

Este artículo se publicó en el Anuario del Observatorio Astronómico de Madrid para el año 2021.

MARTE: UNA VENTANA AL PASADO

Tomás Alonso Albi

Observatorio Astronómico Nacional

Introducción

Hace 5 000 millones de años el Sol era una protoestrella en el seno de una nebulosa de gas y polvo, rodeada de un disco que contenía los embriones que darían lugar a los planetas del Sistema Solar. En la región interna del disco próxima a la fuente central la densidad y temperatura son más altas que en el exterior, por lo que existe un gradiente en las condiciones físicas y en la composición química dentro del disco, el cual depende de la evolución de la protoestrella a medida que se contrae. Durante la contracción de la protoestrella (anterior al inicio de las reacciones de fusión en el núcleo, ver [1]) su luminosidad disminuye y los granos de polvo del disco se rodean de materiales volátiles congelados (CO_2 , agua, y otros) que condensan a diferentes temperaturas (líneas de hielo) a medida que el disco se enfría. Este manto de hielo sirve de catalizador para el crecimiento por coagulación, permitiendo la formación de los planetas gigantes de gas lejos de la estrella. En el interior más caliente y denso los planetas internos crecieron más despacio y a partir de elementos más pesados, pues el viento estelar dispersó los elementos ligeros como el hidrógeno con más eficacia. La superficie visible de los planetas internos es sólida, y su interior se caracteriza por un núcleo metálico de hierro y un manto y superficie de silicatos. Por estas cualidades se denominan planetas terrestres.

A pesar de tener un origen común los planetas terrestres son sorprendentemente diferentes entre sí. En geología uno de los factores evolutivos más básicos es la pérdida de calor interno del planeta a través de la superficie. Como la superficie de una esfera (ritmo de pérdida de calor) es proporcional a r^2 y su volumen (cantidad de calor interno) a r^3 , esta

pérdida es proporcional a $1/r$. Así, los planetas más grandes como la Tierra conservan el calor por más tiempo, y los cuerpos más pequeños como la Luna o Marte ya no presentan un manto fluido que estimule un campo magnético o actividad tectónica. Esto se manifiesta hoy claramente en los rasgos superficiales: en algunos casos la información geológica acumulada sobrevive con claridad, en otros es alterada o eliminada por procesos como la erosión o el vulcanismo. En la Tierra las rocas más antiguas que 3800 millones de años han sido alteradas, por lo que la antigüedad del Sistema Solar se conoce por meteoritos como el de Allende (una condrita carbonácea hallada en Chihuahua en 1969, procedente del cinturón de asteroides), que se ha datado en 4560 millones de años. Esta datación absoluta es posible por los átomos radioactivos presentes en la estructura cristalina que se formó cuando la roca fundida se enfrió. Dado que una nueva cristalización no integra los posibles átomos radioactivos presentes previamente, es posible averiguar cuánto tiempo transcurrió desde la última vez que estuvo fundida, es decir, su edad geológica.

Otro factor importante es el llamado bombardeo intenso tardío, un proceso por el que los planetas sufrieron el impacto de miles de asteroides que no llegaron a formar planetas. Las muestras recogidas en distintos puntos de la Luna por las misiones Apollo han permitido estimar que esta fase se concentra principalmente en un periodo hace entre 4000 y 3800 millones de años. Una teoría extendida para explicar esta estrecha franja es una resonancia orbital entre Júpiter y Saturno en aquel periodo como resultado de un suave proceso de migración planetaria. Esto podría desestabilizar las órbitas de muchos asteroides y lanzarlos al interior del Sistema Solar. Por su localización es probable que Marte sufriera impactos de muchos cuerpos de cientos de kilómetros de diámetro, tanto o más que la Luna, lo que pudo influir en su formación. Tal vez por su menor masa, Marte no llegó a tener un satélite notable como la Tierra, lo que afecta a su climatología, pues la orientación de su eje de rotación y su propia órbita tienen un comportamiento caótico a largo plazo.

La excesiva imaginación de las primeras observaciones

Marte siempre ha estimulado la imaginación, no en vano su llamativo color rojo le valió el nombre del dios de la guerra. Al telescopio presenta casquetes polares, un día de 24.5 h similar al terrestre, y una inclinación de su eje de 25° actualmente (casi idéntico a los 23.4° de la Tierra), con la consiguiente sucesión de las estaciones, que allí son el doble de largas. Incluso su superficie es similar a la que ofrece la Tierra por encima del nivel del mar. El tamaño angular aparente de Marte apenas supera los $20''$ durante los acercamientos más favorables¹, por lo que los telescopios no

¹ Cuando la Tierra en su órbita alrededor del Sol alcanza la de Marte y éste, cuya órbita es notablemente excéntrica, se encuentra más cerca del Sol. Se llama oposición perihélica.

permiten distinguir detalles menores que unos 200 km.

En el siglo XVII los primeros observadores como C. Huygens y G. Cassini distinguieron los casquetes polares y una región oscura en el ecuador hoy llamada Syrtis Major, con la que Cassini calculó con gran exactitud el periodo de rotación de Marte. En el siglo XVIII W. Herschel observó con claridad ambos casquetes polares y la inclinación del eje del planeta, mientras que J. Schroeter describió las manchas variables que observaba como posibles nubes.

En el siglo XIX los primeros mapas completos publicados por los alemanes W. Beer y J. Maedler, y el escritor R. Proctor (utilizando dibujos del inglés W. Dawes), se limitaban a describir los detalles que creían ver asumiendo que se trataban de rasgos superficiales estables, pero pronto los franceses E. Trouvelot y C. Flammarion relacionaron las manchas cambiantes con vegetación y la presencia de agua. A esto contribuyó la línea de coloración verdosa que suele observarse en el límite de los casquetes polares, que se atribuyó a vegetación que crecía junto al hielo derretido. En este caso la turbulencia de la atmósfera terrestre se combina con el cerebro humano, que tiende a crear la ilusión de estructuras inexistentes en las imágenes borrosas, sobre todo si tenemos en cuenta la mala calidad de los primeros telescopios.

Esta mezcla de imaginación y aberraciones ópticas se exageró aún más durante el siglo XIX con observadores influyentes como G. Schiaparelli y P. Lowell. Sus mapas contenían cada vez más canales (líneas rectas interconectando diferentes zonas del planeta), hasta cientos de ellos en los últimos mapas, y las estructuras dibujadas tenían la particularidad de no coincidir apenas con los mapas de otros observadores, especialmente los más experimentados (aunque menos entusiastas) como W. De la Rue. La desafortunada traducción al inglés del término italiano *canali*, con la que originalmente Schiaparelli se refería a estructuras de origen natural, como ríos, extendió una fiebre con la que se popularizó la existencia de una civilización, los marcianos, que debía estar agonizando en un planeta desértico y por eso, según Lowell, construían canales para transportar el agua desde los polos al ecuador. Hasta se postuló que debía ser una civilización avanzada, socialista, y pacífica (en contraste con una época en que abundaban las guerras y a pesar de que Marte es el dios romano de la guerra). Esta imaginación culminaría con la Guerra de los Mundos de G. Wells, en la que los marcianos se rebelan por su mala fortuna y deciden conquistar la Tierra. A comienzos del siglo XX aún se hablaba de misteriosas luces y señales de radio procedentes del planeta. Aunque la idea perdió popularidad, astrónomos como E. Slipher siguieron sosteniendo la existencia de vida vegetal en Marte hasta mediados del siglo XX.

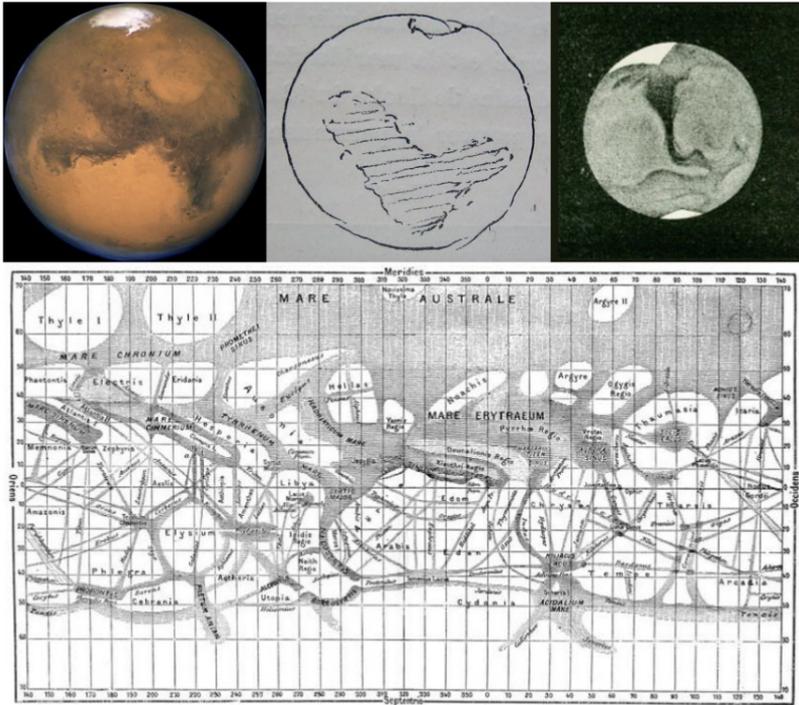


Figura 1: En la parte superior izquierda aparece una fotografía de Marte obtenida con el Telescopio Espacial Hubble en 2003. A su derecha un esquema de Huygens de 1672, seguido de un dibujo de De la Rue de 1856. Debajo y en grande, el mapa de Marte de Schiaparelli publicado en 1892 por Flammarion en la obra *El Planeta Marte*. Cortesía de NASA y la Universidad de California.

En los años siguientes algunas de las primeras imágenes detalladas parecían mostrar caras humanas, como la de Cydonia, otro efecto de la imaginación por el juego de luces y sombras bajo ciertos ángulos de iluminación. Sin embargo, la imagen actual de Marte nada tiene que ver con los marcianos. Un gran esfuerzo tecnológico y científico durante los últimos 50 años nos ha proporcionado una detallada cartografía que incluso hoy día supera a la que se tiene de la Tierra, especialmente en los fondos oceánicos. De todas las estructuras supuestamente observadas al telescopio perduran muy pocas: el valle Marineris (el único canal real), el cráter Schiaparelli de 400 km de diámetro, y la cuenca Hellas Planitia. Algunos observadores han llegado a distinguir los grandes volcanes de Marte sobre el borde o limbo del planeta, si bien estos detalles se ven por poco tiempo y están al límite incluso de los telescopios visuales más potentes.

La exploración espacial revela el auténtico Marte

Las oposiciones de Marte se suceden aproximadamente cada dos años, permitiendo comunicaciones más fluidas con las sondas espaciales. En 1965 la Agencia Espacial de los Estados Unidos (NASA) logró un puñado de imágenes a través de la cámara de la Mariner 4. Supusieron una gran decepción al mostrar Marte como un planeta estéril, repleto de cráteres de impacto como la Luna. Algunos eran tan grandes que resultaba obvio que la superficie era muy antigua, con una tenue atmósfera de CO₂ sin signo alguno de agua o una biosfera. La ausencia de campo magnético implicaba un interior frío y una superficie expuesta a radiación que destruye las moléculas orgánicas. Pero estas imágenes sólo mostraban el 1% de la superficie total. Las sondas Mariner 6 y 7 llegaron a Marte pocos días después del memorable alunizaje del Apollo 11 en 1969. Las nuevas y numerosas imágenes exploraban ya el 10% de la superficie y mostraron un Marte con evidentes diferencias en el grado de craterización de unas regiones y otras, pero en conjunto el mismo escenario. El interés por Marte se reanudó en la oposición perihélica de 1971. Mientras Rusia fracasaba con las misiones Mars 2 y 3, con las que sólo pudieron fotografiar un Marte envuelto en una gran tormenta de arena², el diseño más flexible de la Mariner 9 permitió una espera de varias semanas que fue decisiva para obtener miles de imágenes detalladas que mostraron por fin los grandes volcanes y el valle Marineris. La resolución de las nuevas imágenes obligó a establecer un conjunto de normas para la nomenclatura de los variados accidentes identificados, como cañones, valles, desiertos, o llanuras.

Tras el éxito de la Mariner 9 la NASA planeó una misión más ambiciosa, la Viking, para la oposición de 1975. En una primera fase dos orbitadores hicieron una cartografía muy mejorada y utilizaron sus espectrómetros infrarrojos para medir la inercia térmica de la superficie. Una alta inercia térmica indica terrenos donde predomina el polvo de pequeño tamaño, que debían por tanto ser menos rocosos y más seguros. Así se pretendía seleccionar las zonas de aterrizaje para los módulos de descenso presentes en cada orbitador, que a pesar de los avances técnicos pesaban 650 kg y eran frágiles. Las imágenes mostraron un relieve peligroso en las regiones seleccionadas, lo que obligó a improvisar nuevas zonas de aterrizaje: Chryse Planitia para la Viking 1, y Utopia Planitia para la Viking 2. Ambas aterrizaron suavemente en julio y septiembre de 1976. Tras un primer *selfie* para comprobar que las patas estaban bien asentadas, la Viking 1 envió otra imagen que mostraba a pocos metros una roca grande y llamativa, apodada *Big Joe* (Pepote). Posiblemente transportada hasta ahí por una corriente de agua, esta roca podría haber dado al traste con la misión.

²La posibilidad de una gran tormenta de arena durante el perihelio, cuando el gradiente de temperatura en la superficie aumenta y con ello los vientos, había sido advertida por algunos científicos, y se ha repetido en varias ocasiones, la última en 2018.

Las cámaras de las Viking transmitieron excelentes imágenes panorámicas de casi 360°. A nivel científico, los módulos incluían una estación meteorológica para estudiar la atmósfera (con sensores para la temperatura, el campo magnético, y un sismómetro que no llegó a funcionar bien) y un laboratorio biológico para estudiar las propiedades químicas del terreno y tratar de detectar signos de la presencia de vida. Se utilizó un espectrómetro de masas y otro de fluorescencia para hacer tres experimentos con los que determinar si la actividad biológica era capaz de producir moléculas orgánicas, si consumen alimento, y si alteran el aire. El primer experimento dio resultados demasiado positivos que luego no pudieron reproducirse, lo que fue explicado por la abundancia de óxidos de hierro en la superficie. El segundo dio también positivo al detectar metabolismo (liberación de CO_2 al humedecer el suelo con una sustancia rica en nutrientes), pero fue puesto en duda porque la emisión detectada de CO_2 cesó muy pronto. El tercero dio un claro negativo al no detectarse gases derivados de la actividad biológica, como metano. En 2018 se publicó un reanálisis al constatarse con el vehículo Phoenix que el resultado negativo del tercer experimento se debió a la presencia de sales de perclorato, que al calentarse destruyen las moléculas orgánicas, si bien la propia radiación UV que llega a la superficie de Marte también debería destruirlas. En todo caso la existencia de vida en Marte sigue siendo una pregunta abierta, si bien ésta sólo sería posible bajo la superficie. A pesar de que los ingenieros diseñaron la misión para 90 días los orbitadores funcionaron durante 2 y 4 años respectivamente, y el Viking 1 envió datos desde la superficie hasta finales de 1982, pues los módulos estaban preparados incluso para una comunicación directa con la Tierra. La misión Viking fue, junto con las sondas Voyager que estudiaron el Sistema Solar exterior, los proyectos más exitosos de la NASA en el siglo XX.

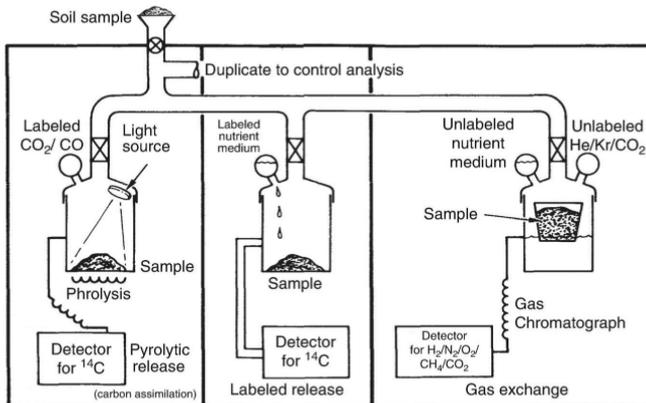


Figura 2: Dibujo de los experimentos de Viking. Cortesía de NASA.

Tras la misión Viking la tecnología no estaba lista para proyectos más ambiciosos y durante casi 20 años no se volvió al planeta rojo. Además, la vuelta resultó un fracaso, pues la Mars Observer, diseñada con tecnología de satélites de observación terrestre, se perdió en 1993 pocos días antes de entrar en órbita. Tres años después Rusia lanzó la Mars 96, la sonda más cargada de la historia de la exploración planetaria con casi 7 toneladas, que se perdió nada más despegar. Mientras los rusos abandonaron sus objetivos la NASA, envuelta también en otros fracasos como el desastre del transbordador Challenger, decidió apostar por misiones pequeñas de bajo coste pero innovadoras, en vez de enviar demasiado equipo científico en cada misión. La Mars Pathfinder se diseñó para ser decelerada por rozamiento con la atmósfera de Marte, y bajar a la superficie mediante un paracaídas, pequeños retrocohetes, y un conjunto de *airbags* de protección. Éstas y otras tecnologías redujeron el peso de combustible y abarataron su lanzamiento y su construcción, que costó apenas 200 millones de dólares. La nave era una pequeña base con un vehículo móvil, llamado Sojourner, que contaba con cámaras, una estación meteorológica, y un moderno espectrómetro. Comenzó a transmitir el 4 de julio de 1996 desde la desembocadura de Ares Vallis, en los primeros tiempos del desarrollo global de Internet. Esto unido a su aspecto de coche teledirigido hizo que en Estados Unidos se convirtiera en un éxito de masas. Entre sus hallazgos están las rocas de conglomerado y cantos rodados, claramente modificadas por la acción del agua durante un tiempo prolongado, y rocas parecidas a las andesitas terrestres (salvo por el exceso de óxidos de hierro en Marte), con más silicio y menos calcio que los basaltos, y relacionadas en la Tierra con el vulcanismo explosivo asociado a la tectónica de placas. Las medidas precisas de la rotación mostraron que el núcleo debía tener un tamaño porcentual en torno al 50% del radio de Marte, muy similar al terrestre.



Figura 3: Panorámica de la Mars Pathfinder. Cortesía de NASA.

También en 1996 partió la Mars Global Surveyor (MGS), abarataada por el empleo de los mismos instrumentos que la Mars Observer. Encontró campos magnéticos residuales en las regiones superficiales más antiguas, interpretados por la presencia de cámaras magmáticas con rocas magnetizadas. La alineación de estas anomalías demostró que Marte tuvo un campo magnético global en el pasado. Su espectrómetro impuso límites bajos a la abundancia de arcilla, carbonatos, y cuarzo, relacionados en la Tierra con la acción del agua, la sedimentación marina, y la erosión

fluvial. Pero los datos no fueron globales y el polvo de la superficie podía enmascarar la verdadera mineralogía. Sin embargo, la gran aportación fue el cartografiado topográfico completo con el altímetro MOLA, que permitió obtener el primer mapa tridimensional. Las nuevas imágenes mostraron estratificación en las paredes del valle Marineris como consecuencia de coladas volcánicas, las últimas de las cuales, al no presentar fracturas, debían ser más recientes de lo que se pensaba. Las detalladas imágenes con 10 m de resolución mostraron la omnipresencia a pequeña escala de dunas y otros efectos de la acción del viento que antes no se podían observar.

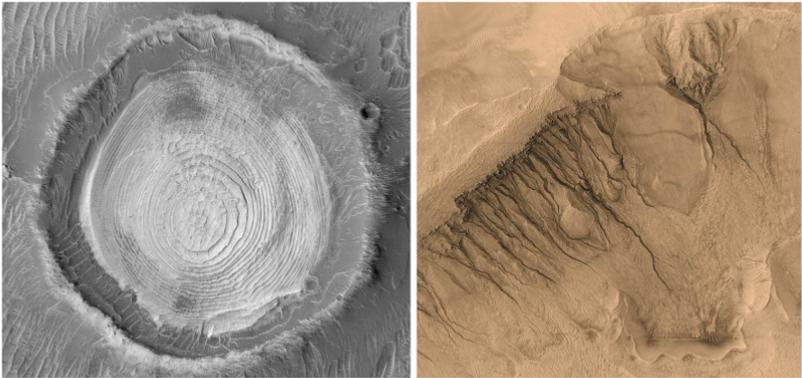


Figura 4: Izquierda: capas estratificadas en un cráter situado dentro del cráter Schiaparelli, formadas con ayuda del agua. Derecha: canales excavados por corrientes recientes de agua líquida en las paredes del cráter Newton. Ambas del MGS. Cortesía de NASA.

La Mars Odyssey es un orbitador equipado con una cámara infrarroja y un espectrómetro de rayos gamma. Llegó a Marte en 2002 para una misión de dos años, pero aún sigue activa (se espera que hasta 2025) y gracias a su órbita heliosíncrona (polar) ha sido decisiva para enviar la mayor parte de los datos de los *rovers* (vehículos exploradores) Spirit y Opportunity, que exploraron la superficie desde 2003, durante 7 y 15 años respectivamente. La Odyssey detectó la hidratación de los minerales en amplias regiones de Tharsis y Medusa Fossae, cercanas al ecuador, lo que se interpretó por la presencia de gran cantidad de hielo mezclado con la tierra, lo que conocemos como permafrost, enterrado a un metro de la superficie.

La siguiente misión de enorme éxito es la Mars Express de la Agencia Espacial Europea (ESA), que comenzó sus operaciones en 2005 utilizando unos instrumentos similares a los que se perdieron con la Mars 96 rusa. A diferencia de ésta pesaba poco más de una tonelada, de la que casi la mitad era combustible. Aunque su módulo de descenso Beagle se perdió,

el orbitador contaba con cámaras estereoscópicas de alta resolución, varios espectrómetros para trabajar a longitudes de onda entre el ultravioleta y el infrarrojo, y un sensor de partículas cargadas. Aún sigue trabajando, tras más de 16 años y 20 000 órbitas alrededor de Marte, y tiene combustible hasta 2025. Tuvo una actualización crítica en 2018 cuando sus giroscopios estaban a punto de fallar y su funcionalidad fue reemplazada por unas cámaras usadas para detectar estrellas, lo que obligó a reescribir todo el sistema de control. A nivel científico logró descubrir agua líquida bajo el subsuelo del polo sur ([2]) y trazas de metano en la atmósfera, si bien los primeros signos de metano los detectó la NASA desde la Tierra en 2003. También descartó que la pérdida de iones desde la atmósfera, resultado de la misión rusa Phobos 2, sea suficiente como para explicar la pérdida de agua, por lo que ésta debe seguir bajo el subsuelo, y sus imágenes detalladas de Phobos sugieren que debió formarse con los residuos de un impacto primigenio y no como asteroide capturado. Su cartografía tridimensional de Marte cubre el 90% con resoluciones de entre 10 y 20 m, y ha sido utilizada para seleccionar regiones de interés en misiones posteriores.

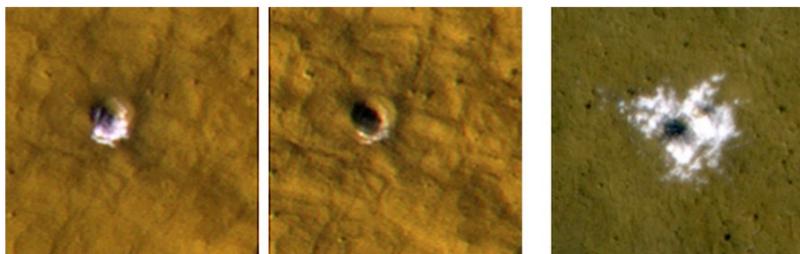


Figura 5: Izquierda y centro: evaporación progresiva del hielo superficial expuesto por un impacto reciente que formó un cráter de 6 m. Derecha: impacto muy reciente que ha dejado expuesto hielo alrededor. Ambas obtenidas con HiRISE. Cortesía de NASA.

En 2006 la Mars Reconnaissance Orbiter encontró las primeras huellas claras de carbonatos en amplias regiones de Marte, e incluso de depósitos de cloruros, resultado de la evaporación de charcos o lagos de poca profundidad. Sus cámaras mostraron la exposición y evaporación progresiva de hielo de agua sobre pequeños cráteres consecuencia de nuevos impactos en latitudes medias del hemisferio norte. Sus resultados sugieren la presencia de enormes reservas de agua congelada, y glaciares, en amplias extensiones de latitudes medias y altas del norte y sur, justo debajo de la capa de polvo de la superficie. Su cámara HiRISE, la mayor enviada a un planeta con 0.5 m de diámetro, es capaz de alcanzar resoluciones de 30 cm con imágenes de 20 megapíxeles. Esto ha permitido a la sonda descubrir los primeros flujos de agua líquida salada en vivo en

los bordes escarpados del cráter Newton y valle Marineris, fenómenos que se repiten cíclicamente durante el verano. También ha seguido desde arriba las huellas de los rovers presentes en la superficie, apoyando al Curiosity en el envío de sus datos a alta velocidad.

En 2008 la sonda americana Phoenix aterrizó en el polo norte de Marte con resultados impresionantes. Su brazo mecánico desenterró hielo justo bajo el suelo, que al poco tiempo se evaporó, y su estación meteorológica detectó nieve evaporándose a 4 000 m de altura. Se detectó carbonato de calcio (caliza) en las muestras. Algunas imágenes sugieren incluso que las patas de Phoenix se vieron salpicadas de agua al posarse sobre la superficie. La misión acabó a finales de 2008 con el avance del invierno.

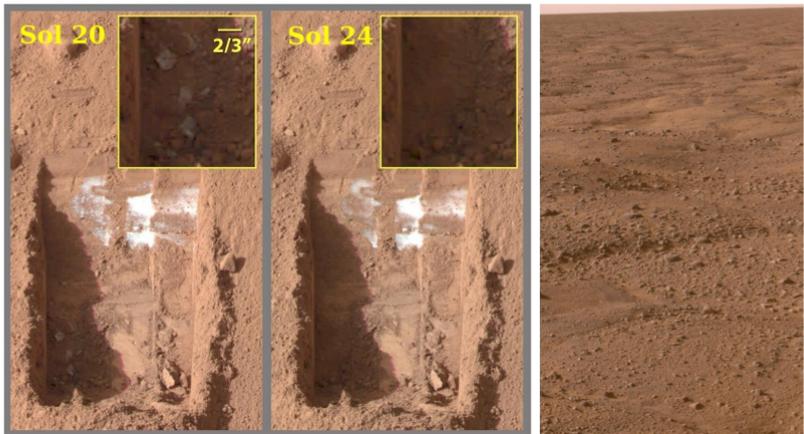


Figura 6: Izquierda: evaporación de hielo excavado por la sonda Phoenix en el polo norte de Marte durante 4 soles o días en Marte. Derecha: panorámica de Phoenix mostrando estructuras poligonales por la presencia de hielo en el subsuelo. Cortesía de NASA.

El rover Curiosity aterrizó en 2012 en el cráter Gale, muy cerca del ecuador. Integra múltiples cámaras para obtener imágenes estereoscópicas, microscópicas, y video en tiempo real, una estación meteorológica diseñada por ingenieros del Centro de Astrobiología, un instrumento para medir la radiación que llega a la superficie, y múltiples espectrómetros para estudiar la composición mineralógica de las rocas desde varios metros de distancia. Cuenta con un generador nuclear que le permitirá seguir activo durante otros 6 años. Junto con los otros rovers ha permitido clasificar las rocas de Marte en diferentes categorías según el grado de modificación que han sufrido por el agua, la cual tiende a horadar el basalto y depositar minerales y sales disueltas. También ha constatado que el polvo marciano es magnético por la presencia de magnetita. En 2014 el Curiosity detectó

un incremento repentino en la concentración de metano sobre el cráter Gale durante el verano marciano, medida que fue confirmada de manera independiente por la Mars Express. Es posible que la liberación parta de un conjunto de fallas posiblemente activas en Medusa Fossae, región situada 500 km al este. El movimiento liberaría el metano almacenado en el subsuelo bajo el hielo fracturado. Desde 2018 la ESA estudia la atmósfera con el Trace Gas Orbiter, en particular los isotopólogos del metano, para discernir sobre un origen geológico o biológico, pero a pesar de la alta sensibilidad aún no se ha detectado ([3]). Como el metano es químicamente estable durante siglos en Marte algún proceso debe eliminarlo antes de dispersarse en la atmósfera.

La misión MAVEN estudió la atmósfera de Marte desde el último máximo de actividad solar, en 2014. Su principal hallazgo es que Marte pierde poco a poco su atmósfera a un ritmo que se intensifica tanto en los máximos de actividad solar como en el perihelio. La pérdida del campo magnético cuando el interior de Marte se enfrió debió suponer el inicio de esa pérdida progresiva de atmósfera, si bien el intenso bombardeo tardío fue probablemente el responsable principal de que Marte perdiera la mayor parte de su atmósfera. A pesar de la ausencia de campo magnético global MAVEN ha observado algunos eventos de auroras. Desde 2019 asiste a otras misiones enviando sus datos a la Tierra.

La NASA continúa explorando la superficie de Marte. A finales de 2018 la misión InSight aterrizó cerca del ecuador, en Elysium Planitia, para una misión de al menos dos años en la que medirá los seismos, la nutación del eje, y el ritmo de pérdida de calor de la superficie. También cuenta con una estación meteorológica con participación de ingenieros españoles. Con esta misión se logrará entender con detalle cómo es la estructura interna de Marte. InSight ya ha detectado cientos de pequeños seismos, causados por la actividad interna y por la caída de meteoritos. La próxima misión es el rover Perseverance, una evolución del Curiosity que llegará en febrero de 2021 al cráter Jezero, un antiguo lago situado en Syrtis Major. Se encargará de analizar en detalle los minerales, buscar moléculas orgánicas, y estudiar el subsuelo con un georadar. También incluye una estación meteorológica de diseño español. Su generador nuclear le permitirá trabajar eficazmente de noche y durante el invierno. Incluye tecnologías experimentales como producir oxígeno (como combustible y también como soporte de una futura misión tripulada) o el helicóptero Ingenuity, que realizará vuelos autónomos alrededor del Perseverance y le ayudará a elegir el camino más seguro. A esta misión se le unirá por las mismas fechas la misión china Tianwen-1, que incluye un orbitador para mapear la superficie y un rover de exploración con un moderno georadar. Con estas misiones el número de artefactos operativos orbitando o explorando la superficie del planeta rojo pronto superará la decena. Si no hay más retrasos la ESA enviará su primer rover en la oposición de 2022.

Huellas superficiales del pasado

Marte presenta en buena parte del hemisferio norte una región lisa y desértica casi desprovista de accidentes, denominada Vastitas Borealis. Esta región se encuentra unos 4 km por debajo del nivel medio de elevación del planeta, y sus límites presentan abundantes evidencias de flujos de lava debidos a un intenso vulcanismo, erosión fluvial y la presencia de un extenso mar que pudo alcanzar cientos de metros de profundidad. Su origen es incierto, pudo deberse a un gran impacto primigenio, pero sus bordes son posiblemente demasiado irregulares para ello. Por el contrario, las tierras altas del hemisferio sur y parte del norte muestran numerosos cráteres de impacto de gran tamaño. Esta diferencia tan evidente se denomina dicotomía y muestra que Marte tuvo una intensa actividad volcánica que se extendió más allá de la época de gran bombardeo de asteroides.

La morfología de los cráteres de impacto muestra diferencias significativas con la latitud. Los cráteres presentes cerca del ecuador están en general bien preservados, sus bordes son definidos y están acompañados de otros cráteres pequeños. En cambio, los cráteres localizados por encima de los 30° de latitud muestran bordes redondeados, vagamente definidos, y los cráteres pequeños de alrededor casi desaparecen. Esta diferencia se achaca a la abundancia de hielo lejos del ecuador, que con el tiempo puede erosionar los bordes de los cráteres y cubrir muchos de ellos completamente, generando a menudo pequeños canales o depósitos de sedimentos.

Muchos cráteres presentes en planicies generadas por flujos de lava presentan bordes en diferentes capas superpuestas, como si el material eyectado tras la colisión hubiese fluido por la superficie mezclado con la lava. En la región de Syrtis Major los cráteres más grandes están rellenos de lava, los medianos tienen esta aureola que recuerda a un huevo frito, mientras que los pequeños presentan llamativas colas de viento parecidas a las observadas en desiertos terrestres, cuando el viento tiene una dirección preferente y el polvo se acumula en las regiones protegidas. Esto muestra que el viento juega un papel relevante en los accidentes de menor tamaño.

En otros casos como los cráteres de Arabia Terra, al oeste de Syrtis y más cerca de la región de la dicotomía con evidencias de erosión fluvial, la eyecta aparece con bordes irregulares. Se denominan cráteres en pedestal y en ellos el material eyectado, que se encuentra elevado cientos de metros en relación al nivel circundante, ha protegido la superficie de la erosión mientras que el resto ha perdido altura como consecuencia tanto de la erosión como de la posible fusión del hielo del subsuelo. Los cráteres con pedestal son más abundantes cerca de los polos. En las zonas bajas del hemisferio norte muchos de los cráteres menores han sido alterados por el viento y el hielo, y otros situados en el borde de la dicotomía parecen haber sido rellenos de sedimentos arrastrados por fuertes inundaciones desde

los canales que desembocan en la región de Chryse Planitia.

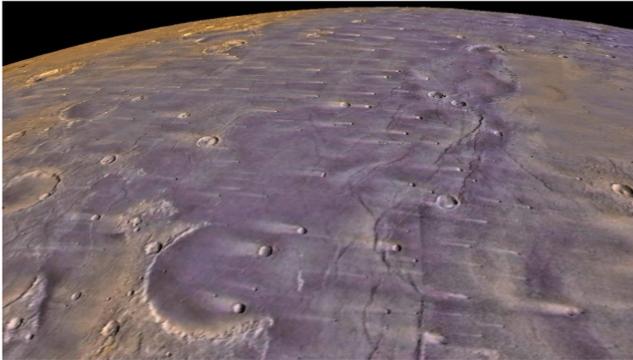


Figura 8: Colas de viento en Syrtis Major, una de las pocas características identificables al telescopio. La región, elevada 2 km respecto al terreno rojizo circundante, debe su color oscuro a las rocas basálticas renovadas por la erosión del viento, que compensa la oxidación. Los cráteres aquí son pequeños y muchos muestran una aureola. Syrtis Major fue una zona de intenso vulcanismo hace 3000 millones de años. Imagen generada con datos de Viking y MGS.

Marte presenta dos grandes regiones volcánicas: Tharsis, cerca del ecuador, y Elysium, situada 100° al oeste y a 25° de latitud norte. La región de Tharsis es un enorme engrosamiento de la corteza que alcanza en algunas zonas los 10 km de altura sobre el nivel de referencia del geoide de Marte. Las estructuras visibles en la superficie son consistentes con él, lo que sugiere que el engrosamiento fue una de las primeras estructuras que se formaron. Contiene los volcanes más grandes, incluyendo el Olympus Mons con unos 600 km de extensión y 24 km de altura³. La menor gravedad de Marte permite que existan volcanes tan colosales, pero también es cierto que el flujo de magma desde el interior de Marte tuvo picos de actividad muy superiores a los que haya registrado la Tierra, y la ausencia de tectónica de placas en Marte hizo que los volcanes crecieran mientras se mantuvo el suministro de magma desde el interior. En la Tierra la actividad volcánica asociada al movimiento de las placas da lugar a múltiples volcanes de menor tamaño (islas), aunque también hay plumas que dan lugar a volcanes de mayor tamaño.

³El Monte Olimpo es el volcán más alto del Sistema Solar. Se trata de un volcán en escudo generado por la acumulación de lavas muy fluidas con baja pendiente, y presenta varias calderas en su cima. Es similar al Mauna Loa de Hawaai, pero bastante más grande.

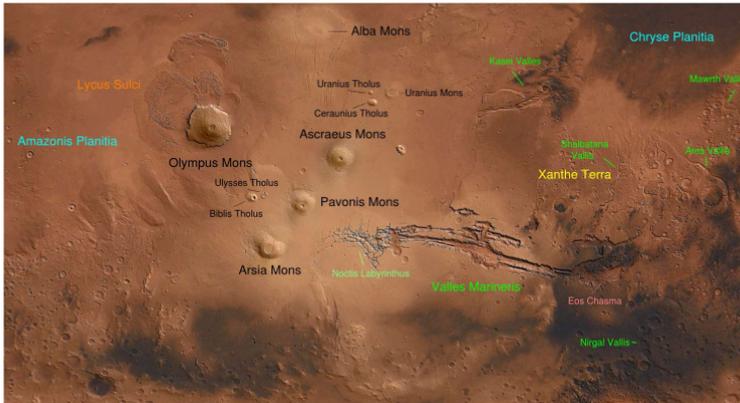


Figura 9: Principales formaciones en la región volcánica de Tharsis y el valle Marineris. Los tres volcanes de Tharsis se alinean hacia el NE terminando en el volcán Ceraunius Tholus, menor pero con un perfil más inclinado. El volcán más alto, Olympus Mons, se alinea al NE con el más grande y de menor relieve, Alba Mons. Los bordes del Olympus Mons muestran desprendimientos, signos de posibles glaciares y enormes coladas de lava de diferentes edades que se extienden por Lycus Sulci. Al noreste del valle Marineris se observan otros valles menores que desembocan en Chryse. Cortesía de NASA.

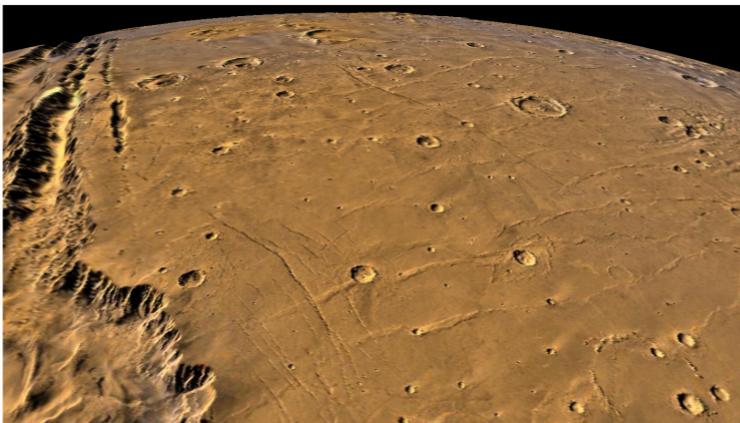


Figura 10: Detalle de algunas de las fracturas radiales y paralelas al sur del valle Marineris formadas durante la elevación del domo de Tharsis. Imagen generada con datos de Viking y MGS.

En la Tierra la mayoría del magma primitivo no llega a ser expulsado por los volcanes, y queda atrapado en las cámaras magmáticas donde cristaliza repetidamente y se mezcla con los silicatos, dando lugar a una variedad de minerales con cristales grandes. En este proceso el gas queda atrapado a alta presión en estas rocas profundas. Se denominan rocas plutónicas o intrusivas, en contraposición con las rocas volcánicas o extrusivas, que también son ígneas pero solidifican en la superficie. Cuando se produce una erupción desde estas cámaras la composición del magma es mucho más evolucionada, presentando menos hierro y más silicio, y el resultado es una erupción violenta en la que se libera una gran cantidad de gases y ceniza volcánica, como la erupción del monte Vesubio, que en el año 79 destruyó Pompeya. La menor gravedad de Marte hace posible que las cámaras magmáticas se encuentren a mayor profundidad y sean mucho mayores que las presentes en la Tierra. En 2015 el rover Curiosity detectó la presencia del mineral tridimita en una muestra situada sobre el cráter Gale ([4]). La tridimita es básicamente sílice (SiO_2), como el cuarzo, pero con una cristalización diferente porque se forma a mayor temperatura y menor presión. Está más evolucionada aún que la andesita hallada por el Sojourner, y sugiere que el vulcanismo en Marte pudo ser más explosivo de lo pensado, liberando grandes cantidades de ceniza. De hecho, el fondo de algunos cráteres (como el *White Rock* del cráter Pollack) muestra material muy reflectante que ha sido interpretado como ceniza volcánica compactada y erosionada por el viento, lo que sugiere que la superficie podría presentar capas de ceniza que ayudarían a datar este tipo de vulcanismo. Se han hallado capas parecidas en las paredes de cráteres situados tanto en Elysium como en Tharsis, a veces mezclados con agua.

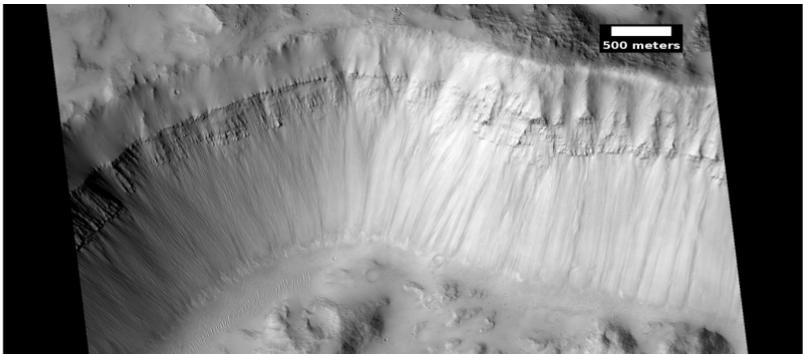


Figura 11: Capas de ceniza en un pequeño cráter situado cerca de Hecates Tholus, en la región Elysium Planitia. El volcán es hoy un glaciar debido a la disminución de la oblicuidad del eje de Marte en los últimos 20 millones de años. El último vulcanismo en Elysium se data entre 100 y 300 millones de años atrás. Cortesía de NASA.

El valle Marineris es un enorme cañón de 4000 km de longitud. Aunque visualmente recuerda al cañón del Colorado (que es 30 veces más pequeño), su origen no es la erosión fluvial, sino que es el resultado del hundimiento del terreno por una enorme falla normal. Existen análogos terrestres como el valle del Rift en África o el mar Rojo. Su parte oeste colinda con Tharsis y se encuentra en lo más alto del abombamiento de la corteza. Se caracteriza por una intrincada red de canales relativamente estrechos (Noctis Labyrinthus) y rectilíneos, formados por fallas cruzadas con bordes muy abruptos. Hacia el este el valle se ensancha en la región de Candor Chasma, cuyas paredes tienen casi 10 km de altura y presentan los primeros signos de erosión y depósitos de sedimentos en algunas zonas del fondo. La presencia de lagos parece intermitente por la caída de agua desde las paredes del valle. Al este la elevación disminuye y el canal desemboca en una región de aspecto muy irregular llamada Eos Chasma, en la que el terreno colapsó y fue barrido por una gran masa de agua. Esta avalancha ocurrió o bien por la fusión del hielo del subsuelo ante la presión del terreno situado por encima, o más probablemente por un aumento de temperatura y presión atmosférica. Esta liberación de agua provocó inundaciones catastróficas en la superficie de Marte, con caudales muy superiores a cualquier otro evento conocido en la Tierra, que en muy poco tiempo formaron múltiples canales que se extienden hacia el norte hasta desembocar en Chryse Planitia. En la desembocadura de Ares Vallis la erosión del agua ha moldeado numerosas islas.

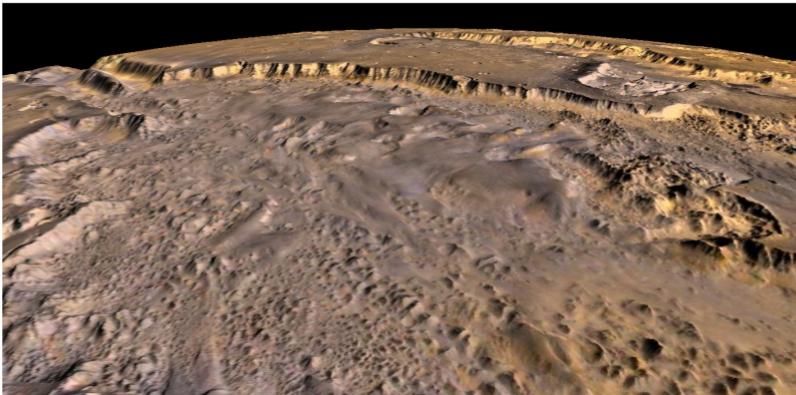


Figura 12: La parte sur del ensanchamiento de la desembocadura del valle Marineris (visible en la parte superior izquierda) muestra un terreno colapsado (Eos Chasma) por la liberación de enormes cantidades de agua que se encontraba congelada en el subsuelo. La inundación arrastró todo a su paso llegando hasta Ares Vallis. Imagen generada a partir de datos de Viking y MGS.

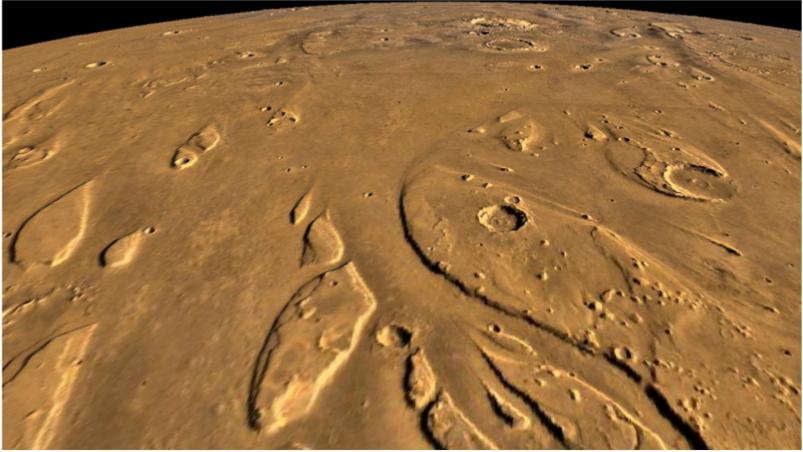


Figura 13: Islas moldeadas por el agua en la región de Ares Vallis. El flujo procedente del valle Marineris desemboca en la planicie de Chryse visible en la parte superior. Los cráteres anteriores fueron sepultados. Imagen generada a partir de datos de Viking y MGS.

La datación por el número y tamaño de los cráteres en estas islas sugiere que hubo episodios de inundaciones intermitentes a lo largo de bastante tiempo, y el cambio abrupto del terreno entre las regiones mencionadas de Eos Chasma y Ares Vallis sugiere que el agua no tuvo tiempo de suavizar el terreno, otra evidencia de que el flujo no fue continuo. Esta conclusión también se sustenta en los pocos afluentes que presentan otros canales que desembocan en Chryse. El agua crea lagos en los cráteres, y cuando desborda se generan canales que en ocasiones conectan unos cráteres o lagos con otros situados a menor altura. Es probable que estos canales se generasen por episodios de vulcanismo en la región de Tharsis, que podrían incrementar temporalmente la presión en la atmósfera y la temperatura. En el hemisferio sur también hay pequeños canales originados por socavamiento, como ríos subterráneos, al fundirse el hielo del subsuelo.

Los deltas en las desembocaduras de ríos requieren de un suministro de agua más estable. Se han identificado deltas en el cráter Jezero (destino del rover Perseverance) y el Eberswalde. En el hemisferio sur hay otras huellas de la presencia de agua estable. Se trata de canales muy estrechos que se extienden y ensanchan hacia zonas más bajas con algunos afluentes, como en Nirgal Vallis. Estas estructuras requieren de un clima más cálido y una atmósfera más densa que la actual. Sin embargo, el número y extensión de estos ríos y la presencia de impactos pequeños en algunos de ellos sugiere que este clima más cálido no perduró. La presencia de agua es localizada y no ha logrado suavizar el relieve del terreno como en la Tierra.

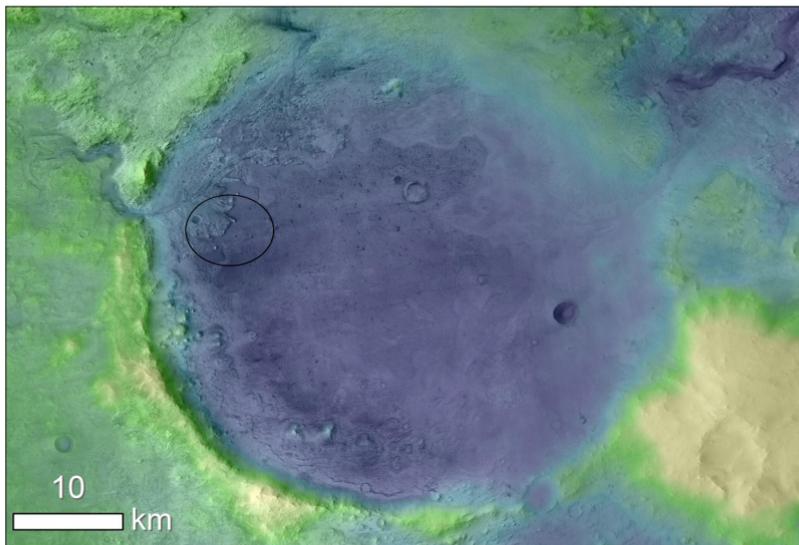


Figura 14: Cráter Jezero (los colores representan elevación). La elipse de la izquierda muestra la zona de aterrizaje del Perseverance, en el delta que forma un canal que desemboca en él. Cortesía de ESA.

Los casquetes polares de Marte contienen la mayor parte del agua visible actualmente sobre la superficie. Presentan diferencias entre sí como resultado de que el casquete norte se encuentra sobre una planicie y el sur sobre terrenos elevados y craterizados. Además, el verano en el hemisferio norte coincide con el afelio, lo que confiere al casquete polar norte temperaturas más suaves que las del casquete sur. Como el CO_2 se congela por debajo de -125°C y estas temperaturas no suelen alcanzarse en el casquete norte, su composición es principalmente hielo de agua, mientras que el casquete sur se compone principalmente de CO_2 congelado que durante el verano austral desaparece casi por completo. La liberación del CO_2 puede subir un 20% la presión atmosférica y provocar tormentas de arena que depositan finas capas de polvo periódicamente. Este polvo se mezcla con el hielo y contribuye a rejuvenecerlo en términos geológicos. El casquete sur no se encuentra centrado en el polo sur, sino desplazado como consecuencia de los cráteres y los efectos locales de la cuenca Hellas Planitia. En lugares protegidos de la radiación se han encontrado grandes depósitos de CO_2 congelado cuya sublimación (al aumentar la oblicuidad del eje de Marte) duplicaría la presión atmosférica, permitiendo la existencia de agua líquida en parte de la superficie. Muy recientemente se ha encontrado que este agua líquida existe en múltiples lagos subterráneos donde la presión es mayor ([2]). En el casquete norte, la distribución del

hielo presenta una estructura espiral condicionada por la combinación de vientos radiales con la rotación del planeta. Esta estructura está cortada por un cañón de 100 km de longitud y 2 km de profundidad llamado Chasma Boreale, que presenta grandes campos de dunas y capas de sedimentos de polvo mezclados con el hielo con información valiosa del clima de Marte en el pasado, como los anillos de los troncos de los árboles.

Las simulaciones numéricas muestran que la excentricidad de la órbita de Marte varía entre 0.02 y 0.10 (órbita casi circular hasta bastante excéntrica, como la actual) con un periodo de 2.5 millones de años, y la oblicuidad entre 15° y 35° . Pero hasta hace 5 millones de años la oblicuidad fue mayor, entre 30° y 45° ([5]). Esta disminución de la oblicuidad implicaría que el hielo del polo norte marciano es muy reciente. Es posible que Marte haya tenido buena parte de su hemisferio norte cubierto de hielo en etapas de baja excentricidad y oblicuidad, y otras con inclinaciones más elevadas y el hielo permanentemente bajo la superficie (salvo que la presión atmosférica aumente lo suficiente). En un pasado remoto hay evidencias claras de que los casquetes fueron mucho mayores, especialmente el casquete sur, rodeado de una región llamada Dorsa Argentea que presenta crestas llamadas *eskers*, formadas por antiguos ríos que circulaban bajo un glaciar flanqueados por morrenas que erosionaron el terreno. También hay huellas de pateras, que son volcanes en escudo sepultados de los que sólo se observa la caldera.

En el casquete norte las medidas de abundancia de HDO frente a H_2O en 2015 ([6]) mostraron una relación D/H (deuterio frente a hidrógeno) ocho veces mayor a la terrestre, lo que indica que Marte puede haber perdido una masa de agua cinco veces mayor a la contenida en su polo norte. Este agua sería suficiente para mantener un mar de casi 1 km de profundidad en el tercio norte. Aún así, sigue habiendo una gran reserva de agua en Marte.



Figura 15: Izquierda: casquete polar norte, cortado en su parte inferior por el cañón Chasma Boreale. Derecha: cráter Korolev, de 80 km, cerca del polo norte. La profundidad del hielo de agua en el casquete y el cráter es de 2 km. Cortesía de NASA y ESA.

Las tormentas de arena globales se inician alrededor del punto que recibe más intensamente la luz del Sol. Preferentemente se dan cerca del perihelio y en latitudes medias del hemisferio sur, pues la mayor presión atmosférica debida a la evaporación del casquete sur hace que los vientos ganen capacidad de transporte. Las medidas de temperatura indican que durante las tormentas de arena la variación térmica entre el día y la noche se reduce drásticamente desde los 60° hasta los 5°, de manera que estas tormentas contribuyen a calentar la superficie del planeta. El polvo tiene tamaños del orden de una micra y se concentra en torno a 30 km de altura durante las tormentas, que pueden durar meses y cubrir buena parte del planeta. Dado lo tenue de la atmósfera, su capacidad de retener calor es baja, y la superficie irradiada por el Sol tiene una temperatura unos 20° mayor que el aire. Esto, unido a las fuertes variaciones de temperatura entre el día y la noche, estimula la formación de pequeños tornados locales, preferentemente durante el verano en latitudes medias y altas de ambos hemisferios. Las tormentas de arena son, por tanto, eventos estacionales y pueden ser tanto globales como locales, pero están sujetas a posibles variaciones en la orientación del eje de Marte. En los tiempos actuales el hemisferio sur proporciona polvo al hemisferio norte, contribuyendo a las dunas y depósitos observados en el polo norte, pero la precesión del eje de Marte hace que este ciclo se invierta cada 25 000 años.

La composición de la atmósfera de Marte no es muy distinta de la de Venus, con un 95.3% de CO₂, 2.6% de nitrógeno, 1.9% de argón, y concentraciones mucho menores y altamente variables de oxígeno, CO, y vapor de agua. La presión atmosférica es unas 120 veces menor a la terrestre y la temperatura media en torno a -50° C. La composición isotópica es similar a la terrestre salvo por el nitrógeno y el argón, que presentan una sobreabundancia de un factor 2 respecto de la Tierra de los isótopos pesados ¹⁵N y ³⁸Ar. La interpretación es que los gases más ligeros se escapan con más eficacia de la atmósfera, si bien la sobreabundancia de isótopos pesados no se ha observado en el hidrógeno u oxígeno. La radiación ultravioleta puede disociar el CO₂ en CO y O atómico, y el vapor de agua en H y OH. El OH sirve de catalizador para la recombinación del CO y O en CO₂, de manera que el CO₂ se mantiene estable como la molécula predominante. Además, la disociación del vapor de agua da lugar a reacciones que contribuyen a destruir el ozono, cuya existencia se limita a finas capas a varias decenas de kilómetros de altura sobre las regiones ecuatoriales más secas. El hidrógeno y oxígeno molecular pueden reaccionar para generar peróxido de hidrógeno (o agua oxigenada, H₂O₂), que oxida los minerales de hierro y silicatos de las rocas y confiere a Marte su color rojizo. La baja presión atmosférica hace que el agua líquida y el hielo no sean estables sobre la superficie, pasan a fase gaseosa rápidamente. Pero las bajas temperaturas facilitan que la alta atmósfera pueda saturarse de vapor de agua, aunque exista muy poco, y producir nieblas o nubes. A

gran altura cerca del ecuador se observan nubes similares a los cúmulos, formadas por dióxido de carbono congelado, y también en la cima de los grandes volcanes, formadas tanto por CO₂ como por vapor de agua cuando el aire caliente en ascenso se satura de humedad. En alturas bajas como el fondo del valle Marineris se observan nieblas de cristales de agua congelada, especialmente al amanecer, como resultado de la evaporación de la escarcha depositada por la noche. En el polo norte suele instalarse una tormenta ciclónica durante el verano que cubre todo el casquete polar. Los vientos medidos son suaves, entre 10 y 20 km/h, con ráfagas que no superan los 70 km/h incluso durante las tormentas. Dependiendo de la altura y polvo en suspensión el color de la atmósfera varía entre el violeta y el naranja.

Evolución geológica

Para datar la superficie de los planetas se utiliza un principio muy sencillo llamado superposición, formulado por Nicolás Steno en el siglo XVII para estudiar la edad relativa de los sedimentos y fósiles al observar su estratificación. Si observamos un cráter relleno de un flujo de lava y con otros cráteres menores superpuestos podemos fácilmente deducir la secuencia en que se sucedieron estos eventos. Si una región de un planeta presenta cráteres de gran tamaño es probable que sea más antigua que otra en que los cráteres son menores o escasos. Esto se debe a que los impactos mayores borran las huellas de los anteriores y estadísticamente los cuerpos de pequeño tamaño son mucho más numerosos que los grandes⁴, por lo que sus impactos se extienden en el tiempo mucho más que los más catastróficos que tuvieron lugar al principio de la época de gran bombardeo.

Para estudiar la edad de las rocas en la superficie de Marte se ha utilizado como referencia el grado de craterización de la Luna y la datación de las muestras recogidas por el programa Apollo, pero la información es insuficiente. Se han identificado meteoritos de origen marciano, pero no es posible saber de qué parte de la superficie proceden exactamente. Por estos motivos las mediciones de densidad de cráteres en función de su tamaño no permiten una datación absoluta, sólo relativa. Otro problema es el activo vulcanismo que ha tenido Marte en el pasado remoto, pues borra la historia geológica y no permite saber qué ocurrió antes. En el hemisferio sur la densidad de cráteres pequeños es alta, pero la densidad de cuencas de impacto (impactos mayores que produjeron cráteres entre los 150 km y los 2 000 km de Hellas Planitia) es notablemente menor que en la Luna. Tal vez el número de grandes impactos sea menor en Marte a pesar de encontrarse junto al cinturón de asteroides, o quizás toda esta parte del planeta haya experimentado una etapa de vulcanismo tras la primera fase de bombardeo, seguida de un bombardeo intenso de cuerpos menores.

⁴La curva sigue una ley potencial con el cociente del tamaño elevado a 2.5. Por ejemplo, hay 300 veces más asteroides en número con un tamaño de 10 km que de 100 km.

Con estas limitaciones se han establecido los siguientes periodos evolutivos en Marte según el modelo de Hartmann y Neukum ([7]):

Noachian (4-3.7 mil millones de años atrás): formación de las grandes cuencas de impacto, como Hellas, Argyre, e Isidis. Uno de estos impactos pudo formar la dicotomía. El bombardeo intenso dispersó la mayoría de la atmósfera al final de este periodo. Noachis Terra, situada al sur entre las cuencas de Hellas y Argyre, es una región representativa.

Herperian (3.7-3 mil millones de años): formación del volcán Olympus Mons y el domo de Tharsis, con un activo vulcanismo que devolvió periódica y transitoriamente una atmósfera densa. El final del bombardeo llenó de cráteres menores las extensas llanuras volcánicas. El engrosamiento de Tharsis también generó las fracturas radiales o fosas tectónicas sobre el ecuador a ambos lados de Tharsis, lo que en la zona este dio lugar al valle Marineris. También pudo contribuir a los cambios de orientación del eje, que junto con los episodios de mayor temperatura contribuyeron a establecer reservas de agua congelada y carbonatos en unas zonas y a liberar estas reservas en otras, excavando los canales que desembocan en distintas zonas bajas del norte. También se generaron canales en el hemisferio sur. Herperian Planitia, situada al noreste de Hellas, es una región representativa.

Amazonian (hasta el presente): nuevo ciclo de actividad volcánica intensa, inicialmente en el domo de Elysium, y a continuación en Tharsis, con la formación de los volcanes gigantes. Probable fusión masiva del permafrost hace unos 2 000 millones de años, con la formación de grandes canales desde las regiones altas que desembocaban en un extenso mar en las zonas bajas del tercio norte. Esto cubrió de sedimentos los cráteres antiguos en la región norte, y a partir de ahí sólo hubo pequeños impactos. En los últimos mil millones de años la actividad volcánica fue residual en Tharsis, de hecho las calderas del Olympus Mons han mantenido actividad hasta hace poco más de 100 millones de años, por lo que es el volcán más longevo que se conoce. La bajada de temperatura congeló el agua y parte de la atmósfera, se formaron los casquetes polares y tuvieron lugar los fenómenos relacionados con los glaciares y la erosión de los cráteres por el hielo. Los niveles de erosión se situaron órdenes de magnitud por debajo de los terrestres. Amazonis Planitia es una región representativa.

Tras las investigaciones realizadas con el espectrómetro infrarrojo de la Mars Express y los rovers en la superficie, en 2006 se propuso una evolución basada en la transformación de los minerales. Desde el punto de vista mineralógico, la transición a la fase Noachian marca la aparición de filosilicatos en grandes extensiones de la superficie. Se trata de rocas tipo basalto, extrusivas, pero alteradas por el agua. La transición a la fase Hesperian marca la liberación de grandes cantidades de dióxido de azufre (SO₂) por la actividad volcánica, que se combinó con el agua para producir ácido sulfúrico. Muchas rocas analizadas por los rovers presentaban

incrustaciones de sulfatos, los cuales son más abundantes en presencia de agua, pues tienden a destruir los silicatos. A partir de la fase Amazonian la transformación de las rocas en Marte se debió principalmente a la lenta oxidación por parte de la atmósfera de los silicatos de hierro presentes en la superficie. Estos óxidos de hierro dieron a Marte su característico color rojizo. El famoso meteorito ALH84001 muestra muchas de estas características químicas, así como estructuras alargadas al microscopio electrónico. Esto llevó a D. McKay a interpretar estas estructuras como bacterias primitivas cuya actividad convertía los sulfuros en óxidos ([8]). Más tarde se encontrarían explicaciones puramente químicas, además de pruebas de contaminación de origen terrestre en las muestras.

Las anomalías magnéticas detectadas se concentran en el hemisferio sur del planeta, cuya corteza tiene un grosor de unos 60 km. Las cuencas de impacto mayores no presentan estas anomalías, lo que sugiere que los impactos ocurrieron después de que desapareciera el campo magnético de Marte. Las anomalías no se detectan en el hemisferio norte, cuya corteza es más fina (30 km), y donde el análisis detallado de las imágenes sugiere la existencia de numerosas depresiones de poco relieve que son vestigios de antiguos cráteres de impacto ocultos. Como consecuencia se estima que la edad geológica de la corteza al norte de la dicotomía es similar a la del sur, la parte norte simplemente ha sido completamente erosionada y sepultada por sedimentos. Según el modelo más aceptado, las cuencas se formaron hace algo menos de 4 000 millones de años, tras un periodo de relativa calma en el Sistema Solar antes del bombardeo intenso tardío. Por otro lado, también es interesante la distribución de minerales sobre la superficie de Marte. En las zonas bajas del norte, donde han aterrizado muchos vehículos exploradores, los análisis muestran rocas modificadas como andesitas y tridimita, a diferencia de los basaltos que dominan las tierras altas del sur. Los primeros indicios llevaron a N. Sleep a proponer en 1994 un escenario de tectónica de placas en Marte ([9]). El artículo fue ampliamente criticado y olvidado, pero los hallazgos de los rovers pocos años más tarde recuperaron la idea, y el trabajo fue ampliado, entre otros, por V. Baker en 2006 ([10]). En este escenario existió un periodo de unos 500 millones de años en que Marte, justo antes del bombardeo tardío y a medida que se enfriaba, pudo desarrollar una tectónica de placas muy básica. El tercio norte del planeta sería una placa de subducción bajo la placa de la región de Tharsis, lo que explicaría tanto la dicotomía de la corteza como el origen de la pluma que dio lugar a la región volcánica de Tharsis, pluma cuya posición permaneció estable tras finalizar esta corta fase de tectónica de placas. También explicaría la presencia de andesitas y otros minerales más evolucionados, pues la subducción devolvería el CO₂, agua, y SO₂ de nuevo al manto, y la posterior actividad volcánica liberaría los minerales evolucionados, que luego serían arrastrados hacia las tierras bajas por sedimentación, donde fueron encontrados por los rovers. Por otro

lado, la tectónica de placas incrementa el flujo de calor desde el manto al exterior, aumentando la convección, y esto también es consistente con un campo magnético intenso que dejaría anomalías magnéticas en las zonas con la corteza más gruesa. La subducción devolvería al manto materiales más volátiles que los presentes originalmente, lo que podría facilitar un posterior vulcanismo explosivo en Tharsis, aunque de muy corta duración, en múltiples episodios a lo largo de varios miles de millones de años. A esta teoría en la que gran cantidad de volátiles se liberan intermitentemente se la conoce como ciclos de Baker, y está apoyada por la existencia de capas de ceniza en la superficie y múltiples etapas erosivas en muchos canales. También se ha sugerido que algunas características superficiales se explican mejor con la tectónica de placas, como la alineación de los grandes volcanes de Tharsis, aunque otros autores consideran que esta teoría soluciona problemas pero añade otros nuevos, como la ausencia de cadenas montañosas.

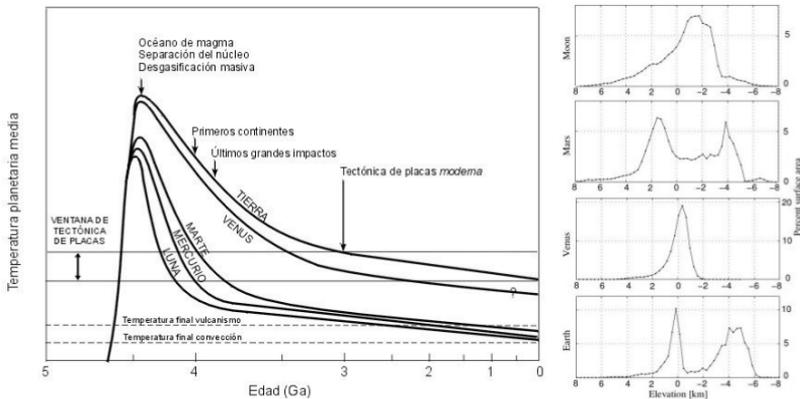


Figura 16: Izquierda: ventana para una posible tectónica de placas planetaria, que depende además de la existencia de materiales volátiles. La imagen procede del curso de geología planetaria de F. Anguita. Derecha: porcentaje de superficie a un determinado nivel de elevación, mostrando el perfil bimodal de la Tierra (el gráfico inferior) al que sólo Marte se aproxima. Cortesía de NASA.

En un contexto más general, los planetas terrestres con suficiente masa y proporción de compuestos volátiles podrían atravesar una especie de ventana de tectónica de placas, un periodo en que el planeta está suficientemente caliente como para tener un manto en convección, pero lo bastante frío como para que ese manto esté confinado por un núcleo y una corteza sólidas. La idea fue inicialmente propuesta por K. Condie en 1989. El movimiento de las placas contribuye a un perfil bimodal en

el porcentaje de superficie a una determinada elevación, con volcanes y montañas por un lado, y fondos oceánicos por el otro.

Preparativos para un amartizaje

Alcanzar la superficie de Marte siempre ha sido un objetivo para las agencias espaciales. Los primeros planes de vuelos tripulados datan de 1950 (von Braun), y desde entonces se han diseñado decenas de posibles misiones, pero ninguna se ha puesto en marcha. Además del enorme coste económico hay muchos problemas prácticos a resolver. Para empezar, no es factible plantearlo como misiones únicas de ida y vuelta, tal como se hizo con el proyecto Apollo, pues hace falta demasiado combustible para ello. Además, el cuerpo humano no está preparado para condiciones de ingravidez prolongadas, y el riesgo de osteoporosis y otras enfermedades es alto. Tampoco está claro si la gravedad de Marte (38% de la terrestre) es suficiente para mantener un nivel muscular adecuado y paliar los numerosos problemas de salud que acarrea colonizar el espacio. Por otro lado, es esencial probar las tecnologías necesarias para aterrizar, despegar, y vivir en Marte, un paso intermedio en que juega un papel fundamental la Estación Espacial Internacional. Sus experimentos ayudan en objetivos tan dispares como estudiar los efectos psicológicos de un largo viaje en un espacio limitado, mantener un invernadero en las condiciones de Marte, construir ladrillos a partir del polvo de su superficie (que es tóxico), o filtrar el CO₂ eficazmente y respirar un aire parecido al marciano pero enriquecido en oxígeno. El primer experimento en Marte lo llevará a cabo el rover Perseverance, que tratará precisamente de producir oxígeno. Otro experimento intermedio previsible será el retorno de muestras, con el objetivo de probar las tecnologías necesarias para volver desde la superficie de Marte. No se espera una misión tripulada al menos hasta la década de 2030, en la que la NASA está comprometida a tal objetivo por mandato presidencial, al igual que sucedió con el proyecto Apollo.

La clave para una misión tripulada exitosa y no tan costosa es valerse de la tecnología, y ésta evoluciona tan rápido que cualquier plan queda obsoleto en poco tiempo. Los primeros diseños de una sola nave cargada de combustible fueron reemplazados a finales del siglo pasado por la propuesta *Mars Direct*, que consistía en enviar una misión previa no tripulada para establecer una base automatizada, y si ésta funcionaba correctamente a la hora de utilizar lo que Marte provee para producir todo lo necesario para soportar una tripulación, incluyendo la producción de alimento y combustible para volver, entonces se enviaría una misión tripulada. Este plan se modificó más tarde para mantener la nave principal en órbita y reabastecerla de combustible desde la superficie de Marte. En los últimos años la compañía SpaceX de Elon Musk ha desarrollado la nave Falcon reutilizable que podría ser modificada para reabastecerse en

órbita y ampliada con módulos inflables que rotarían para generar gravedad artificial. Como propuesta alternativa la *Mars to Stay* sugiere que no haya viaje de vuelta, al menos a corto plazo, pues por el coste de traer a cuatro astronautas se podrían enviar muchas más personas y equipos.

Actualmente se está estudiando la posibilidad de una primera colonización basada en robots humanoides cuyos movimientos serían controlados desde la Tierra o en tiempo real desde la órbita de Marte, una evolución de los rovers actuales que sin duda encontraría muchas otras aplicaciones. En cualquier caso, toda misión a Marte irá seguramente precedida de un nuevo alunizaje con el que probar este tipo de tecnologías. La NASA tiene en marcha el proyecto Artemisa, con el que pretende alunizar cerca del polo sur de la Luna y establecer una estación en órbita lunar durante la próxima década. El concepto de esta misión pretende adelantarse a los requerimientos futuros de un vuelo tripulado a Marte, pero ha sido criticado por quedarse corto en ese sentido. La propuesta *Moon Direct*, equivalente a la diseñada para Marte, supondría establecer una base en la superficie, no en órbita, y generar en ella el combustible para volver (usando el agua presente en la Luna), lo que permitiría aumentar la frecuencia de los vuelos. En todo caso, los planes para asentar colonias estables en la Luna o Marte llevarán tiempo y requerirán de la implicación de múltiples agencias espaciales y empresas privadas, por lo que debe haber un incentivo comercial o un retorno económico para ellas dentro de un marco legal.

Uno de los problemas más graves de una misión a Marte o de establecer colonias en la Luna es la exposición a los rayos cósmicos una vez fuera de la influencia del campo magnético que protege la Tierra. Los datos de la Mars Odyssey muestran un nivel medio de exposición tres veces superior al existente en la Estación Espacial Internacional, con picos en lo que se duplica la exposición cuando el Sol incrementa su actividad. En un viaje de ida y vuelta a Marte esta exposición puede matar el 5% de las células y provocar graves problemas neurológicos, además de un riesgo alto de padecer cáncer. Se está estudiando cómo proteger las naves de esta radiación, pero es complejo pues su interacción con el propio blindaje puede generar partículas secundarias cuyos efectos serían aún peores. Una vez en la superficie de Marte el problema de los rayos cósmicos persiste, por lo que una hipotética base marciana debe estar protegida y la tecnología para ello bien probada, o de lo contrario permanecer casi siempre a una profundidad mínima de varios metros.

Como alternativa se ha sugerido la posibilidad de habitar las cuevas o túneles de lava que se han identificado en las imágenes de alta resolución. Las imágenes muestran tanto antiguos túneles colapsados visibles en la superficie como cientos de agujeros (producidos por hundimientos o impactos) que podrían dar acceso a túneles existentes, concentrados a lo largo de los tres volcanes gigantes de la región de Tharsis. Además

de proteger de los rayos cósmicos, estos túneles tendrían otras ventajas adicionales: facilitar la presurización, proteger la base del impacto de micrometeoritos, proporcionar acceso a reservas de agua congelada en el subsuelo (se han identificado glaciares al norte de esta región), y permitir la expansión progresiva de la colonia hacia túneles cercanos.

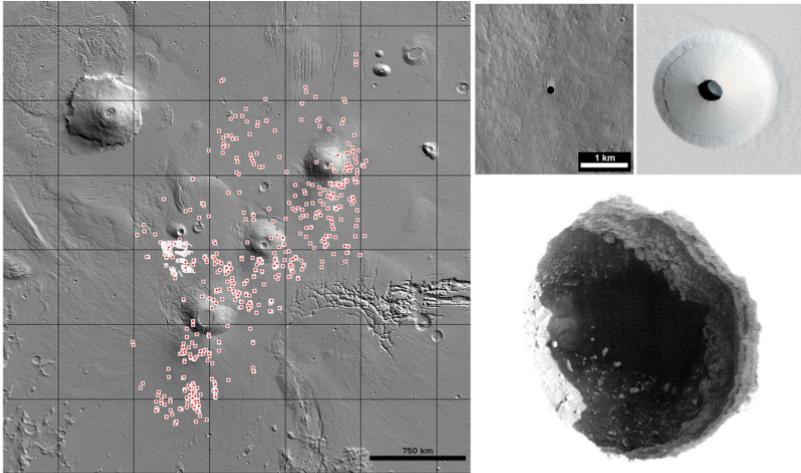


Figura 17: Izquierda: posiciones de posibles cuevas (catálogo MCG3, Mars Global Cave Candidate Catalog) sobre la imagen de los tres volcanes alineados de Tharsis. Derecha: diversos detalles de distintos agujeros. Su tamaño típico es de 100 m y su profundidad suficiente como para no recibir luz directa. Cortesía de NASA.

Conclusión

Marte es el planeta más interesante y parecido a la Tierra en el Sistema Solar, y la correspondencia de sus características superficiales hacen de la geología terrestre una herramienta esencial para estudiarlo. Su subsuelo podría albergar vida muy básica dada la abundancia de agua líquida en el pasado, el vulcanismo y evolución mineralógica, y el hecho de que la vida en la Tierra surgiera muy temprano. Además, es el único planeta en que sería posible establecer una colonia autosuficiente en las próximas décadas, pues los otros planetas terrestres son demasiado inhóspitos o lejanos. Pero lograrlo requiere resolver con ingenio una larga lista de problemas. Al principio de la exploración espacial lo primero que hizo el ser humano al llegar a la Luna, antes incluso de pisarla, fue lanzar basura por la ventanilla. Ahora es evidente que colonizar el espacio requiere, entre otras cosas, de tecnologías capaces de reciclar y reutilizar los residuos, y mantener

un ecosistema autosostenido que genere comida y aire respirable⁵. Ante la pasividad mostrada por nuestros dirigentes para afrontar los grandes problemas a largo plazo, este tipo de tecnologías serán imprescindibles en la Tierra para resolver los desafíos medioambientales de un futuro incierto.

Referencias

- [1] T. Alonso, 2017, “Discos circunestelares: la cuna de los planetas”, Anuario del Observatorio Astronómico.
- [2] S. E. Lauro et al, 2020, “Multiple subglacial water bodies below the south pole of Mars unveiled by new MARSIS data”, *Nature Astronomy*, 28-septiembre, <https://www.nature.com/articles/s41550-020-1200-6>
- [3] O. Korabiev et al., 2019, “No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations”, *Nature* v. 568, pages 517–520.
- [4] R. V. Morris et al., 2016, “Silicic volcanism on Mars evidenced by tridymite in high-SiO₂ sedimentary rock at Gale crater”, <https://www.pnas.org/content/early/2016/06/07/1607098113.full>
- [5] J. Laskar et al., 2004, “Long term evolution and chaotic diffusion of the insolation quantities of Mars”, *Icarus* 170, Issue 2, pages 343-364.
- [6] G. L. Villanueva et al., 2015, “Strong water isotopic anomalies in the martian atmosphere: Probing current and ancient reservoirs”, *Science* v. 348, Issue 6231, pages 218-221.
- [7] W. K. Hartmann and G. Neukum, 2001, “Cratering Chronology and the Evolution of Mars”, *Space Science Reviews* v. 96, pages 165–194.
- [8] D. McKay et al., 1996, “Search for past life on Mars: Possible relic biogenic activity in Martian meteorite ALH 84001”, *Science* v. 273, pages 924-930.
- [9] N. Sleep, 1994, “Martian plate tectonics”, *Journal of Geophysical Research* v. 99, pages 5639-5655.
- [10] V. R. Baker, 2006, “Water and the evolutionary geological history of Mars”, *Bollettino della Societa Geologica Italiana* v. 125, pages 357-369.

Lecturas complementarias

- J. Kelly Beatty and Andrew Chaikin, 1981, “The New Solar System”, Cambridge University Press & Sky Publishing Corporation. Capítulo 5 sobre Marte de Michael H. Carr.
- K. Condie, 1989, “Plate Tectonics & Crustal Evolution”, Pergamon Press.
- F. Anguita, 1993, “Geología Planetaria”, Editorial Mare Nostrum.
- F. Anguita, 1998, “Historia de Marte. Mito, exploración, futuro”, Editorial Planeta.

⁵Entre los trabajos de este tipo cabe destacar el proyecto MELiSSA de la ESA, parte del cual se desarrolla en la Universidad Autónoma de Barcelona.

M. Riveira, 2018, “Astrobiología: Búsqueda de vida extraterrestre”, Editorial vLa. Disponible en Amazon y en la Agrupación Astronómica de Madrid.

Experimentos de Viking para detectar vida en Marte: https://en.wikipedia.org/wiki/Viking_lander_biological_experiments

Observaciones visuales de Marte anteriores a la exploración espacial: <https://faculty.humanities.uci.edu/bjbecker/ExploringtheCosmos/lecture19.html>

Proyecto MELiSSA: <https://www.melissafoundation.org/>