Mars Environmentl Dynamics Analyzer*).

Localizar las estructuras características producidas por la emisión de gases permite hacer una estimación del metano acumulado en el subsuelo de Marte. Las fuentes de metano en la Tierra pro-

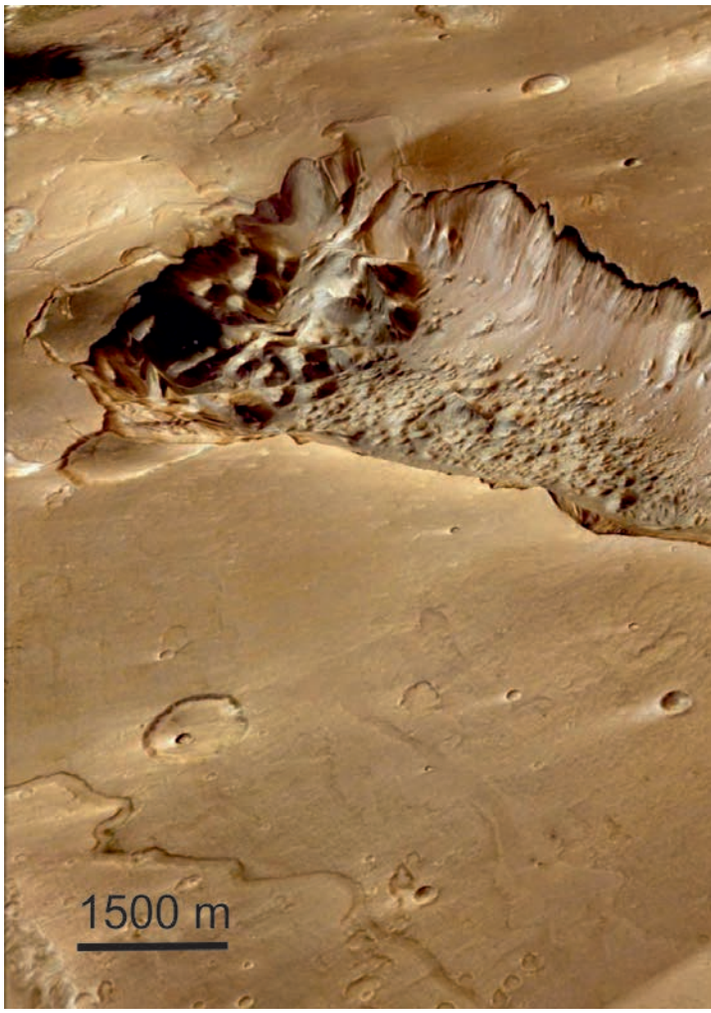
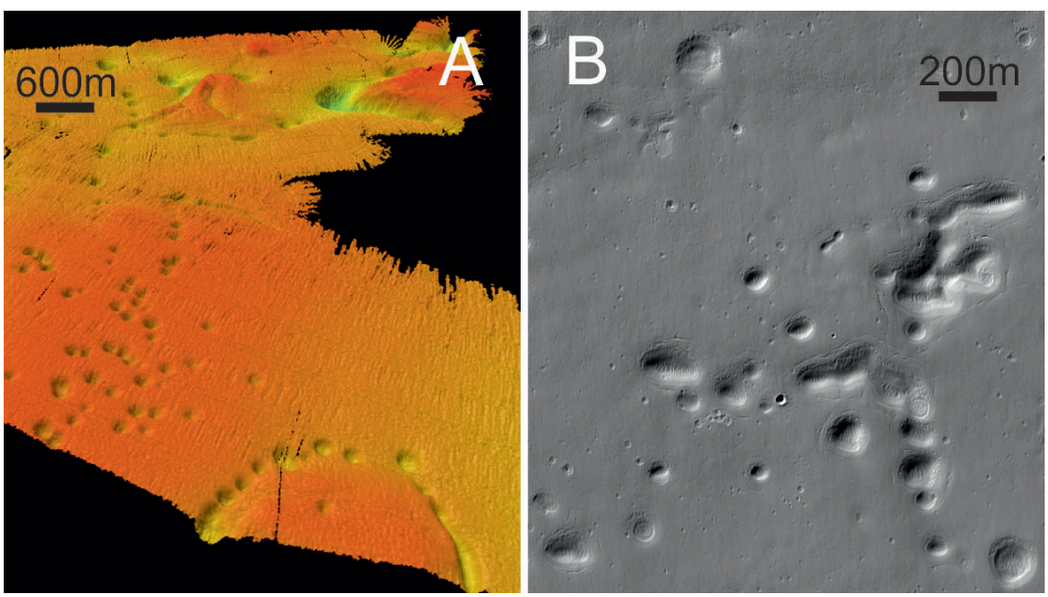
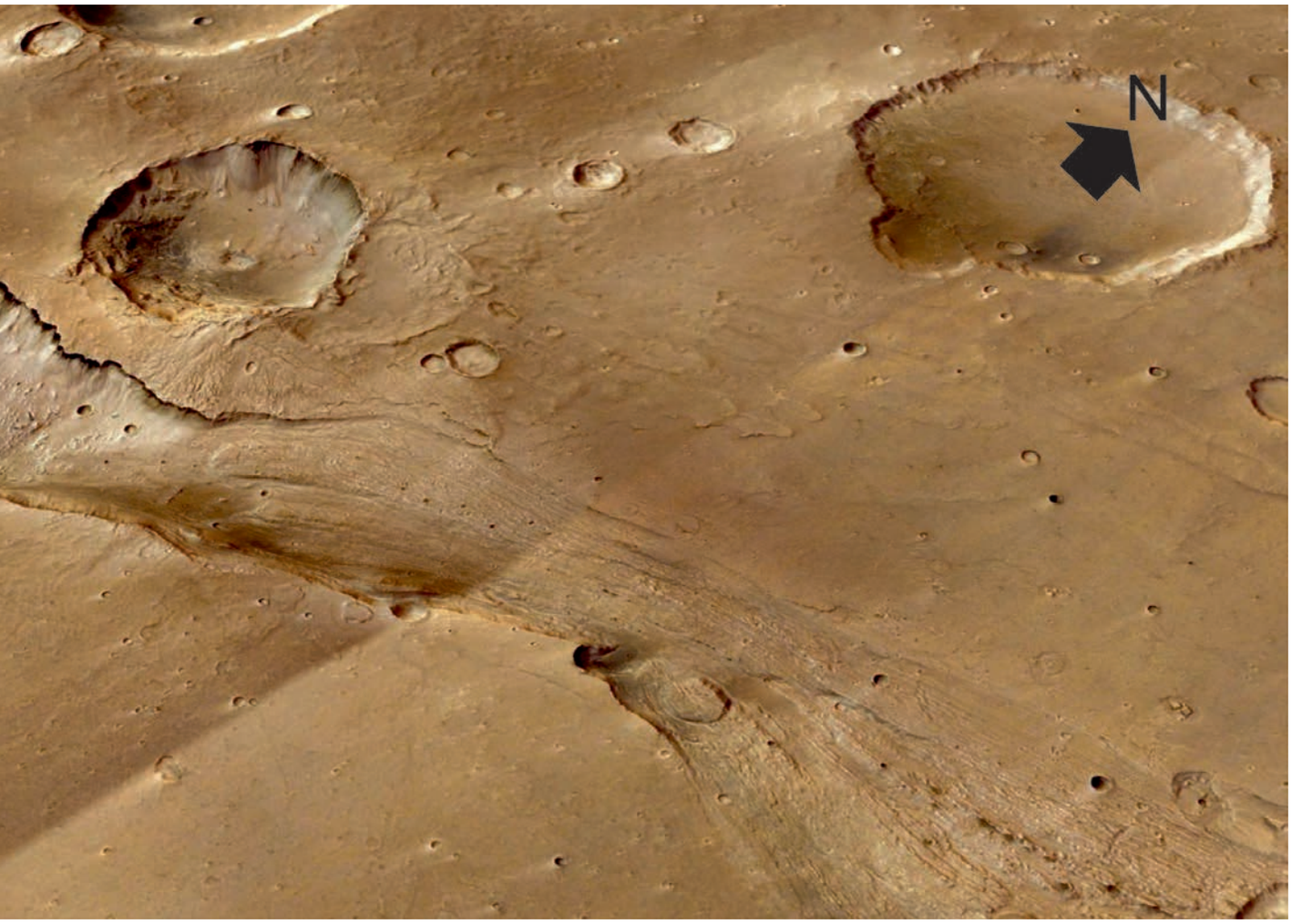


Figura 5. Los *pockmarks* son depresiones circulares o semi-circulares de diámetro variable entre metros y algunos kilómetros, que pueden llegar a tener cientos de metros de profundidad. Aparecen normalmente en los ambientes subacuáticos. Se producen por fluidificación de los sedimentos cuando migran los gases. También se han relacionado con clatratos de gas. En Marte son difíciles de distinguir de los cráteres de impacto. La figura 5 A muestra una imagen batimétrica en perspectiva de la plataforma de Chucki en el océano Ártico terrestre donde aparece un campo de *pockmarks* (créditos: Center for Coastal and Ocean Mapping Joint Hydrosphere Center, CCOM-JHC). Cada agujero tiene unos 200 m de diámetro y 20-40 de profundidad. En 5 B se muestran estructuras semicirculares de la región de Terra Sirenum formados en sedimentos ricos en olivino de una cuenca de un cráter de impacto a 39º 25'S, 150º 30'E (imagen HIRISE ESP_025682_1400). ■





Entender el clima actual de Marte y la interacción de la atmósfera con el substrato es esencial para determinar la estabilidad de los almacenes de gas del subsuelo del Planeta Rojo. Esto constituye un objetivo primordial de los instrumentos desarrollados en el CAB: REMS y MEDA.

CLATRATOS DE GAS

Los clatratos de gas son sólidos cristalinos formados por una red de moléculas de agua en los que las cavidades son ocupadas por moléculas apolares como gases de CO_2, CH_4, O_2 o H_2. Dicha estructura se estabiliza en condiciones de alta presión y baja temperatura, por lo que se relacionan con ambientes extremos. Los clatratos de metano constituyen las mayores reservas de hidrocarburos de la corteza terrestre, y en consecuencia, su explotación es estratégica desde el punto de vista económico. Científicamente el estudio de los clatratos de gas es importante por el efecto que pueden tener en el cambio climático global, el origen de la vida y la habitabilidad de objetos planetarios.

En Marte no se han detectado clatratos de forma directa, sin embargo los modelos teóricos sugieren que son abundantes en la criosfera. Si así fuera, retendrían gran cantidad de volátiles. La estabilidad de los clatratos de gas es altamente dependiente de las condiciones ambientales. Cambios bruscos de presión o temperatura en Marte producirían la desestabilización de estos hielos y la liberación masiva de gases a la atmosfera. Investigadores del CAB están estudiando la termodinámica y espectroscopía de estos materiales, cuyos resultados ayudarán a interpretar los datos de las misiones planetarias (Figura 8).

Figura 6. Los terrenos caóticos se caracterizan por tener bloques aleatoriamente distribuidos localizados en zonas deprimidas. Se asocian a canales de flujos catastróficos debidos a la destrucción y fluidificación súbita de capas de la sub-superficie. Esto ocurre por actividad tectónica, cambios térmicos, etc. En Marte se han relacionado con la disociación de clatratos o la deshidratación de hidratos de sal. La figura muestra la región de Aromatum Chaos a 1º 18'S, 41º 02'O, donde pueden observarse los bloques residuales del fenómeno catastrófico en la cabecera del canal, así como las líneas del flujo. La figura 6 es un mosaico en perspectiva de varias imágenes HRSC de la misión Mars Express (H2134, H2123, H2112, H2101). ■

ducen anualmente 280 toneladas de este gas, de entre las cuales 40-60 Tg provienen de depósitos geológicos. Se ha estimado que para mantener la concentración de 10 ppb en Marte se requiere la emisión de 12,6 x 10^{-5} Tg anuales. Este volumen podría elevarse hasta 57 x 10^{-2} Tg/año si se tienen en cuenta las plumas anómalas observadas desde Tierra. En comparación, el volumen total de metano de Marte es minúsculo, superado con creces por emisiones de un solo volcán de barro terrestre como Paclele Mari en Rumania, o por las emisiones subacuáticas que ocurren hoy en día en las Rías Bajas de Galicia. La importancia en este caso no reside en la cantidad sino en el tipo de actividad que se está registrando. Afortunadamente, las medidas isotópicas de la misión Exomars TGO nos permitirán saber algo más sobre la naturaleza del metano. Z

Figura 7. Investigador del CAB realizando experimentos de serpentinización en el laboratorio de Geología Planetaria del CAB. ■

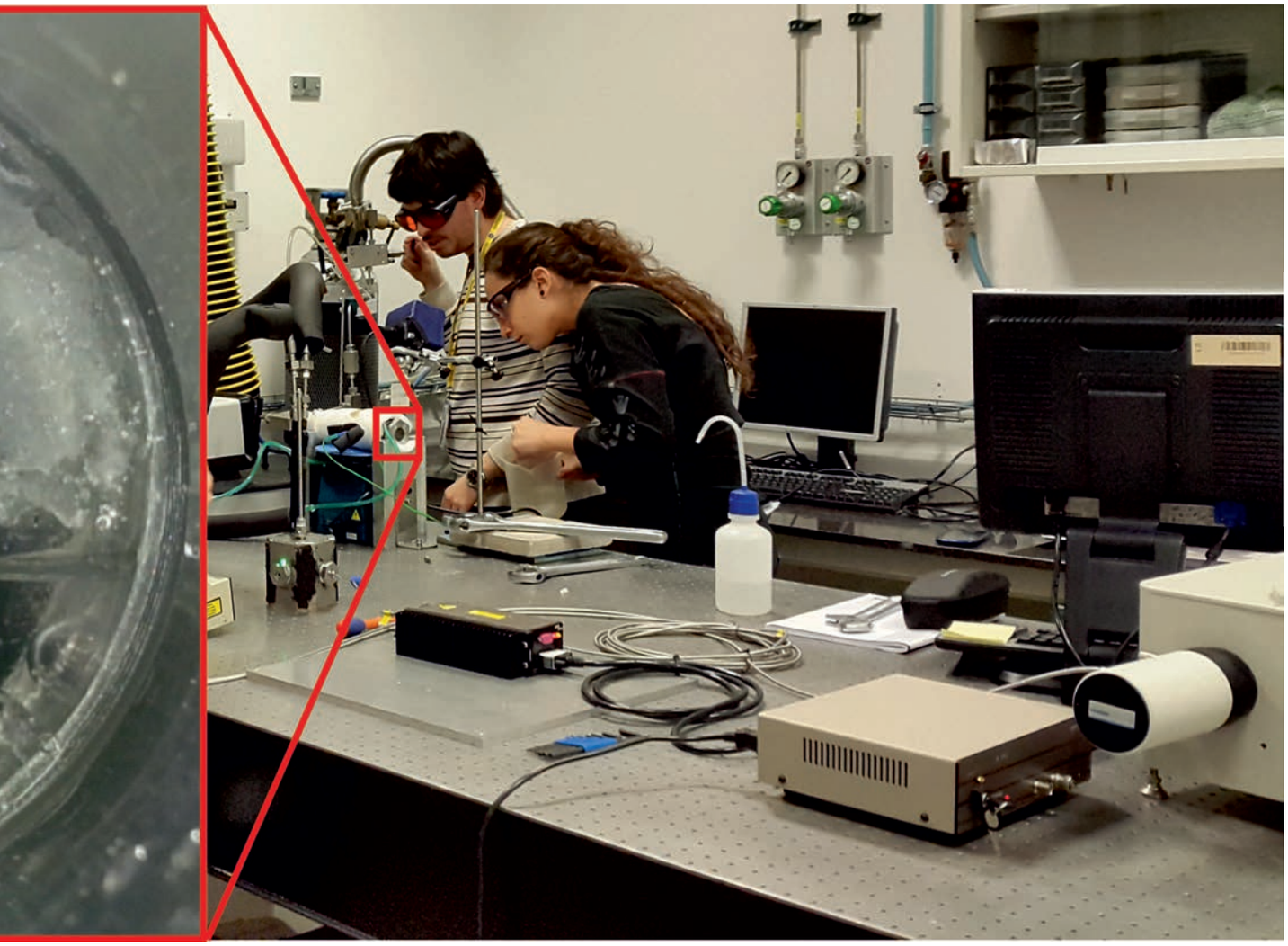


Figura 8. Investigadores del CAB durante un experimento de disociación de clatratos de gas en el laboratorio de altas presiones. En la imagen aumentada se observa el ascenso de fluidos por las fracturas originadas tras la desestabilización de la capa de clatrato. ■

Las medidas isotópicas de la misión *Exomars TGO* nos permitirán saber algo más sobre la naturaleza del metano marciano.

Buscando vida en ambientes profundos: La mina de Las Cruces

Fernando Tornos.
Departamento
de Planetología y
Habitabilidad

Los depósitos minerales, además de ser una de las bases en las que se apoya la civilización humana, son uno de los lugares en los que puede haber mayor y más variada actividad biológica dentro de lo que se conoce como la biosfera profunda, zona de la Tierra que comprende desde la superficie hasta los lugares más profundos donde hay vida. Así, muchos de los recursos naturales que utilizamos en la actualidad están directamente asociados a la interacción entre la actividad biológica y la geológica: los mayores depósitos de hierro, oro, cobre o zinc de la Tierra son el resultado de la actividad metabólica de microorganismos.

Muestreo del agua de los acuíferos de Las Cruces para posterior determinación química e isotópica.

Actualmente, la biosfera profunda llega hasta profundidades que eran inimaginables hasta ahora. Por ejemplo, se han encontrado microbios que sobreviven a más de 3 km de profundidad sin luz ni oxígeno y a temperaturas que alcanzan los 120°C. Estos lugares profundos son ambientes con pH extremos, ricos en gases y sometidos a veces a elevados niveles de radiación y altas concentraciones de metales tóxicos. Sin embargo, los microorganismos que habitan estos ambientes extremos encuentran en ellos el agua – muchas veces caliente – y, sobre todo, los nutrientes necesarios para sobrevivir, fundamentalmente compuestos químicos que ceden y reciben electrones (lo que en química se conoce como proceso de reducción y oxidación, o simplemente redox), entre

Sondeos inclinados en el fondo de la corta de Las Cruces para el muestreo de muestras inalteradas. La toma de muestras ha de realizarse siguiendo un cuidadoso protocolo para preservar los microbios en las mejores condiciones de vida y evitar la contaminación por organismos foráneos.

Se han encontrado microbios que sobreviven a más de 3km de profundidad sin luz ni oxígeno y a temperaturas que alcanzan los 120°C.

los que destacan los formados por azufre y carbono. De hecho, muchas de las mineralizaciones que hoy día conocemos se han formado en zonas que han sufrido cambios bruscos en el estado de reducción-oxidación del entorno geológico, lo que favoreció una rápida concentración de los metales mediante procesos de precipitación. Sin embargo, sabemos que a temperaturas inferiores a los 150-200°C, las reacciones en las que se producen intercambios de electrones (es decir, las redox) son extremadamente lentas y, en ausencia de microbios, tardan en alcanzar el equilibrio miles o incluso millones de años. Los organismos vivos se aprovechan de esta baja velocidad de reacción y catalizan o aceleran dichas reacciones, haciendo que se alcance antes el equilibrio y aprovechando la energía resultante de la reacción para su supervivencia. Este proceso es lo que conocemos como metabolismo.

Uno de los sitios del mundo donde es más evidente la interacción entre la actividad biológica y los depósitos minerales es posiblemente en la mina de Las Cruces. Se trata de la segunda mayor mina a cielo abierto activa en Europa y la segunda mayor productora de cobre, también a nivel europeo. La apertura de la mina ha permitido a un equipo multidisciplinar del CAB en co-

La Mina de las Cruces es la mayor mina a cielo abierto activa en Europa y la segunda mayor productora de cobre a nivel europeo. Es uno de los sitios del mundo donde es más evidente la interacción entre la actividad biológica y los depósitos minerales.

laboración con otras instituciones (Universidad del País Vasco, Instituto Andaluz en Ciencias de la Tierra, Servicio Geológico Americano y la propia empresa minera, Cobre Las Cruces), estudiar esta interacción en detalle. La mina, situada a unos 15 km al Noroeste de Sevilla, es el depósito de cobre más rico del mundo y en él hay evidencias de una muy importante actividad biológica. Los estudios realizados indican claramente una actividad microbiana que se ha desarrollado en, al menos, los últimos siete millones de años y que ha sido capaz de cambiar la composición de las rocas, acumulando más de un millón de

Corta minera de Las Cruces en mayo de 2011. La mineralización se encuentra bajo más de 150 metros de sedimentos terciarios que la han aislado de la atmósfera durante los últimos 8 millones de años. La actividad microbiana anaerobia ha producido una asociación de minerales única. En el fondo de la corta se observan rocas rojas, producto del remplazamiento de goethita por siderita, y negras, formadas por galena y sulfuros de hierro. ■

Aspecto de la zona donde tiene lugar la actividad microbiana. Unas rocas formadas por goethita y hematites (gossan) que se formaron por oxidación de los sulfuros masivos primarios (fundamentalmente pirita) durante su exposición al aire libre han sido parcialmente remplazadas por siderita con colores pardos y galena y sulfuros de hierro (negro) producidos por un incremento del CO_2 y H_2S ligados al metabolismo microbiano. Esta zona hospeda un acuífero con aguas alcalinas, bicarbonatadas y ricas en sulfato que son fundamentales para la formación del ecosistema. ■

Lo estudios que se han realizado en la Mina de las Cruces muestran que en el subsuelo hay una cantidad ingente y muy variada de vida que había pasado desapercibida hasta ahora.

toneladas de cobre y cantidades muy importantes de plomo, plata y oro.

Únicamente los microbios extremófilos son capaces de vivir en este ambiente sin luz ni oxígeno, a más de 150 metros de profundidad y sellado por la marga que forma la Cuenca del Guadalquivir, pero que es rico en agua y nutrientes. Estos microbios han creado un ecosistema en el que, a través de su metabolismo, transforman el sulfato que acarrea el agua y el metano que asciende por las fracturas, en ácido sulfhídrico y dióxido de carbono (CO_2). A su vez, otro grupo de organismos procariotas ha disuelto las rocas que allí había, reduciendo el hierro y liberando otros metales. En este "reactor", todos los elementos se recombinan para dar como resultado final minerales más estables en las nuevas condiciones. Así, la goethita y jarosita de partida son reemplazados por siderita, sulfuros de hierro, galena, oro y minerales muy extraños de plata, arsénico, antimonio y plomo.

¿Cómo podemos saber que estos minerales nos indican que aquí hubo vida? En primer lugar, se han descubierto pequeños fósiles de microbios. Estos fósiles son muy pequeños, del orden de 1 a 10 micras, y solo son visibles mediante un microscopio electrónico. En segundo lugar, se han descubierto minerales que son casi exclusivamente de origen biológico, como la greigita y la smythita, ambos sulfuros de hierro. En lugar de formarse pirita, un mineral más estable y que suele ser abiogénico, se forman estos raros minerales, que presentan una estructura muy desordenada y reflejan unas condiciones muy variables y extremas de precipitación. El tercer argumento es geoquímico. Los minerales presentes tienen unas firmas geoquímicas características de la actividad biológica: los microbios, al asimilar y expulsar compuestos químicos se enriquecen

Aspecto de detalle de las rocas biogénicas. Un gossan formado por goethita, anglesita y jarosita (pardo) es remplazado por siderita (rojo) debido a la reducción microbiana de Fe^{3+} a Fe^{2+} y oxidación de la materia orgánica a CO_2. En la zona inferior hay un material pulverulento negro formado por galena, sulfuros de hierro y calcita y que es producto del remplazamiento de la roca roja por sulfuros durante la reducción del sulfato a azufre reducido.

en isótopos pesados (fundamentalmente ^{13}C y ^{34}S) favoreciendo que los isótopos más ligeros se vayan a los residuos que generan – los minerales y gases de origen biológico tienen relaciones más bajas de $^{34}S/^{32}S$ y $^{13}C/^{12}C$ que los que son de origen no biológico. Todos estos argumentos combinados nos indican la existencia de vida pasada, pero no si la hay en la actualidad. Para confirmarlo, la empresa minera permitió que se hiciera un muestreo en profundidad en lugares donde los microbios todavía no hubieran tenido contacto con el aire, pues el oxígeno es letal para ellos. Se han realizado cuidadosos sondeos, procurando que las rocas extraídas no quedaran contaminadas por organismos externos. Las muestras de roca han sido posteriormente estudiadas por los microbiólogos del CAB y, aunque los resultados son todavía preliminares, podemos afirmar que hay una gran y prolífica vida en el depósito de Las Cruces y que el metabolismo de los microorganismos presentes está cambiando en la actualidad la composición de las rocas.

Estos estudios abren un amplio campo de estudios científicos y tecnológicos. Por un lado, muestran que en el subsuelo hay una cantidad ingente y muy variada de vida que había pasado desapercibida hasta ahora. Su estudio es fundamental para comprender la evolución de la vida sobre la Tierra a lo largo del tiempo y también puede dar importantes claves sobre una hipotética vida extraterrestre más viable en ambientes subterráneos que en ambientes superficiales bombardeados por la radiación.

Pero también tiene implicaciones mucho más cercanas. El estudio de estos organismos y sus relaciones con los minerales ayudará en la búsqueda de nuevas fuentes de recursos naturales, en la extracción de los metales de una manera más eficiente y en el desarrollo de técnicas biológicas de recuperación de suelos contaminados por la actividad industrial. A medio plazo, no cabe duda de que el estudio de estos microrganismos será fundamental para la biotecnología y la medicina, y también para la nanotecnología. Z

Otra vista general de la mina de Las Cruces. Se aprecia perfectamente la técnica de la corta minera en esta explotación en superficie.

El estudio de estos organismos y sus relaciones con los minerales ayudará en la búsqueda de nuevas fuentes de recursos naturales, en la extracción de los metales de una manera más eficiente y en el desarrollo de técnicas biológicas de recuperación de suelos contaminados por la actividad industrial.

Marte en el laboratorio. Las cámaras de simulación

Eva Mateo Martí.
Departamento de Evolución Molecular

El conocimiento actual que tenemos de los ambientes planetarios ha sido obtenido gracias a las misiones espaciales. Éstas aportan un conocimiento fundamental en la exploración planetaria, pero a costa de una gran inversión y esfuerzo, tanto en tiempo dedicado al desarrollo de instrumentación, como en recursos económicos empleados. Por ello, el envío de misiones espaciales es poco frecuente y algo extraordinario. Así, la simulación en el laboratorio de condiciones planetarias mediante el diseño de cámaras de simulación representa una elección necesaria y complementaria a las costosas misiones espaciales, pues permiten una mayor accesibilidad y versatilidad, un menor coste y la posibilidad de múltiples ensayos.

En las últimas décadas ha habido un extraordinario aumento del interés de las agencias espaciales (NASA, ESA, Roscosmos, Agencia Espacial India, etc.) por la exploración de Marte. La misión de NASA *Mars Science Laboratory* (MSL) que está operativa sobre la superficie de Marte desde 2012 y la futura misión europea de la ESA ExoMars 2020, ambas misiones en superficie, tienen como principal objetivo, entre otros, el estudio de las condiciones de habitabilidad del planeta. Por tanto, en la actualidad, Marte es el objetivo primordial de las misiones planetarias como candidato idóneo para la búsqueda de estas condiciones.

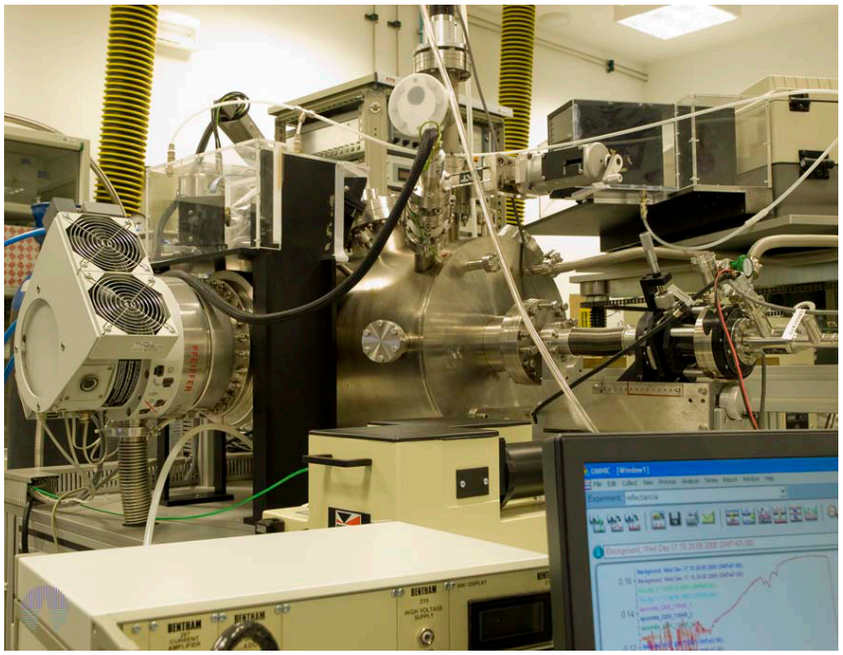
Infraestructuras y desarrollos tecnológicos para la simulación de condiciones marcianas han sido desarrolladas focalizándose en las condiciones abióticas en Marte, desde un sistema sencillo anóxido hasta las más sofisticadas cámaras de simulación en la actualidad. Zhukova y Kondratyev en 1965 fueron los primeros en usar una cámara de simulación sencilla para incubación de cultivos de bacterias en condiciones marcianas. Además de estos estudios pioneros en el estudio del efecto de condiciones marcianas en material biológico, se han desarrollado experimentos de simulación en diferentes temáticas, como geo-física y geo-química. En los últimos años, se han desarrollado sofisticadas y multifuncionales cámaras planetarias que simulan las condiciones de Marte teniendo en cuenta las medidas ambientales en el planeta de las últimas y actuales misiones espaciales.

La atmósfera de Marte es mucho más delgada que la de la Tierra, con una presión superficial equivalente a una centésima parte de la presión superficial de nuestro planeta (7 mbar) y las temperaturas de la superficie oscilan desde -113ºC en el polo durante el invierno, a 0ºC en la cara con luz durante el verano. La atmósfera está principalmente compuesta de dióxido de carbono (95,3%), nitrógeno (2,7%), argón (1,6%), y pequeñas cantidades de otros gases. El oxígeno, que es tan importante para nosotros en la Tierra, apenas representa un 0,13% de la atmósfera de Marte. Además hay sólo un cuarto de vapor de agua, lo que parece suficiente para permitir que el agua se congele en la superficie de Marte y en la que existe un rango de radiación ultravioleta de 200-400 nm.

Las cámaras de simulación reproducen estos parámetros ambientales en su interior para poder simular de forma completa las condiciones ambientales de Marte, y la realización de estudios sometidos a esas condiciones. Se realizan principalmente estudios físico-químicos de la interacción entre la atmosfera y la superficie y el subsuelo del planeta. Estas cámaras de simulación permiten probar los materiales que forman parte de las misiones espaciales a Marte, además de numerosos experimentos con muestras de minerales y material biológico en condiciones de simulación de Marte. Las cámaras de simulación más sofisticadas

Crédito: CAB.

Vista de la cámara de simulación de atmósferas y superficies planetarias PASC. ■



incluyen complementarias técnicas analíticas para el análisis y caracterización in-situ de los procesos de alteración del mineral o del material biológico debido a estar sometidos a condiciones marcianas.

Infraestructuras como las cámaras de simulación han evolucionado de manera rápida y actualmente pueden simular las condiciones de Marte así como las condiciones de la atmosfera y superficie de otros objetos planetarios de gran interés como: Titan, Europa, Tritón etc. Por consiguiente, dentro de este contexto de las cámaras de simulación, vamos a describir de manera más detallada una de las cámaras más versátil y sofisticada a nivel internacional, como es PASC, diseñada, construida y puesta a punto en el Centro de Astrobiología, y que permite simular las condiciones de Marte pero además nos permite discriminar de manera individual los parámetros físicos o combinaciones de estos.

La cámara de simulación PASC

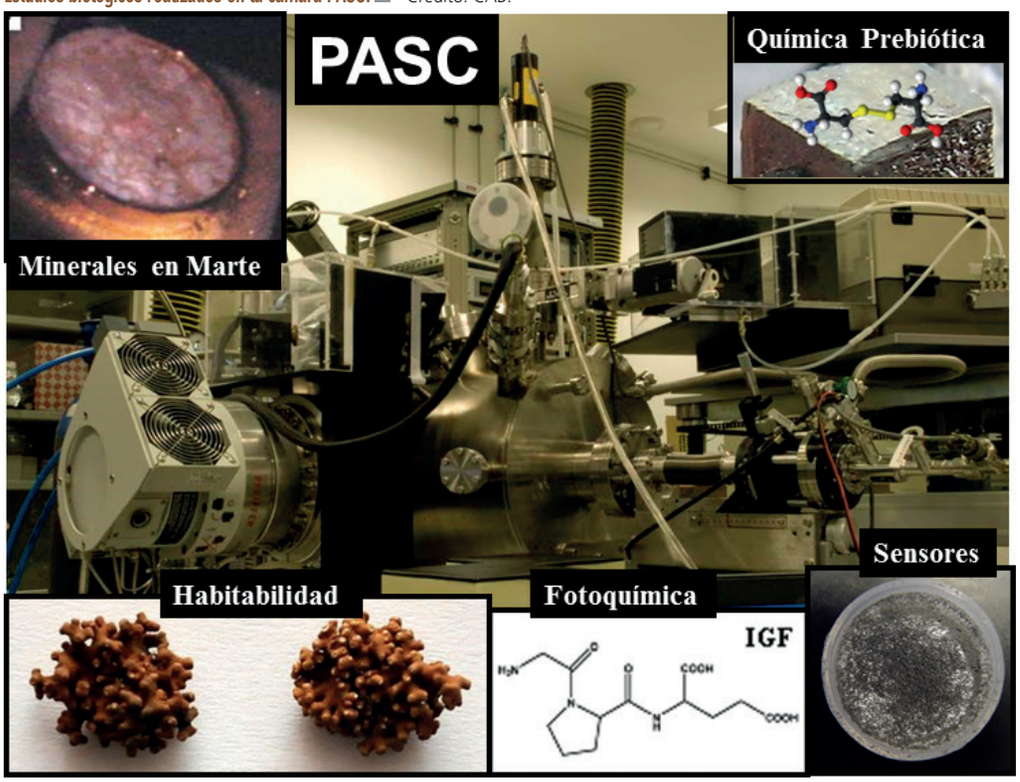
La cámara de simulación de atmósferas y superficies planetarias (PASC, *Planetary Atmospheres and Surfaces Chamber* en inglés) es una cámara versátil de simulación de ambientes, capaz de reproducir diferentes composiciones atmosféricas y las temperaturas superficiales de la mayoría de cuerpos planetarios. Ha sido especialmente desarrollada para la irradiación y caracterización in-situ de muestras sometidas a condiciones de estudio. El rango total de presión va desde 5 a 5×10^{-9} mbar. La composición atmosférica adecuada se controla mediante un espectrómetro de masas, y el rango de temperaturas es de 4 a 325K. El tamaño de las muestras va desde 5 a 35mm de diámetro y 10mm de espesor, aunque existe porta-muestras específicos según las necesidades del estudio a realizar. La muestra de estudio puede ser irradiada mediante fuentes de iones, electrones, una lámpara de deuterio de radiación ultravioleta y una de descarga de gas noble también de radiación ultravioleta. Las técnicas de análisis in-situ son espectroscopia ultravioleta (UV) y espectroscopia infrarroja (RAIRS). Estas especificaciones técnicas y el acople de las dos espectroscopias *in situ* (UV y RAIRS) hacen de esta máquina una herramienta única para estudios de exploración planetaria.

PASC está especialmente diseñada para monitorizar cambios químicos inducidos en la muestra de estudio debido a procesos de irradiación en ambientes controlados Por tanto, se pueden reproducir condiciones ambientales escogidas y reproducir las diversas reacciones químicas y/o bio-químicas que tienen lugar en la superficie de estudio sometida a las atmósferas de los distintos planetas del Sistema Solar o en otros entornos ambientales, ya sean reales o imaginados

Debido a su flexibilidad, PASC es una herramienta básica y única para el desarrollo, mejora y apoyo a las futuras misiones espaciales al planeta Marte. Además verifica y confirma hipótesis a partir de los resultados y medidas de las propias misiones espaciales en superficie (*rovers*) u orbitadores operando en Marte.

En los últimos años, se han desarrollado sofisticadas y multifuncionales cámaras planetarias. Debido a su flexibilidad, la cámara PASC es una herramienta básica y única para el desarrollo, mejora y apoyo a las futuras misiones espaciales al planeta Marte.

Estudios biológicos realizados en la cámara PASC. Crédito: CAB.



Aplicaciones científico-tecnológicas de PASC a la investigación y exploración planetaria en Marte

Estudios biológicos

Los estudios biológicos se llevan a cabo sometiendo a microorganismos a las condiciones superficiales de otros planetas de nuestro Sistema Solar. En el caso de Marte, los experimentos se ven restringidos por las condiciones de baja humedad y presión en el ambiente.

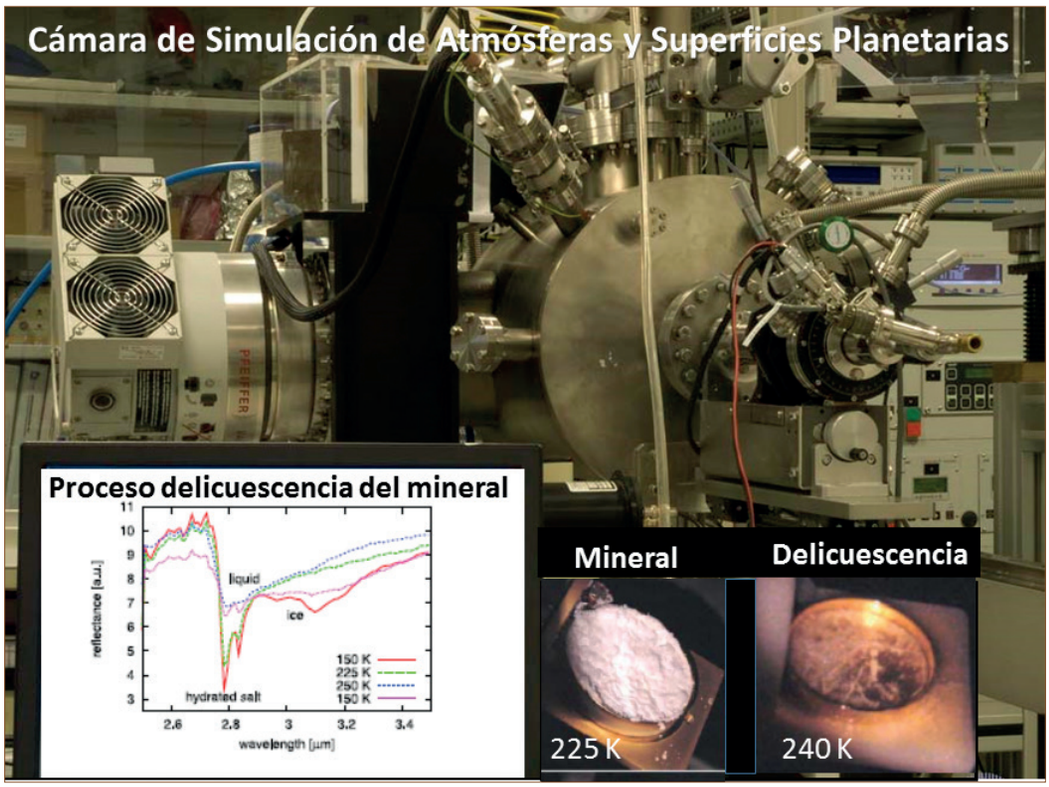
Se han propuesto diferentes experimentos para estudiar la respuesta de organismos previamente escogidos a condiciones de alta radiación, de diferente composición atmosférica y de temperatura y presión marcianas. Entre ellos se encuentra la realización de ensayos para detectar la actividad metabólica de microorganismos sometidos a las condiciones ambientales de la superficie de Marte.

Las preparaciones biológicas pueden estar compuestas tanto por microorganismos en estado vegetativo como por formas de resistencia (esporas). Y los microorganismos estudiados podrían, a su vez, presentar condiciones de crecimiento variables, pudiéndose estudiar desde extremófilos hasta modelos de ensayo de condiciones de vida no extremas. También es posible preparar muestras con inclusión de material biológico, ya sea en estado vegetativo como en formas de resistencia. Estas muestras pueden ser tanto cultivos crecidos y desecados, como rocas o minerales específicos donde se ha introducido el material biológico de estudio para el ensayo de resistencia. En los ensayos se analizan, en concreto, los mecanismos de protección que se pueden desarrollar en los microorganismos estudiados como respuesta a las condiciones "adversas" a las que han sido sometidos. Los análisis comprenden el estudio del efecto de determinados pigmentos para la supervivencia, la respuesta metabólica a nivel molecular o la detección de posibles nuevas actividades enzimáticas que permitan la colonización del medio "adverso". En concreto, los microorganismos extremófilos son muy buenos candidatos para el estudio de su supervivencia y adaptación a las condiciones de Marte. En los ensayos realizados en la cámara PASC se ha analizado la capacidad de supervivencia de bacterias quimiolitótrofas (que viven en las rocas) o líquenes a las condiciones marcianas. En el caso de los líquenes (ver imagen superior), se ha observado que su capacidad fotosintética permanece inalterada.

Estudios de físico-química

En las misiones a Marte se pretende no la búsqueda directa de vida, sino averiguar si el planeta ha tenido condiciones propicias para

Estudios geológicos realizados en la cámara PASC. ■ Crédito: CAB.



Las cámaras de simulación tienen como finalidad mejorar objetivos científicos y tecnológicos de las misiones espaciales, así como la validación de los resultados in situ mediante *rovers* u orbitadores.

albergarla. Para ello, se buscan compuestos orgánicos y restos de posibles procesos biológicos. Por consiguiente, hemos realizado exitosos estudios de la fotoestabilidad de biomoléculas sometidas a diferentes atmósferas planetarias, así como su estabilidad en superficies planetarias. La cámara de simulación PASC también es una plataforma para el estudio y evaluación de procesos de alteración exógena de materiales planetarios, lo que conlleva estudios de fotoquímica, de la alteración de materiales de las superficies planetarias por exposición a radiación ultravioleta y cálculos de tasas de alteración para establecer la cronología de materiales afectados por estos procesos.

Estudios geológicos

En la cámara de simulación PASC se han desarrollado estudios de simulación de diferentes procesos geológicos que afectan a la renovación de la superficie y la dinámica interna de un objeto planetario en la actualidad o en otros períodos geológicos y sus implicaciones astrobiológicas. Además de planetas y meteoritos rocosos, se pueden llevar a cabo experimentos en un sustrato geológico y mediante diferentes técnicas analíticas se puede controlar cómo ocurren las reacciones químicas y cómo afectan los resultados a los procesos geológicos y qué implicaciones conllevan. Es conveniente el uso de un espectrómetro de infrarrojo para la comparación de las señales interesantes con los datos provenientes de los sensores espaciales. Entre los procesos interesantes de estudio cabe destacar: Evaluación de la hipótesis de formación de estos minerales con presencia de fases del agua no líquida, así como el estudio de la estabilidad de las sales hidratadas en las condiciones ambientales de la superficie de Marte y su estudio de delicuescencia de sales en condiciones planetarias Marcianas (ver imagen superior).

Los dispositivos, instrumentación y materiales que forman parte de una misión espacial deben ser probados anteriormente bajo condiciones de Marte, para garantizar su estabilidad y perfecto funcionamiento en dichas condiciones. Por tanto las cámaras de simulación tienen también numerosas aplicaciones en este campo, como por ejemplo: estudiar la alteración de materiales por variación de parámetros físicos (ej. despresurización, extremas temperaturas o irradiaciones), la permanencia de los materiales metastables en las nuevas condiciones extremas, validar la correcta operación de sensores, así como posibles implicaciones en su calibración. Z

En el laboratorio de Adaptación Molecular del CAB se analizan los genes y las estrategias moleculares de adaptación de microorganismos extremófilos que habitan diferentes ambientes y que les permiten sobrevivir en condiciones extremas.
El objetivo es comprender mejor los límites físico-químicos para la existencia de la vida y plantear si la vida, tal y como la conocemos, puede existir en otros cuerpos planetarios con condiciones extremas. Las investigaciones consisten en diseñar microorganismos y plantas que se puedan adaptar mejor a las condiciones extremas del espacio y que faciliten el desarrollo de futuras misiones espaciales y de bases habitadas en otros planetas, como por ejemplo Marte.

Plantas en Marte

José Eduardo González-Pastor.
Departamento de Evolución molecular (CAB)

Una limitación importante en la exploración espacial y en el establecimiento de bases habitadas en otros planetas o en el espacio es el abastecimiento de alimentos. Una misión tripulada a Marte, considerando el regreso a la Tierra, tendría una duración aproximada de unos tres años. El suministro de todos los alimentos necesarios para la supervivencia de los astronautas durante todo ese tiempo sería extremadamente complejo, ya que podría ser imposible transportar todos los alimentos en el primer viaje de la nave espacial a Marte y serían necesarios viajes adicionales exclusivamente para transportar alimentos. Además, sería muy costoso ya que, por ejemplo, transportar tan sólo medio kilogramo de comida a la estación espacial internacional, que está relativamente cerca, cuesta más de siete mil euros. Si, por otra parte, nos planteamos establecer bases habitadas permanentes en Marte, el problema de abastecimiento sería aun mayor. Por ello, la solución ideal para proporcionar nutrientes, agua y oxígeno, es lo que se conoce como Sistemas de Soporte de la Vida que permitirían alargar al máximo posible la autonomía de estas futuras misiones espaciales de larga duración, evitando el abastecimiento externo. Los Sistemas de Soporte de la Vida consisten en un conjunto de dispositivos que permitan el suministro de alimentos y oxígeno, así como el reciclaje de los residuos y la purificación del agua (Figura 1). Por ello, las distintas agencias espaciales están muy interesadas y apoyan la investigación en la optimización de

Figura2. Invernaderos en Marte. Fuente Wikipedia (By NASA- http://www.nasa.gov/mission_pages/station/research/news/meals_ready_to_eat (direct link), Public Domain, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=42408478).

Los Sistemas de Soporte de la Vida son un conjunto de dispositivos que permitirían el suministro de alimentos y oxígeno, así como el reciclaje de los residuos y la purificación del agua. Con estos Sistemas se podría alargar al máximo posible la autonomía de las futuras misiones espaciales de larga duración, evitando el abastecimiento externo.

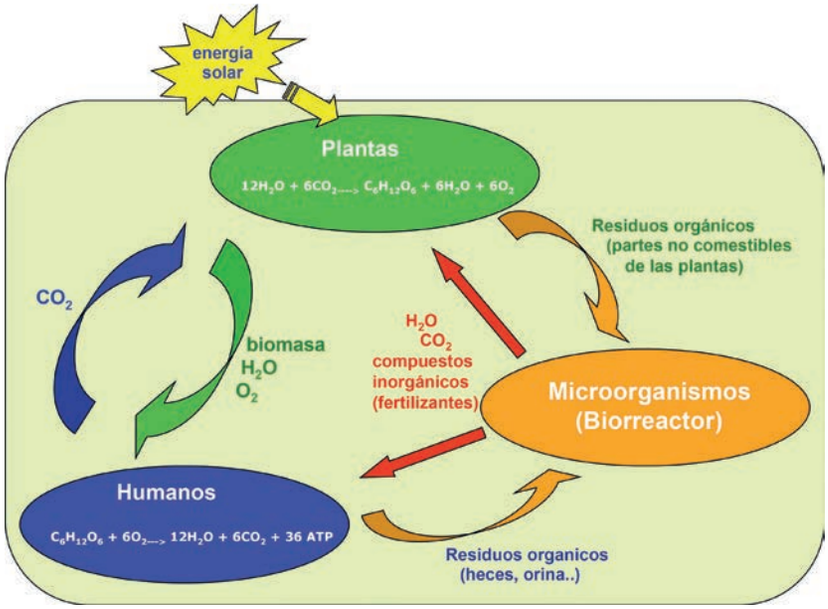


Figura 1. Sistema de Soporte de la Vida. En un sistema de Soporte de la Vida ideal, todos los procesos necesarios para generar O_2, CO_2, y de reciclaje de los compuestos orgánicos serían llevados a cabo por organismos (plantas, humanos y microorganismos) y no por dispositivos de ingeniería.

¿Qué investigaciones se realizan en el laboratorio de Adaptación Molecular del CAB sobre este tema?
En concreto, se estudian los mecanismos de adaptación de microorganismos extremófilos que habitan ambientes como Río Tinto, salares del altiplano andino, salinas, Antártida, etc. y que les permiten sobrevivir en condiciones extremas como pH ácido, presencia de metales y metaloides muy tóxicos, salinidad, bajas temperaturas y elevadas dosis de radiación ultravioleta. Para ello se emplea la técnica denominada metagenómica funcional, que es una técnica independiente de cultivo por la cual los genes de microorganismos de muestras ambientales pueden ser expresados (transferidos) en la bacteria de laboratorio *Escherichia coli*, que los incorpora en su genoma. Por otra parte, los genes de resistencia identificados en los análisis se están transfiriendo a otros microorganismos y plantas para incrementar sus capacidades de supervivencia en condiciones extremas. Por ejemplo, se han diseñado plantas (*Arabidopsis thaliana*) que pueden sobrevivir mejor en un pH más ácido gracias a que expresan genes procedentes de microorganismos resistentes a extrema acidez del Río Tinto.

Sistemas de Soporte de la Vida con plantas o microorganismos fotosintéticos que sirvan de alimentos y que aporten el oxígeno necesario para la supervivencia.. Por otra parte, las plantas contribuirían al reciclaje de los desechos orgánicos producidos por los astronautas, ya que podrían convertirse en abono que permitiría su óptimo crecimiento.

Dificultades para el crecimiento de plantas en la superficie de Marte

Las plantas que conocemos han necesitado millones de años para adaptarse a las condiciones de gravedad, temperatura, radiación, humedad y componentes del suelo que existen en la Tierra. Por ello, el desarrollo óptimo de las plantas estaría muy afectado en el espacio o en la superficie de otros planetas diferentes a la Tierra, que presentan condiciones muy diferentes y mucho más extremas que las de nuestro planeta, y esto supone un obstáculo importante para el diseño de Sistemas de Soporte de la Vida.

En la superficie de Marte la gravedad es solo un tercio de la que hay en la Tierra. La ausencia de gravedad o microgravedad es un problema para el crecimiento correcto de las plantas, que se han adaptado a las condiciones de gravedad terrestres, produciendo un efecto de desorientación que afecta a la disposición de las raíces y de los tallos. Además, esta circunstancia modifica las condiciones del intercambio de gases como el dióxido de carbono y el oxígeno en la planta y haría que creciesen más despacio. No obstante, en la Estación Espacial Internacional se consiguió recientemente en el contexto del experimento denominado "Veggie 1" el cultivo de plantas de lechuga con un desarrollo aparentemente correcto. Por ello, la gravedad en Marte, aunque sea baja, podría no suponer un problema importante en el desarrollo normal de plantas de interés agrícola de pequeño porte.

El crecimiento apropiado de las plantas requiere de la disponibilidad en los suelos de diversos minerales y elementos, como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio, hierro y magnesio, entre otros. En Marte se ha demostrado la existencia de estos elementos, aunque podrían no estar en las concentraciones adecuadas para el cultivo de plantas. No obstante, esto se podría resolver mediante el empleo de fertilizantes, que en Marte se podrían obtener a partir de los desechos orgánicos (heces y orina) generados por los astronautas. Por otra parte, los suelos del planeta Marte podrían contener compuestos tóxicos que impidiesen el cultivo de las plantas, como por ejemplo metales o metaloides tóxicos, y percloratos, cuya presencia se ha demostrado recientemente, y que son las sales que permiten la existencia de agua líquida en Marte, ya que estas salmueras no se congelan.

Sin embargo, otras condiciones impedirían el cultivo de plantas directamente en la superficie de Marte. Por ejemplo, la temperatura en Marte puede variar entre alrededor de -100°C en los polos y algunos grados positivos en el ecuador (+2 ó 3°C), y además la variación diurna es muy elevada, pudiendo alcanzar hasta una diferencia de 80°C entre el día y la noche. Otro problema es la radiación que llega a la superficie de Marte, ya que la atmósfera es muy delgada y permite el paso de la radiación ultravioleta que proviene del Sol. Además, la superficie de Marte está expuesta a la peligrosa radiación cósmica que consiste en partículas muy energéticas, principalmente protones, aceleradas a velocidades cercanas a la de la luz. Por otra parte, la composición de gases de la atmósfera de Marte podría impedir el crecimiento de plantas en su superficie. Aunque contiene dióxido de carbono que podría ser empleado por las plantas en presencia de luz, no contiene los niveles de oxígeno necesarios para que puedan sobrevivir durante el ciclo de oscuridad. Una complicación adicional es la ausencia de agua líquida debido a la baja presión atmosférica, aunque existe agua en estado líquido en salmueras que contienen percloratos pero que no se podrían emplear en el cultivo de plantas. No obstante, el agua no supondría un problema ya que se podría obtener a partir del agua congelada o purificada a partir de las salmueras. Por tanto, el cultivo de plantas se tendría que hacer en invernaderos que mantuviesen las condiciones apropiadas de temperatura, composición de gases y humedad, y que protegiesen las plantas de la radiación (Figura 2). Además de esta forma se podría utilizar el oxígeno producido por las plantas durante el ciclo diurno.

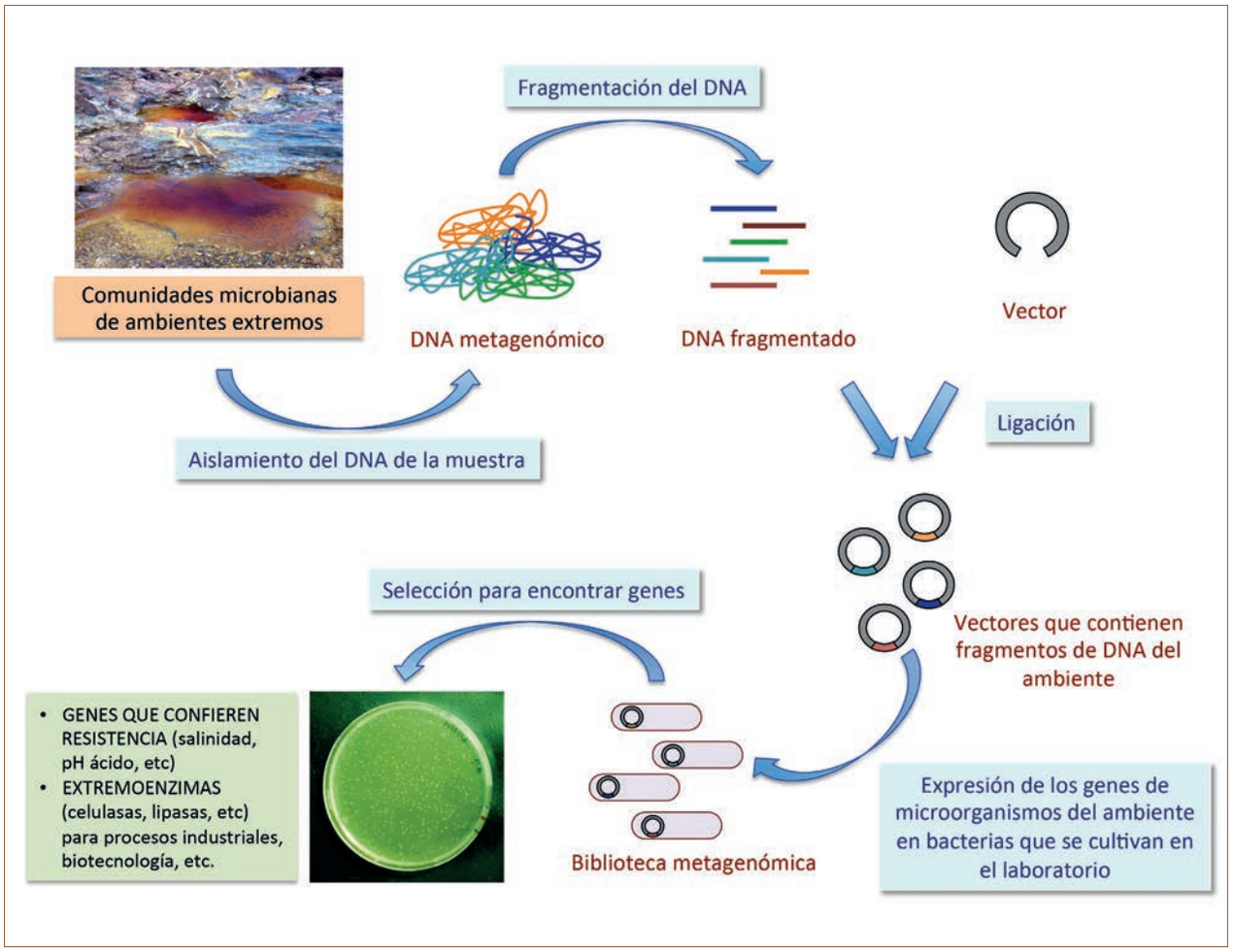


Figura 3. Metagenómica funcional. El DNA total (DNA metagenómico) aislado a partir de microorganismos de ambientes extremos se digiere y se clona en vectores. De esta forma obtenemos una biblioteca de vectores cada uno de ellos portador de un fragmento de DNA de esos microorganismos. Esta biblioteca se introduce en una bacteria que se puede manipular en el laboratorio y que expresar algunas de las proteínas que se codifican en los genes de esos fragmentos de DNA. Las bibliotecas metagenómicas se someten a una selección que permita identificar genes implicados en resistencia y enzimas que puedan realizar su actividad en condiciones extremas (extremoenzimas) y que puedan tener un interés industrial. ■

En la Tierra existen numerosas especies de plantas que sobreviven en condiciones muy extremas, aunque no tanto como las de Marte. Es el caso de las zonas desérticas, los polos y las cimas de las montañas donde se registran grandes contrastes de temperaturas, y el de Río Tinto, caracterizado por la acidez de su suelo.

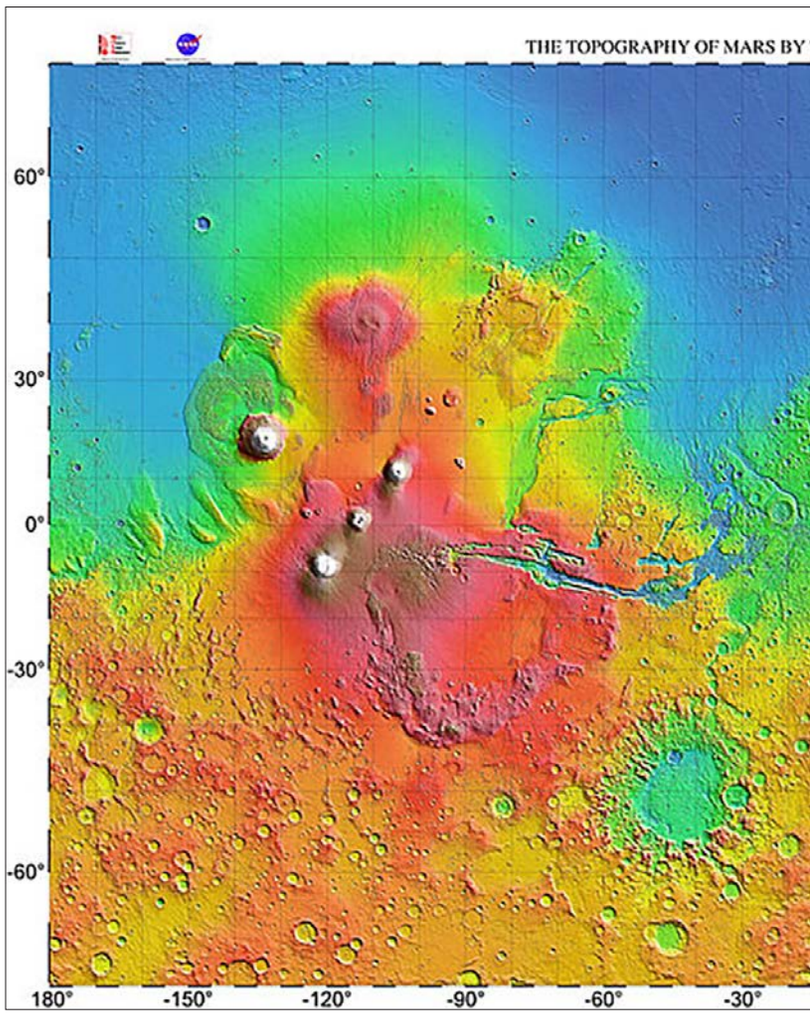
Un problema adicional que no se suele considerar es la polinización. Con excepción de los cereales que requieren el viento para que el polen se transporte de unas plantas a otras, la mayoría de plantas que producen frutas y hortalizas necesitan insectos polinizadores para esta función. Por ello, en los Sistemas de Soporte de la Vida que incluyan estos tipos de plantas sería necesario la presencia de insectos polinizadores que permitieran la producción de sus frutos.

Por otra parte, en nuestro planeta existen numerosas especies de plantas que sobreviven en condiciones muy extremas, aunque no tanto como las de Marte: i) altas y bajas temperaturas, como en desiertos, zonas polares y cimas de montañas; ii) suelos ácidos enriquecidos en metales y metaloides tóxicos, como en el Río Tinto; iii) suelos salinos; y iv) altas dosis de radiación, como en las zonas más elevadas del planeta. Los mecanismos que permiten la adaptación de las plantas o incluso de microorganismos a estas condiciones extremas se podrían introducir en otras plantas para acelerar su adaptación a algunas de las condiciones de los nuevos nichos extraterrestres. Además, se podrían identificar nuevas variedades genéticas de estas plantas de ambientes extremos, concretamente de aquellas que tengan interés agrícola, que les permitan tener un crecimiento más óptimo en condiciones aún más extremas. Por ejemplo, la patata o papa es una planta originaria de los Andes, que crece a gran altitud, y que está adaptada a heladas, sequías, y a elevadas dosis de radiación. De hecho, el Centro Internacional de la Papa (CIP), en Lima (Perú), en colaboración con la NASA, va a investigar el crecimiento de diversas variedades nativas de papa en condiciones marcianas de radiación, concentración de CO_2 en la atmósfera o de presión; sin olvidar su posible cultivo en otras zonas de la Tierra con condiciones extremas como desiertos, lugares muy fríos, muy secos o expuestos a elevada radiación. Aquellas plantas de patata más adaptadas a estas condiciones podrían ser empleadas para alimentar a futuros astronautas, como ya se ha planteado en la película de ciencia ficción Marte (The Martian, 2015) dirigida por Ridley Scott. Z

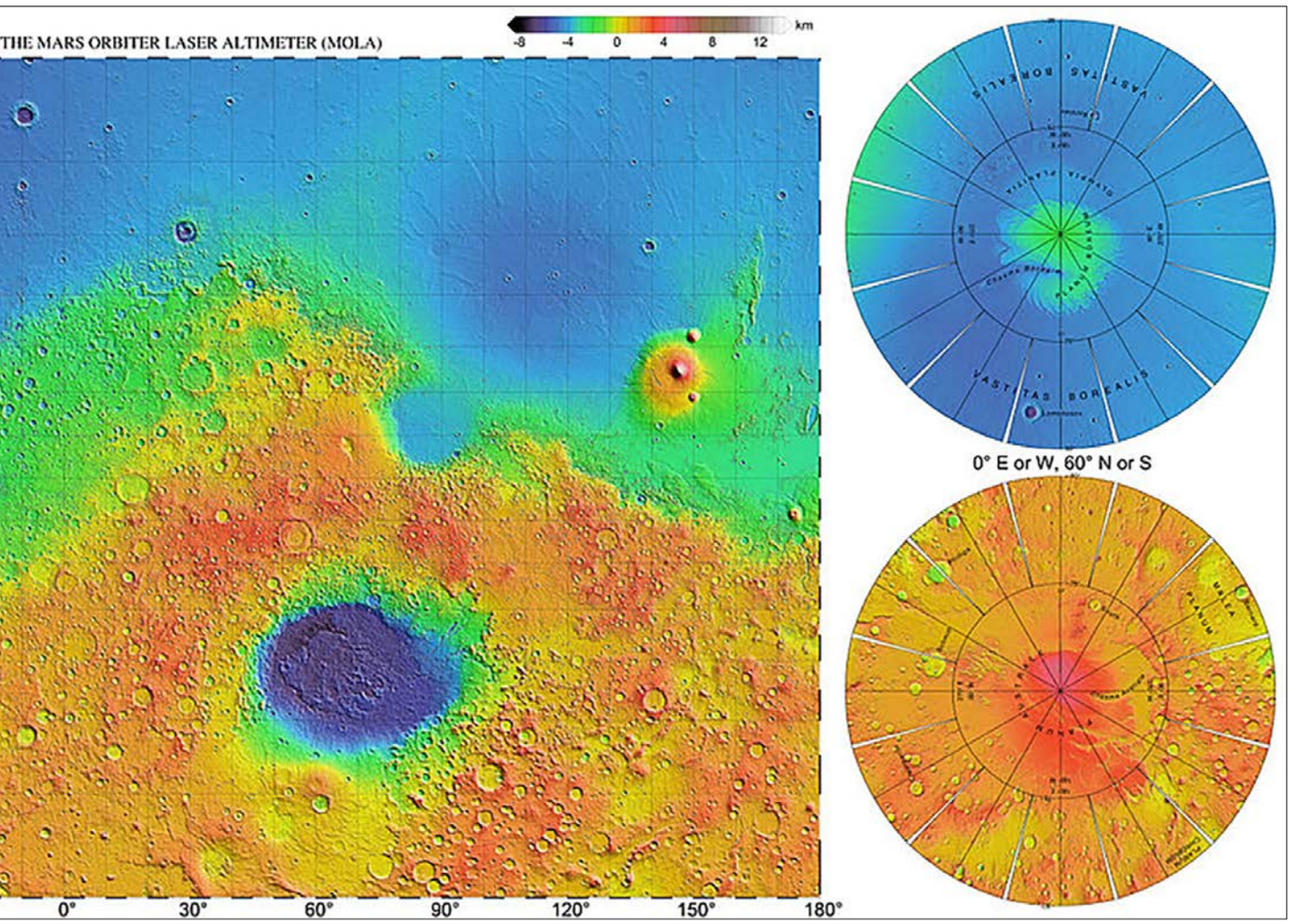
Marte: objetivo astrobiológico

Juan Ángel Vaquerizo,
Unidad de Cultura Científica

Marte es el planeta del Sistema Solar donde los datos indican que hay más probabilidades de encontrar indicios de vida presente o pasada. Se trata de un planeta rocoso con ciertas similitudes con nuestro planeta. En la actualidad es frío y seco, tiene una temperatura media de -55°C, posee un gran contraste de temperaturas entre estaciones (-60 a -5°C) y una atmósfera tenue de 7 milibares de presión compuesta en su mayoría por dióxido de carbono. A pesar de estos datos, la exploración de Marte ha revelado evidencias indiscutibles de que, en el pasado, fue un planeta templado y húmedo, lo que lo convierte en un objetivo astrobiológico.



Las misiones espaciales que han explorado Marte han detectado en su superficie evidencias de un pasado más habitable. Esas huellas se hallan tanto en el paisaje marciano como en las rocas. La presencia de un fluido, probablemente agua líquida, se manifiesta en la formación de cauces de ríos, depósitos sedimentarios y amplias cuencas. En el hemisferio norte marciano destaca una gran depresión llana que se ha interpretado como el lecho de un antiguo y vasto océano, denominado Océano Boreal. El análisis topográfico ha revelado la presencia de dos posibles líneas costeras, formadas por la erosión del agua a medida que el océano fue desapareciendo. Asimismo, las rocas marcianas analizadas contienen minerales que debieron formarse necesariamente en presencia de agua, como las sales hidratadas de magnesio y de hierro, o las arcillas de alteración de minerales de rocas volcánicas. El análisis de estos minerales permite averiguar las condiciones ambientales en las cuales se formaron. Los óxidos y los sulfatos de hierro, por



La presencia de un fluido, probablemente agua líquida, se manifiesta en la formación de cauces de ríos, depósitos sedimentarios y amplias cuencas. En el hemisferio norte marciano destaca una gran depresión llana que se ha interpretado como el lecho de un antiguo y vasto océano, denominado Océano Boreal.

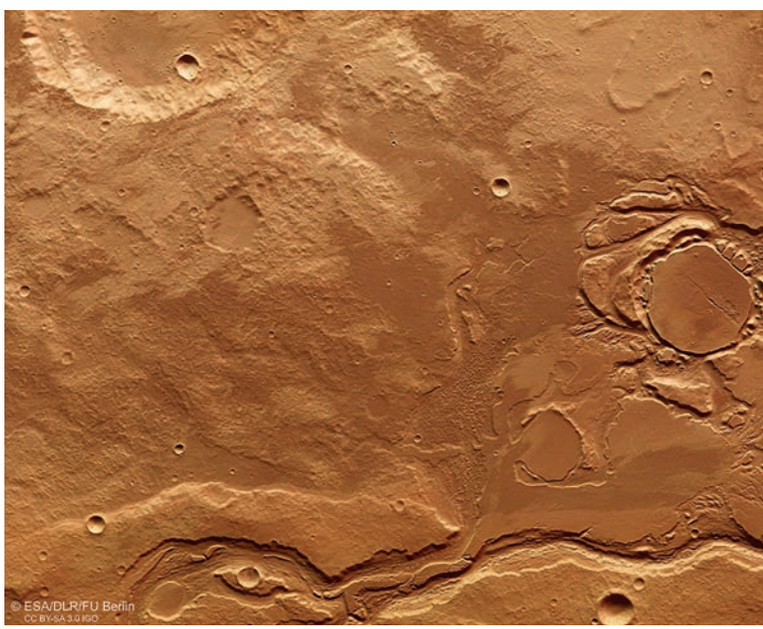
ejemplo, indican que el agua líquida a partir de la cual se originaron debía de ser ácida.

Se cree que, tras el periodo húmedo, Marte debió de sufrir un importante cambio climático que provocó la pérdida de la mayor parte del agua líquida superficial, que pasó a estar en forma de hielo o vapor. En la actualidad, el agua se encuentra mayoritariamente en forma de hielo en el interior de cráteres, entre las capas de los polos, en el permafrost o como parte de la estructura de minerales como las sales anteriormente mencionadas. Aunque el hielo no es un parámetro de habitabilidad, se considera la posibilidad de que pueda producirse hoy en día la descongelación en el subsuelo debido a gradientes térmicos locales, para formar acuíferos potencialmente habitables. Por este motivo, en las próximas misiones al planeta rojo se contempla perforar y analizar el subsuelo. Por otro lado, se ha detectado en la superficie la formación erosiva de torrenteras en los taludes de algunos cráteres y valles,

Mapa topográfico de Marte, obtenido por el instrumento MOLA a bordo del Mars Global Surveyor de la NASA. Se aprecia claramente la diferencia de elevaciones entre ambos hemisferios, más elevado el sur y más deprimido el norte. Las formaciones visibles más conocidas son, de oeste a este (izquierda a derecha), el Monte Olimpo, los tres volcanes en línea en Tharsis, el Valles Marineris, y el cráter Hellas Planitia en el hemisferio sur. ■

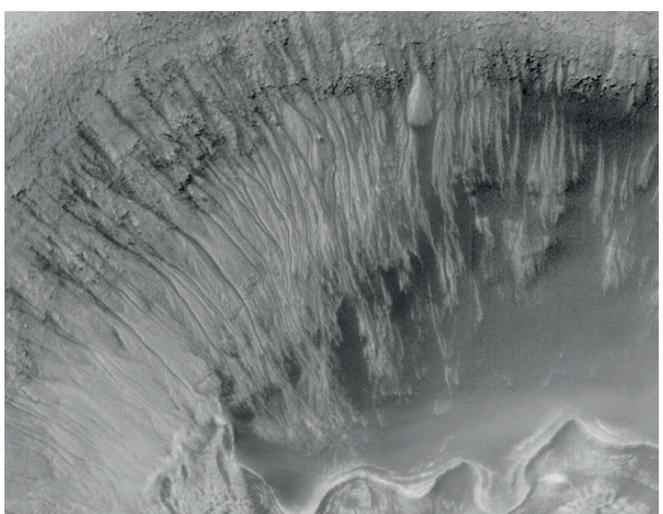
Crédito: NASA/JPL/USGS.

¿Cómo se han formado esos canales? La imagen muestra un pequeño cráter que yace dentro del gran cráter Newton en Marte, con numerosos canales estrechos que discurren desde el borde elevado hasta el fondo del cráter. La imagen cubre una región que abarca unos 3000 metros de ancho. Este tipo de barrancos se han encontrado en Marte en imágenes recientes de alta resolución tomadas por la nave Mars Global Surveyor. Canales similares a estos se forman en la Tierra por el agua que fluye, pero en Marte la temperatura es demasiado baja y la atmósfera demasiado tenue para mantener el agua en estado líquido. Sin embargo, ahora se cree que el agua líquida pudo surgir de zonas subterráneas, erosionar las cárcavas, y acumularse en el fondo, donde se congeló y/o evaporó. De ser así, podría existir a día de hoy agua líquida por debajo de la superficie marciana.



Vista parcial de la parte noroccidental de Mangala Valles en Marte. Imagen tomada por el instrumento HRSC a bordo de la nave Mars Express de la ESA. Se aprecian claramente cauces, cuencas y valles originados por la acción del agua.

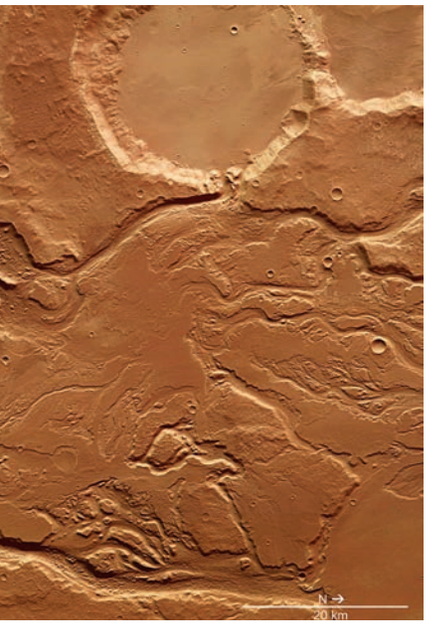
Crédito: ESA/DLR/FU Berlin.



Crédito: Malin Space Science Systems, MGS, JPL, NASA.

Se cree que, tras el periodo húmedo, Marte debió de sufrir un importante cambio climático que provocó la pérdida de la mayor parte del agua líquida superficial, que pasó a estar en forma de hielo o vapor.

Vista de la formación denominada "Kimberley" captada por el *rover Curiosity* de la NASA. Los estratos en primer plano se extienden hacia la base del Monte Sharp, lo que indica que hubo un flujo de agua hacia una cuenca que existió antes de que la montaña se formara. ■
Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS.



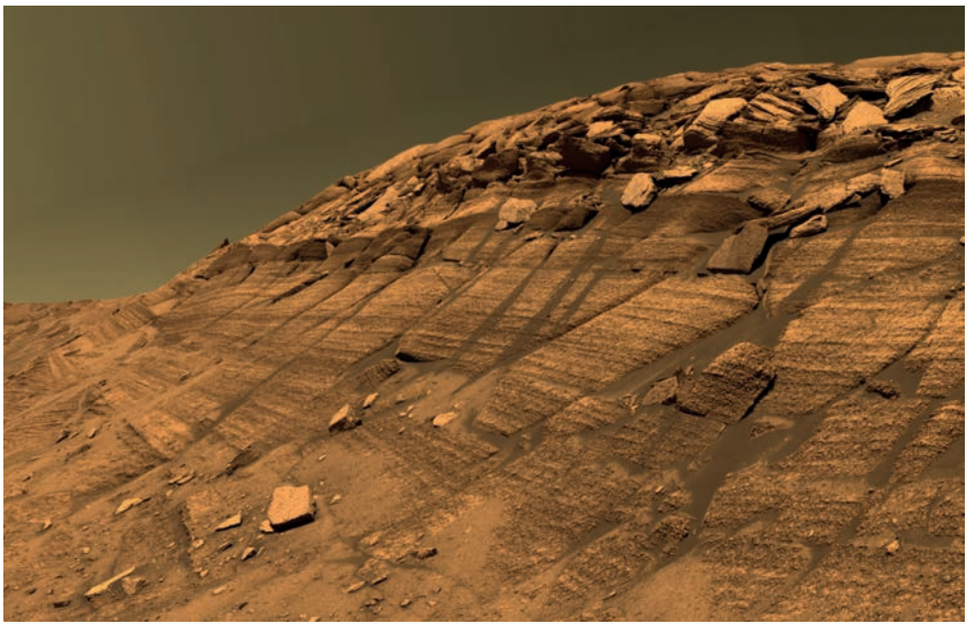


Imagen de tomada por el *rover Opportunity*. Las estructuras de la imagen solo pueden haberse producido en presencia de agua líquida. ■
Crédito: NASA/JPL/Cornell/USGS.

En la superficie de Marte se aprecian rastros de agua salada en barrancos y cráteres, como puede verse en el cráter de impacto con vetas oscuras a lo largo de su borde interior de la imagen.

Crédito: NASA/JPL-Caltech/Arizona University.

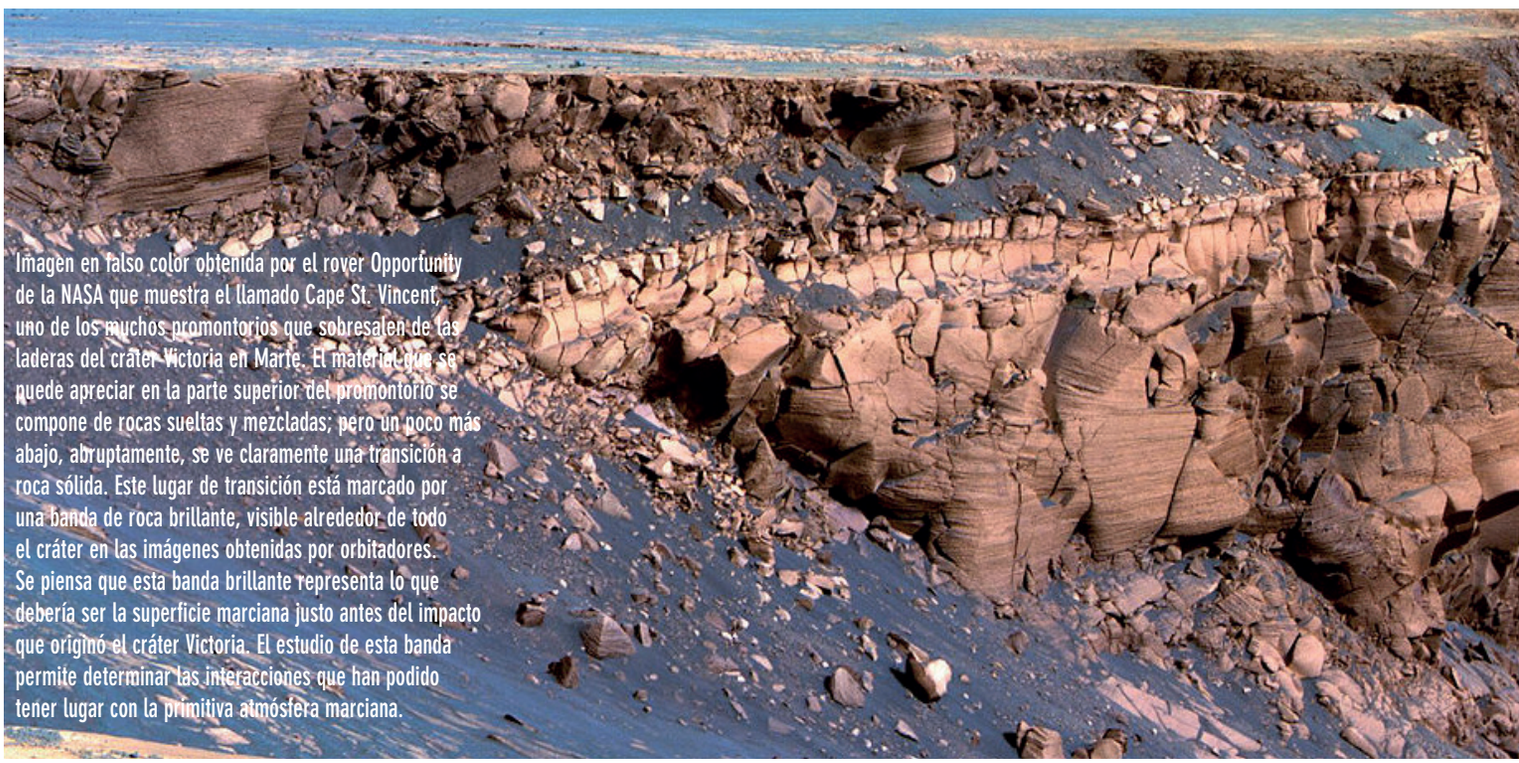


Imagen en falso color obtenida por el rover Opportunity de la NASA que muestra el llamado Cape St. Vincent, uno de los muchos promontorios que sobresalen de las laderas del cráter Victoria en Marte. El material que se puede apreciar en la parte superior del promontorio se compone de rocas sueltas y mezcladas; pero un poco más abajo, abruptamente, se ve claramente una transición a roca sólida. Este lugar de transición está marcado por una banda de roca brillante, visible alrededor de todo el cráter en las imágenes obtenidas por orbitadores. Se piensa que esta banda brillante representa lo que debería ser la superficie marciana justo antes del impacto que originó el cráter Victoria. El estudio de esta banda permite determinar las interacciones que han podido tener lugar con la primitiva atmósfera marciana.

Crédito: NASA/JPL/Cornell.

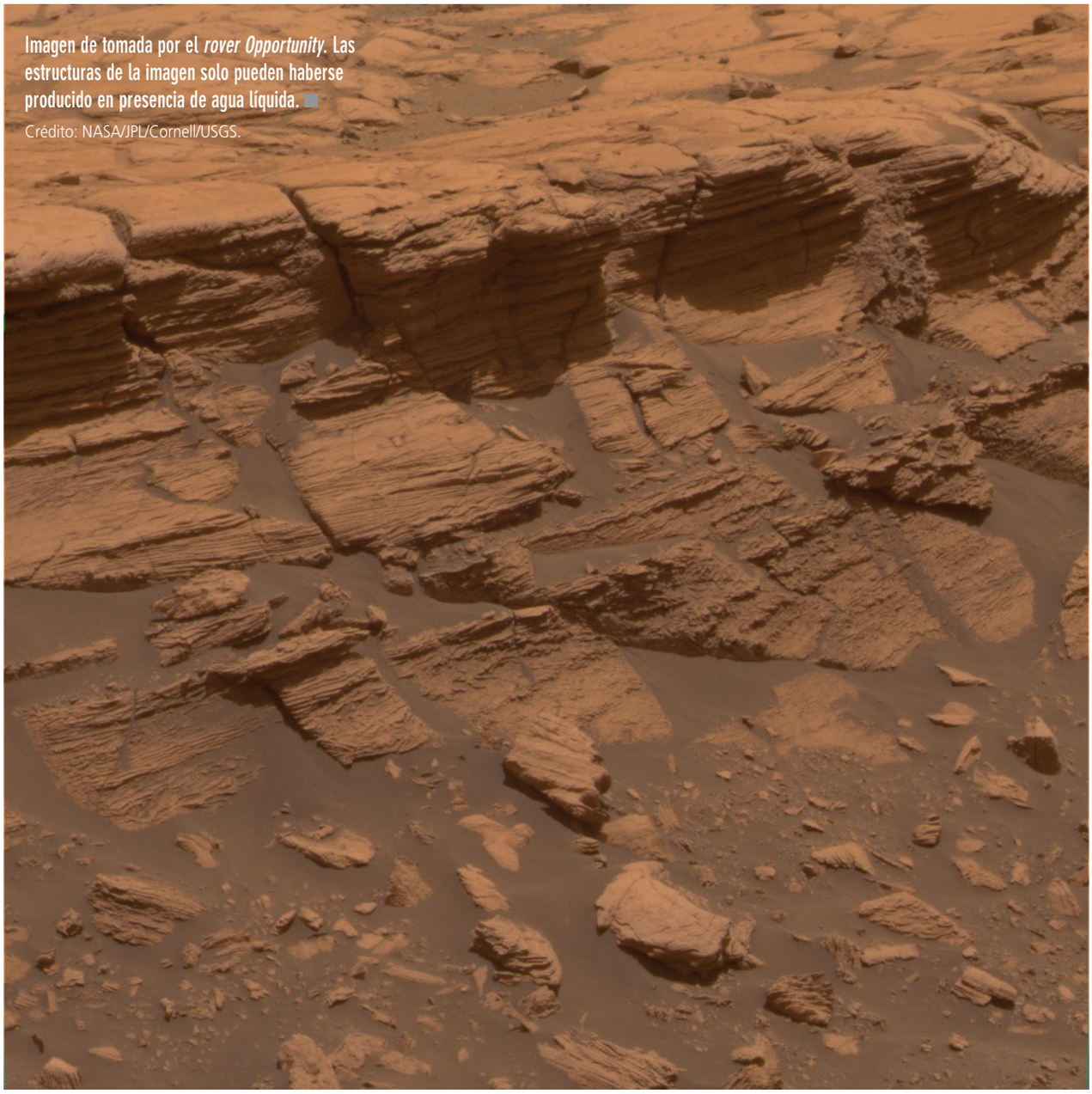


Imagen de tomada por el *rover Opportunity*. Las estructuras de la imagen solo pueden haberse producido en presencia de agua líquida.

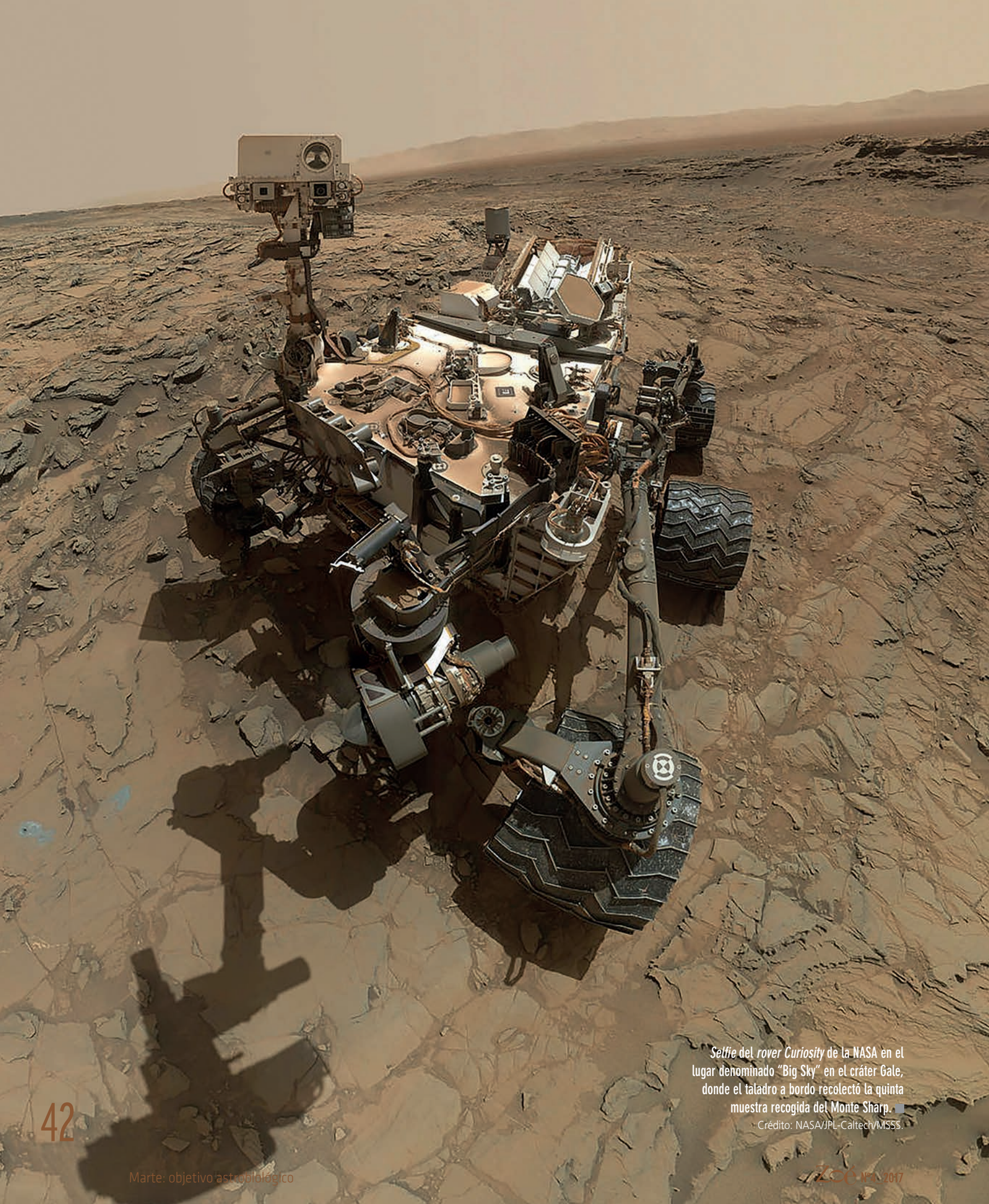
Crédito: NASA/JPL/Cornell/USGS.

así como la aparición de las denominadas "arañas" (cuencas de cientos de metros que tienen hendiduras radiales y que parecen evolucionar estacionalmente) que aparecen en latitudes altas y pueden deberse al paso estacional del agua por el estado líquido.

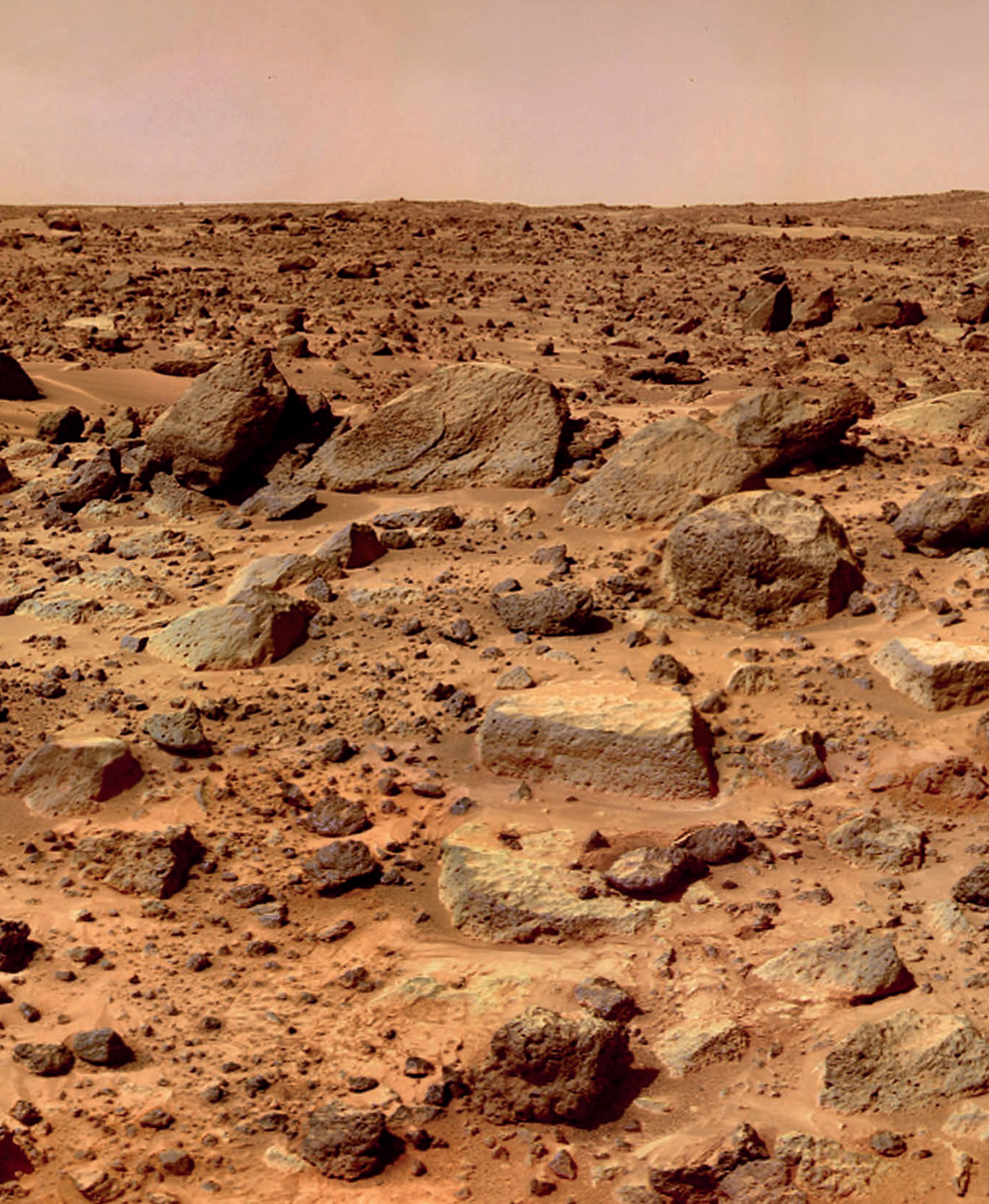
Uno de los recientes descubrimientos de mayor interés astrobiológico es la detección en la atmósfera marciana de metano, asociado al vapor de agua. El origen de este metano es, a día de hoy, desconocido. Puede ser tanto de origen biológico, como resultado de la actividad metabólica de microorganismos; como de origen geológico, como resultado de procesos de desgasificación volcánica o por la alteración de algunas rocas. Al margen de las dudas sobre su origen, se ha podido confirmar que la fuente tiene que ser reciente, ya que la radiación que incide sobre la atmósfera de Marte destruye el metano presente en tiempos relativamente cortos. Una posibilidad es que el metano se haya originado en épocas pasadas, pero se conserve atrapado en el subsuelo, en minerales denominados clatratos. Estos minerales son hielos de agua con cavidades en su interior donde puede haber gases confinados. Los cambios de presión y temperatura afectan a la estabilidad de estos minerales, que al destruirse liberan el metano.

Como conclusión, se puede decir que la exploración astrobiológica de Marte no ha hecho más que empezar. Las próximas décadas serán apasionantes y las misiones espaciales que se enviarán al planeta rojo en un futuro no muy lejano llevarán a bordo instrumentos especialmente preparados para la caracterización de las condiciones ambientales y la detección de vida. Y quién sabe si también preparan el camino para la llegada del primer ser humano a Marte. Z

El origen del metano es, a día de hoy, desconocido. Puede ser tanto de origen biológico, como resultado de la actividad metabólica de microorganismos; como de origen geológico, como resultado de procesos de desgasificación volcánica o por la alteración de algunas rocas.



Selfie del *rover Curiosity* de la NASA en el lugar denominado "Big Sky" en el cráter Gale, donde el taladro a bordo recolectó la quinta muestra recogida del Monte Sharp.

Crédito: NASA/JPL-Caltech/MSSS.

75
INTA