

**50**  
ANIVERSARIO



UNIVERSIDAD  
DE MÁLAGA

ISBN 978-84-1335-268-8



9 788413 352688

**LECCIÓN INAUGURAL**

Curso 2023-2024

**Mars 2020**  
Una misión espacial  
a nuestro gemelo planetario

JAVIER LASERNA

umaeditorial 

# **MARS 2020**

UNA MISIÓN ESPACIAL  
A NUESTRO GEMELO PLANETARIO

JAVIER LASERNA

**Mars 2020**  
Una misión espacial  
a nuestro gemelo planetario

UNIVERSIDAD DE MÁLAGA  
2023

© Javier Laserna

© UMA Editorial. Universidad de Málaga  
Bulevar Louis Pasteur, 30 (Campus de Teatinos)  
29071 - Málaga  
[www.umaeditorial.uma.es](http://www.umaeditorial.uma.es)

Diseño y maquetación: Aurora Álvarez. UMA Editorial

ISBN: 978-84-1335-268-8

Depósito Legal: MA-1168-2023

Impresión: Imagraf Impresores S. A.  
Impreso en España - Printed in Spain

Esta obra también está disponible en formato electrónico.



Esta editorial es miembro de la UNE, lo que garantiza la difusión y comercialización de sus publicaciones a nivel nacional.

Cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública o transformación de esta obra sólo puede ser realizada con la autorización de sus titulares, salvo excepción prevista por la Ley.

*A mis estudiantes*

## **Agradecimiento**

Este texto está dedicado a los estudiantes que me han acompañado a lo largo de la ya larga trayectoria de UMA LaserLab, algunos de los cuales son profesores hoy de esta universidad y otros se encuentran formando parte de otras universidades, centros de investigación y destinos profesionales. Sin su incansable esfuerzo, su paciencia y su afecto, el trabajo de construir un laboratorio único y singular como UMA LaserLab nunca hubiese sido posible. También deseo agradecer a un número apreciable de postdocs procedentes de otras instituciones que hayan confiado en nuestros proyectos y que, abandonando temporal o definitivamente otros destinos, se han incorporado a nuestro microcosmos y entregado al imponente esfuerzo necesario para hacer una investigación científica de frontera.

Este documento condensa años de trabajo y maduración y un conocimiento basado en múltiples estudios teóricos y experimentales. Las ideas que condujeron a la creación de este laboratorio han sido avaladas por diversos gestores de la Universidad de Málaga, muy especialmente por José Angel Narváez Bueno y por Teodomiro López Navarrete. Desde sus respectivos cargos institucionales ellos apostaron en su momento por financiar una infraestructura distinta, avanzada y de riesgo, en la confianza de que la empresa saldría bien. Su visión estratégica y su anticipación han creado el germen de

un centro de investigación de dimensión internacional como es hoy UMA LaserLab. Su amistad y su comprensión han sido un sustento fundamental para esta aventura.

## **Mars 2020**

### Una misión espacial a nuestro gemelo planetario

Desde que el hombre comenzó a tener conciencia de su lugar en el planeta, de que la Tierra es uno más de los cuerpos celestes que pueden observarse en el firmamento y abordó la cuestión del significado de la vida –ese concepto tan familiar y a su vez enigmático– la especie humana se ha embarcado en la formidable aventura de poner en claro si la vida es una singularidad de nuestro planeta o si, por el contrario, la vida no es un fenómeno aislado y como tal, ha podido surgir en otros lugares más allá de nuestro entorno. El descubrimiento de vida fuera de la Tierra sería uno de los hallazgos más importantes de la historia y supondría una revolución respecto a las creencias esenciales de nuestra civilización. Visionarios como Epicuro, Lucrecio, Maimónides, el propio Alberto Magno y un amplio número de otros injustamente olvidados en la historia imaginaron la presencia de vida en una pluralidad de mundos. Incluso religiones del sudeste asiático como el hinduismo y el budismo han considerado la existencia de vida fuera de nuestro planeta, en tanto que Giordano Bruno en la época posterior a Copérnico postuló la existencia de estrellas como el sol rodeadas de planetas habitados por animales y seres inteligentes. En la Edad Moderna, el descubrimiento de

nuevos mundos y continentes aquí en la Tierra alentó las ideas de que, por qué no, también podrían existir otros seres fuera de nuestro planeta.

Desde el Departamento de Astronomía de la Universidad de Harvard, Avi Loeb ha afirmado recientemente, no sin cierto optimismo, que las condiciones de la Tierra es probable que se reproduzcan en casi un sextillón (mil trillones) de exoplanetas habitables dentro del volumen observable del universo [1]. Se entiende por exoplanetas habitables aquellos situados en la región alrededor de una estrella en la que el flujo de radiación incidente permitiría la presencia de agua en estado líquido sobre su superficie. Aunque a fecha de hoy sólo se ha verificado la existencia de unos 6000 exoplanetas, todos ellos en la Vía Láctea, el número crece de forma imparable a medida que los métodos de detección y los instrumentos de observación evolucionan hasta sistemas más precisos y fiables. Para delimitar la zona habitable, además, se consideran importantes otros parámetros como la excentricidad orbital o la velocidad de rotación del planeta.

La idea que sugiere la afirmación del profesor Loeb es que si las condiciones ambientales de la Tierra dieron lugar en algún momento de su historia geológica a la emergencia de la vida –en nuestro planeta esto debió ocurrir hace alrededor de 3700 millones de años, quizá más–, podría imaginarse que la vida podría haber surgido en exoplanetas bien en la Vía Láctea o en otras galaxias del llamado universo observable, entendiendo por éste la parte del universo total que podemos ver con los instrumentos de que disponemos en la actualidad.

De la búsqueda de la vida surge la nueva disciplina denominada *astrobiología*. Comprende ésta el estudio del origen, evolución, distribución y futuro de la vida en el universo, siendo pues un campo intrínsecamente interdisciplinar que abarca áreas como la astronomía, la biología, la química, la geología, la heliofísica y la ciencia planetaria. El conocimiento de las grandes transiciones en las condiciones ambientales de la Tierra primitiva hasta el momento actual, así como la comprensión de cómo un entorno se transforma de no vivo en vivo y cómo coevolucionan la vida y el medio anfitrión son fundamentales para esta búsqueda. En consecuencia, una gran parte del esfuerzo asociado a la astrobiología se centra en el estudio de la Tierra, siendo conocedores de que los ambientes que pueden ser habitables hoy o lo han sido en el pasado no son necesariamente los mismos que podrían haber favorecido el surgimiento de la vida. Es por ello que actividades complementarias de laboratorio y estudios de campo realizados en una amplia gama de entornos terrestres forman también parte del cuerpo de conocimiento de la astrobiología.

Aplicar las características de la vida a la búsqueda de vida en otros lugares significa identificar, no simplemente los requisitos para la vida terrestre, sino también las características fundamentales de la vida. Los criterios generales comúnmente citados para la aparición y desarrollo de la vida incluyen un conjunto de requisitos: un medio para sostener el desequilibrio termodinámico; un entorno capaz de mantener enlaces covalentes, especialmente entre carbono, hidrógeno y otros átomos; un ambiente líquido; y un sistema molecular autorrepli-

cante que pueda apoyar la evolución darwiniana. Idealmente, las condiciones identificadas son lo suficientemente generales como para aplicarse a varios tipos de cuerpos celestes (planetas rocosos, lunas heladas, cuerpos pequeños o exoplanetas), pero también lo suficientemente específicas como para proporcionar herramientas útiles de búsqueda y descubrimiento.

La astrobiología destila lo que sabemos de la vida terrestre y sus orígenes en la Tierra primitiva y las amplias condiciones planetarias necesarias para la aparición y proliferación de la vida, a partir de las cuales se produjo el surgimiento y evolución de las llamadas firmas biológicas o *biofirmas*. En términos generales, una biofirma es una característica presente en la naturaleza que puede usarse como evidencia de la existencia de vida pasada o presente y que no puede darse en ausencia de vida. Las biofirmas identificadas hasta el momento incluyen, entre otras, un desplazamiento del equilibrio químico de las condiciones consideradas estables; ciertos minerales cuya formación viene mediada por la acción bacteriana; macroestructuras y microtexturas específicas en rocas y ambientes acuáticos; la constatación de patrones isotópicos diferenciados; y las moléculas orgánicas basadas en la química del carbono asociadas a las estructuras vivas. La enorme variedad de posibilidades que abre este conjunto de circunstancias ha iluminado la necesidad de estudiar los ecosistemas terrestres habitables desde otra perspectiva y buscar una mejor comprensión de los principales objetivos astrobiológicos actuales dentro del Sistema Solar (Marte, Europa, Encelado y Titán) como sistemas integrados al evaluar su habitabilidad potencial.

La búsqueda de vida en el universo requiere una apertura mental rigurosa, un constante cuestionamiento de paradigmas y una ágil reevaluación de criterios y estrategias de búsqueda. El cuestionamiento intelectual y los avances conceptuales, así como los logros y descubrimientos científicos tanto esperados como imprevistos, constituyen una actitud obligada para el avance en este campo. Queda por resolver, por ejemplo, si la vida en otras partes del Sistema Solar o más allá podría ser similar o no a la vida terrestre. Abundan las especulaciones sobre si la vida podría basarse en un elemento químico que no sea el carbono, usar un disolvente que no sea agua, o emplear un tipo diferente de sistema molecular para codificar la información genética y facilitar la evolución. Todas estas cuestiones permanecen abiertas y forman parte de esa nueva forma de pensar que sólo el tiempo y un esfuerzo continuado podrán desvelar.

De todos los lugares situados al alcance de nuestro desarrollo tecnológico actual, Marte es probablemente el lugar más lógico para buscar vida en otras partes del Sistema Solar. El planeta rojo ha sido objeto de nuestra atención desde la antigüedad. Su singular color en el firmamento, su relativa proximidad a nuestro planeta y las observaciones primitivas a partir de la invención del telescopio han creado un mundo irresistible a nuestra imaginación. Con el comienzo de la era espacial, muchos de nuestros esfuerzos se han dirigido a comprender las peculiaridades del planeta utilizando para ello nuestros mejores sistemas de observación. Marte es un mundo muy activo con una dinámica atmosférica muy variada y

una compleja variedad de ambientes, que ha experimentado una sucesión de cambios climáticos espectaculares. Aunque carece de una biosfera tal como la conocemos en la Tierra, su geología muestra que a lo largo de su historia ha visto una era propicia para la existencia de agua líquida, de ríos y lagos, glaciaciones e incluso períodos con una atmósfera de gran parecido a la de la Tierra en el pasado. Podría decirse que Marte es el gemelo planetario de la Tierra, disponiendo con nuestro planeta de una amplia gama de características compartidas, todo ello a pesar de las diferencias significativas entre ambos planetas descritas más adelante.

Los avances crecientes en nuestra comprensión de la vida en las condiciones extremas en la Tierra evocan la posibilidad de una habitabilidad pasada y sugieren una viabilidad microbiana en el complejo y duro entorno marciano. Juntos, estos resultados han aumentado considerablemente el interés en la búsqueda de vida en Marte y notables grupos de expertos en diferentes lugares y periodos han considerado la búsqueda de vida en el contexto del origen y evolución del entorno marciano como una prioridad en el complejo mundo de la exploración planetaria.

En la actualidad, Marte está siendo estudiado por no menos de ocho orbitadores y examinado localmente con al menos tres vehículos operativos. La **Figura 1** resume las misiones que se han posado con éxito en su superficie. Aunque la Unión Soviética depositó en 1971 la primera nave en Marte, fueron los aterrizadores Viking 1 y Viking 2 de Estados Unidos en 1976 las primeras sondas en enviar sistemáticamente datos del

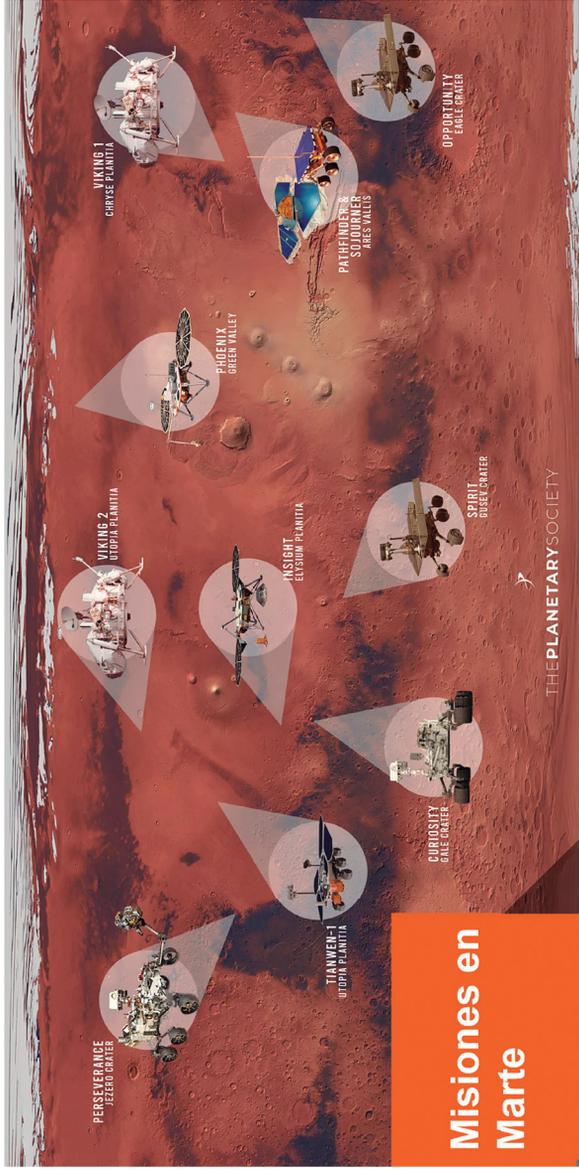


Figura 1. Misiones que han aterrizado en Marte desde el comienzo de la era espacial. Cortesía de The Planetary Society.

suelo y el ambiente marciano. Tras dos décadas de uso de plataformas estáticas, la tecnología de exploración marciana viró hacia el empleo de vehículos móviles robotizados –conocidos como *rovers*–, que a partir de 1997 han sido utilizados con éxito en 6 misiones. Las más recientes, cuyos aterrizajes culminaron en 2021, son la misión MARS 2020 de NASA con el rover *Perseverance* y la misión de la agencia espacial china Tianwen-1 con el rover *Zhurong*.

Después de transformaciones radicales ocurridas a lo largo de su historia geológica, en la actualidad, la Tierra y Marte tienen unas condiciones atmosféricas muy diferentes tanto por la presión como por su composición y presentan diferencias significativas en tamaño, gravedad, ciclo orbital y distancia al Sol, entre otros parámetros. La **Figura 2** resume algunas características comparadas de ambos planetas. Como se observa, la Tierra es sensiblemente más grande y está situada a una distancia media del Sol de una *unidad astronómica*. Las temperaturas medias en la superficie de Marte –separado del Sol una distancia media de 1,5 unidades astronómicas– son inferiores a las de nuestro planeta. Un año solar equivale a 687 días terrestres y el día en Marte –conocido en el ámbito de las misiones americanas como *sol*– dura 24 horas y 37 minutos. La presión en superficie es aproximadamente 100 veces menor que la de la Tierra, en tanto que la composición es dióxido de carbono en un 95,5 % y nitrógeno en un 3 %.

A pesar de las numerosas observaciones –o más bien a causa de estas– los enigmas referentes a nuestro gemelo planetario son cada vez más numerosos. ¿Hay evidencia de agua

### Habitabilidad en Marte

Diámetro	≈1/2 de la Tierra
Masa	≈1/10 de la Tierra
Densidad	3,9 g/cm <sup>3</sup>
Periodo	687 días
Rotación	24 hr 37 min
Inclinación	24°
Distancia al Sol	≈ 1,5 UA



	Tierra	Marte
Temperatura media	15°C	-63°C
Temperatura mínima	-90°C	-140°C
Temperatura máxima	60°C	20°C
Presión atmosférica	1013 mbar	7 mbar
Composición	78% N 21% O	95% CO <sub>2</sub> 3% N

Figura 2. Condiciones de habitabilidad comparadas de la Tierra y Marte. Imágenes cortesía de NASA.

líquida en la actualidad? ¿La hubo en el pasado? ¿Es el metano encontrado en misiones anteriores una biofirma de la actividad actual del subsuelo? ¿Por qué existen tormentas de polvo que cubren todo el planeta? ¿Por qué se forman tormentas algunos años y otros no? ¿Qué pasó en Marte hace 4 mil millones de años? ¿Por qué Marte evolucionó de una forma tan diferente a la Tierra? Y yendo aún más lejos, ¿hubo vida en Marte en algún momento, y si la hubo, ¿cómo surgió y de qué forma evolucionó? ¿Podrá el planeta ser visitado por los seres humanos en un plazo de tiempo razonable? Las preguntas son innumerables y muy a menudo ideas bien asentadas en el conocimiento científico se ven desplazadas por los hallazgos de las nuevas misiones de exploración.

En este contexto, la misión más reciente de la NASA a Marte –la misión MARS 2020– se caracteriza por cuatro gran-



Figura 3. Objetivos científicos de la misión MARS 2020 de la NASA a Marte. Imágenes cortesía de JPL/CalTech/NASA.

des objetivos científicos dirigidos a responder algunas de estas cuestiones. La **Figura 3** resume estos objetivos: en primer término, determinar si en algún momento de su historia la vida surgió en Marte. En segundo y tercer lugar, caracterizar el clima y la geología para conocer tanto su evolución como su habitabilidad y aprender las lecciones necesarias para el cuarto objetivo, que no es otro que preparar las futuras expediciones humanas al planeta. Este es un objetivo más que probable de NASA, aunque no parece que vaya a afrontarse a corto plazo y muy probablemente no antes de resolver todo lo relacionado con las misiones tripuladas a la Luna.

La misión MARS 2020 utiliza para sus objetivos el vehículo robotizado denominado Perseverance. En su conjunto, se trata de una empresa de enorme complejidad técnica y científica que más de tres años después de su comienzo está funcio-

nando tal como se diseñó, sin que se hayan producido incidencias significativas en sus sistemas de navegación, comunicación e investigación, algo que ofrece una idea palpable del exquisito nivel de madurez tecnológica y científica de la misión.

La misión fue lanzada el 30 de julio de 2020 desde Cabo Cañaveral en Florida y la nave alcanzó la superficie de Marte el 18 de febrero de 2021. El lugar de aterrizaje se eligió después de un minucioso análisis de las distintas opciones con la idea de satisfacer los objetivos de la misión. Muy especialmente, el lugar de aterrizaje debería ofrecer la posibilidad de haber albergado agua en el pasado, cuando Marte era un planeta húmedo y cálido como la Tierra en la que surgió la vida hace cerca de 4000 millones de años. Además, debía presentar una variedad de entornos que facilitasen la comprensión de la evolución geológica del planeta.

Tras un largo proceso de evaluación y análisis de las distintas opciones, el lugar de aterrizaje elegido fue el cráter Jezero, un cráter de impacto de aproximadamente 50 km de diámetro situado en el borde noroccidental de la Isidis Planitia en el hemisferio norte del planeta. La **Figura 4** muestra un mapa de localización del cráter. En la figura también se ofrece un listado de los criterios empleados para la selección de este lugar. Lo más singular del cráter Jezero es que las observaciones orbitales apuntaban a que en algún momento de la historia geológica de Marte el cráter fue un lago según nuestro familiar concepto de este tipo de masa acuática. Este lago se desecó a consecuencia de un cambio climático extensivo ocurrido en Marte en torno a unos 4000 millones de años atrás, una

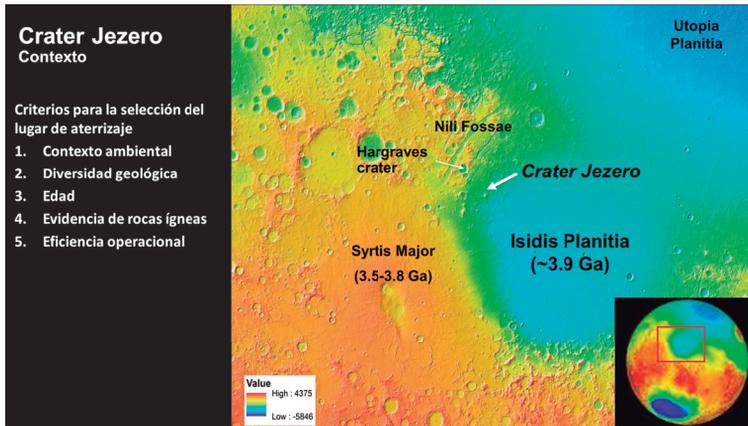


Figura 4. Plano de situación del cráter Jezero, lugar de aterrizaje de la misión Mars 2020, y listado de criterios para la selección del sitio. Imágenes cortesía de JPL/CalTech/NASA.

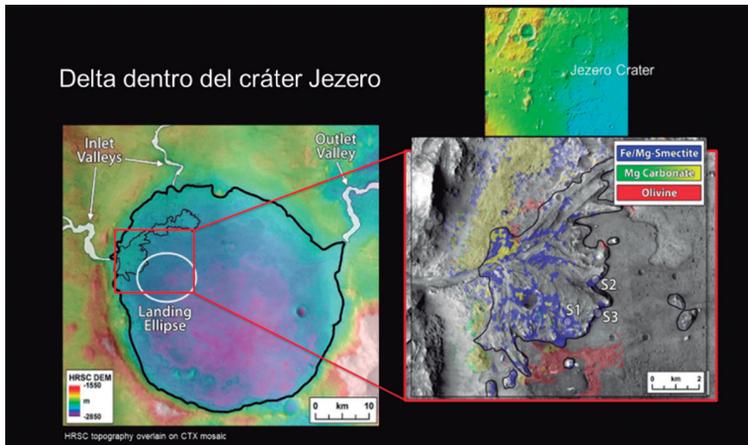


Figura 5. Diagrama esquemático de cráter Jezero y fotografía satelital del delta fluvial. Las cámaras IR de observación del satélite Mars Reconnaissance Orbiter permiten identificar la presencia de esmectitas, carbonatos y olivino en diversas zonas del delta. Imágenes cortesía de JPL/CalTech/NASA.

circunstancia aún no aclarada del todo, pero que parece estar relacionada con el impacto sobre el planeta de un asteroide de dimensiones colosales. El cráter Jezero se caracteriza por dos valles de entrada de agua y un valle para la salida, y por la existencia de un delta fluvial según se puede observar en la **Figura 5**. En la Tierra, este tipo de formaciones geológicas se asocian a menudo a la existencia de vida, razón fundamental para la elección de este lugar para el desarrollo de la misión.

El rover Perseverance dispone de una amplia dotación de instrumentos científicos, con múltiples capacidades operativas y una variedad de demostradores de tecnología. Estos últimos sirven como punto de partida para futuras expediciones humanas, incluyendo sistemas de aterrizaje más seguros y métodos para la producción de oxígeno a partir de la atmósfera marciana. Como fuente de energía el rover utiliza un generador termoeléctrico a base de radioisótopos. La **Figura 6** muestra un resumen de los instrumentos a bordo del Perseverance. Estos incluyen la cámara de visión estereoscópica de proximidad Mastcam Z, la estación meteorológica MEDA para la medida de parámetros ambientales, el sistema MOXIE para la producción de oxígeno a partir del dióxido de carbono atmosférico, el espectrómetro de fluorescencia de rayos X para microanálisis elemental PIXL, el radar de penetración RIMFAX para evaluar la estratigrafía del terreno, el espectrómetro combinado Raman-fluorescencia molecular SHERLOC para análisis contextual e imagen de proximidad WATSON y un sistema integrado de técnicas de análisis elemental y molecular con imagen y sonido denominado SuperCam. Un pequeño dron de ala mó-

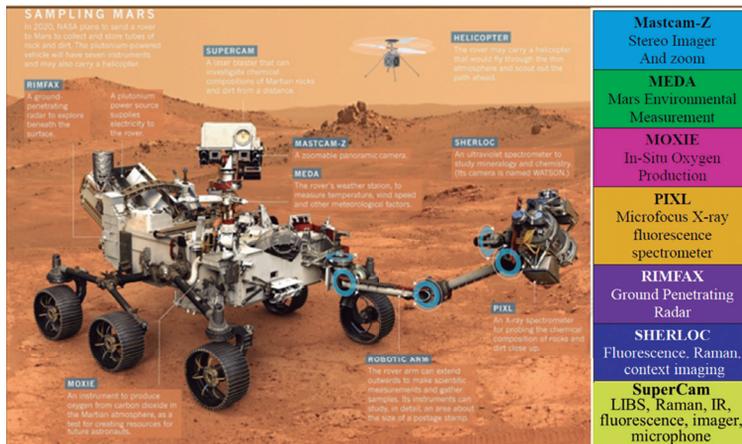


Figura 6. Listado de instrumentos a bordo del rover Perseverance con un listado de las técnicas.

vil denominado *Ingenuity* se utiliza para pruebas de vuelo en la atmósfera marciana que, caracterizada por su baja densidad, supone un reto importante para las operaciones de despegue, vuelo y aterrizaje. El rover además dispone de un sistema robotizado para la toma, encapsulado y almacenaje de muestras de rocas, suelos y atmósfera, que deberán ser traídas a la Tierra en una futura misión. En la actualidad el Perseverance ya ha recogido más de veinte muestras representativas de la diversidad geológica (y paleoambiental) tanto del suelo del cráter como del frente del delta, que serán complementadas con las muestras recolectadas durante las campañas del abanico superior del delta, el margen del cráter y las regiones a explorar fuera de Jezero. Estas muestras serán analizadas para la búsqueda de vida y de otras características en los laboratorios de la Tie-

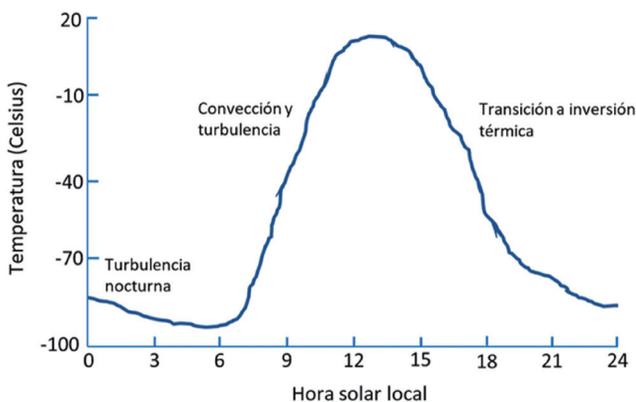


Figura 7. Diagrama de un ciclo de temperatura típico en la superficie de Marte a la llegada de Perseverance en Febrero de 2021.

rra, utilizando para ello las técnicas más avanzadas de análisis químico y físico, tanto las existentes en la actualidad, como aquellas otras que se irán desarrollando en tanto la misión de retorno de muestras concluye. El retorno de las muestras a la Tierra constituye una parte esencial de la Misión MARS 2020 y tiene máxima prioridad para la agencia espacial americana.

La estación meteorológica MEDA es uno de los instrumentos de mayor relevancia en el rover. Este sistema de fabricación española constituye la herramienta clave para conocer la presión, temperatura, humedad, viento y otros parámetros ambientales del cráter, cuyo conocimiento es importante para las mediciones efectuadas con el resto de los instrumentos y para conocer el clima marciano, un factor esencial para las futuras misiones de exploración humana del planeta. La **Figura 7** muestra un esquema de la variación de la tempe-



Figura 8. El tiempo en el cráter Jezero de Marte a mediados de agosto de 2023. <https://mars.nasa.gov/mars2020/weather/>

ratura en Jezero al comienzo de las operaciones del rover en febrero de 2021. La atmósfera de Marte es altamente susceptible a variaciones caóticas e instantáneas de sus magnitudes termodinámicas, habiéndose observado turbulencias atmosféricas tanto diurnas como nocturnas, que han sido filmadas en múltiples ocasiones por los instrumentos del rover. Nótese en la figura que el ciclo de temperatura tiene gran parecido con el observado en la Tierra, con máximas diurnas centradas en torno a las 12-15 horas. Las oscilaciones de la temperatura se deben como en la Tierra al viento y a fenómenos de convección.

La **Figura 8** muestra las temperaturas máximas y mínimas en Jezero hacia mediados de agosto de 2023. En estas fechas era otoño en la latitud del cráter Jezero.

Otro instrumento significativo de la misión es el denominado MOXIE, un demostrador de tecnología diseñado

para la producción de oxígeno a partir del dióxido de carbono atmosférico. El instrumento ha funcionado hasta la fecha según lo previsto y ha producido cantidades significativas de oxígeno. En el transcurso de siete ciclos de producción de una hora de duración, el instrumento MOXIE es capaz de producir aproximadamente 50 gramos de oxígeno, equivalentes a 100 minutos de oxígeno respirable para un solo astronauta. Teniendo en cuenta que para respirar un astronauta requiere aproximadamente unos 700 gramos diarios de oxígeno, se deduce que habría que escalar la producción del gas en un factor muy elevado para poder suministrar el oxígeno necesario para una misión de varios astronautas, incluso de corta duración. El consumo energético del instrumento es bastante elevado puesto que MOXIE requiere bombas y compresores para absorber el dióxido de carbono de la atmósfera y calentadores para elevar la temperatura del aire hasta 800 °C. Este elevado consumo energético supone un reto importante para las futuras misiones tripuladas a Marte que utilicen la tecnología de MOXIE. No obstante, la capacidad para la producción de oxígeno *in situ* es un paso previo muy firme para afrontar las numerosas tareas asociadas a la exploración humana del planeta.

Probablemente, el sistema más importante de la misión sea el llamado instrumento SuperCam. Este instrumento es un sistema de sistemas que incorpora un conjunto de técnicas de análisis incluyendo espectroscopia Raman, espectroscopia de fluorescencia molecular, espectroscopia de reflectancia infrarroja y espectroscopia de plasmas inducidos por láser. Ade-

más, incorpora una cámara de visión de larga distancia y un micrófono. Este conjunto de técnicas tiene la característica común de poder medir a distancia la composición de las rocas y los suelos marcianos. La distancia mínima de trabajo es de unos 2 m, en tanto que la máxima distancia oscila entre 10 m y varios cientos de metros. En un entorno agresivo, de orografía compleja, con una gran variedad de obstáculos y en gran medida desconocido como el que se encuentra en la traza del rover, disponer de técnicas capaces de analizar los materiales geológicos sin necesidad de un contacto físico es de un gran valor instrumental y permite acceder a muestras que de otra forma serían muy difíciles de analizar.

Un hallazgo de gran trascendencia en la misión ha sido proporcionado por las cámaras de visión de larga distancia del rover, que han permitido identificar la presencia de cantos rodados en las zonas altas del delta. En términos geológicos esta observación significa que los fenómenos de descargas acuáticas de alta energía se produjeron de forma sucesiva en las zonas donde se produjo una disminución brusca de la velocidad de flujo. La **Figura 9** muestra imágenes del frente del delta y de los cantos rodados en las zonas altas.

La espectroscopia de plasmas inducidos por láser (LIBS) es la técnica analítica capaz de medir la composición atómica de los materiales geológicos de Marte. Esta técnica ha permitido conocer la existencia de rocas ígneas en el fondo del cráter en las proximidades del lugar de aterrizaje del rover y la presencia de minerales como olivino en zonas próximas, además de carbonatos y, junto con las técnicas moleculares, la existencia de



Figura 9. Imágenes grabadas por las cámaras del rover que permiten la identificación de cantos rodados en el delta [2, 3].

trazas de materia orgánica incluidas en algunas de las rocas de la zona del delta. Estos hallazgos son de enorme trascendencia puesto que dan una idea muy definida de la forma en que se produjeron los acontecimientos geológicos hace miles de millones de años en el cráter.

El micrófono existente en el instrumento SuperCam ha permitido, junto con otro micrófono situado en el chasis del rover, medir entre otros parámetros la velocidad de propagación del sonido en Marte, algo hasta la fecha desconocido. Un micrófono operativo en un planeta diferente a la Tierra es la primera vez que funciona de manera consistente. Las medidas de la velocidad de propagación del sonido proporcionan un dato de 240 metros por segundo, que es significativamente más pequeño que el de la propagación del sonido en la Tierra. Además, se ha encontrado que las bajas frecuencias se trans-

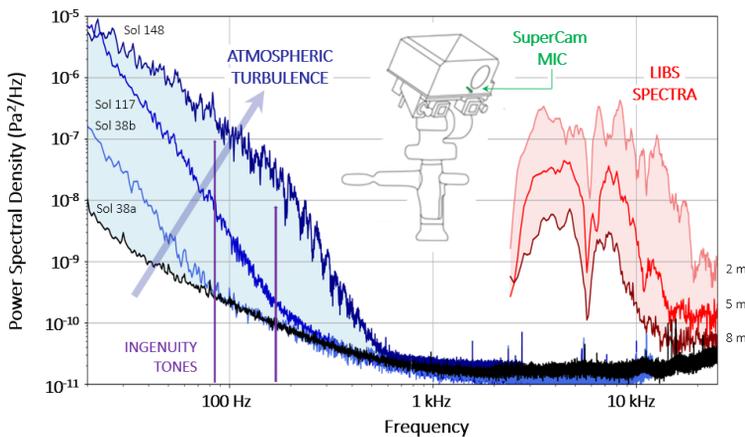


Figura 10. Espectros de frecuencia del sonido en Marte [4].

miten mejor que las frecuencias altas en el entorno atmosférico de dióxido de carbono de Marte, a diferencia de lo que ocurre en la Tierra, en que las frecuencias en la zona audible se transmiten con eficiencias parecidas. La **Figura 10** muestra algunos datos del espectro de frecuencia del sonido [4].

Los estudios del sonido en Marte han permitido establecer la correlación entre las ondas acústicas y las características de las rocas marcianas. Mediante el registro del sonido asociado a las ondas de choque producidas en la interacción del un haz láser con la superficie mineral, se ha podido medir la dureza de rocas y suelos, así como sus características de absorción de luz. El conocimiento resultante ha contribuido a establecer el mapa petrográfico del cráter Jezero y con ello a conocer datos adicionales sobre la historia geológica de nuestro planeta gemelo. Este estudio, liderado por el laboratorio UMA LaserLab de la Universidad de Málaga, supone un avance esencial para

comprender la forma en que los láseres interactúan con la materia en la atmósfera enrarecida de Marte [5].

En el equipo científico de la misión participa un grupo amplísimo de investigadores de diversos países. El personal de alta cualificación del laboratorio UMA LaserLab trabaja asimismo desde los comienzos de la misión en varias fases del desarrollo instrumental y científico del rover Perseverance. Una de las facetas de este trabajo ha sido la caracterización del sistema de calibración del sistema LIBS de SuperCam. Como la mayoría de las tecnologías de análisis químico, LIBS permite medir la composición de rocas y suelos por comparación de su respuesta con la de muestras estándar de composición conocida. El conjunto de estándares debe ser perfectamente caracterizado con antelación para garantizar la exactitud de los análisis. El laboratorio UMA LaserLab ha contribuido a esta tarea estudiando en sus instalaciones los estándares, cuyas réplicas exactas han volado a Marte a bordo del Perseverance [6-8].

La composición de las rocas de Marte obtenida mediante SuperCam ha permitido constatar la presencia masiva de olivino y materiales basálticos estratificados en el fondo del cráter Jezero. Estos materiales muestran evidencias de alteración ocurrida en sucesivos episodios de interacción agua-roca en los largos periodos de inundación del cráter [2]. Aunque las litologías ígneas son medios poco favorables para la preservación de biofirmas, las fases alteradas constituidas por fosfatos y sulfatos presentan una excepcional capacidad de preservación y son por tanto objetivos prioritarios para el estudio de las muestras

de retorno. En Marte, el estudio de tales fases de alteración mediante espectroscopia Raman y de fluorescencia ha determinado la presencia de materiales orgánicos, posiblemente de naturaleza aromática, sin haberse podido constatar si estas moléculas están relacionadas con la vida o son de naturaleza abiótica. Los datos sugieren que puede haber una diversidad de moléculas aromáticas predominantes en la superficie marciana, y que estos materiales persisten a pesar de la exposición a las condiciones de la superficie. Estas moléculas orgánicas potenciales se encuentran en gran medida dentro de los minerales vinculados a procesos acuosos, lo que indica que estos procesos pueden haber tenido un papel clave en la síntesis, el transporte o la conservación de materia orgánica [9].

El laboratorio UMA LaserLab está dotado de una infraestructura única en su género para simular las condiciones en que el análisis se puede efectuar en Marte. Se trata de una cámara de vacío térmico que permite reproducir la presión, composición y temperatura de la atmósfera marciana. La **Figura 11** muestra una fotografía de la cámara, que dispone de unas características singulares: 12 metros de longitud, 2 metros de diámetro, un volumen aproximado de 35 metros cúbicos, un rango de temperatura seleccionable entre +125 °C y -70 °C y una atmósfera de composición variable y presión comprendida entre 1000 milibar y  $1 \times 10^{-4}$  milibar. Entre los objetivos del trabajo de UMA LaserLab en la misión se pueden citar:

- (i) Simular las condiciones de análisis del instrumento SuperCam: LIBS, Raman, micrófono.
- (ii) Comparar los datos obtenidos por el rover en Marte



Figura 11. Imagen parcial de la cámara de vacío térmico del laboratorio UMA LaserLab que permite reproducir la presión, composición y temperatura de la atmósfera en Marte.

- con los obtenidos en laboratorio.
- (iii) Contribuir a la interpretación de la geología y habitabilidad de Marte.
  - (iv) Efectuar experimentos de laboratorio para avanzar en las estrategias de análisis.
  - (v) Diseñar nuevas estrategias de análisis químico para exploración planetaria.
  - (vi) Participar en los turnos de seguimiento de la misión.

En conclusión, la misión MARS 2020 de la NASA a Marte progresa según lo previsto, con el rover y los instrumentos de medición funcionando de manera nominal. Existe aún gran

variedad de actividades que desarrollar en tanto que el equipo científico de los diferentes laboratorios participantes en la misión se desempeña en la interpretación de los datos que de forma intensiva son suministrados por el conjunto de instrumentos del rover. Los datos analizados y los modelos desarrollados hasta ahora parecen indicar que Marte pudo ser habitable durante periodos de tiempo muchos más largos de lo que se pensó inicialmente, lo que puede haber favorecido una mayor abundancia de biofirmas. El siguiente paso será el envío de una misión de retorno para la recuperación de las muestras recogidas por el rover para traerlas a la Tierra, un proyecto que según las últimas estimaciones no se producirá antes de 2032.

## Literatura citada

1. M. Lingam y A. Loeb, *Life in the Cosmos*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 2021.

2. *Compositionally and density stratified igneous terrain in Jezero crater, Mars*, R. C. Wiens, A. Udry, O. Beyssac, C. Quantin, N. Mangold, A. Cousin, L. Mandon, T. Bosak, O. Forni, S. McLennan, V. Sautter, A. Brown, K. Benzerara, J. R. Johnson, L. Mayhew, S. Maurice, R. B. Anderson, S. M. Clegg, L. Crumpler, T. S. J. Gabriel, P. Gasda, J. Hall, B. Horgan, L. Kah, C. Legett IV, J. M. Madariaga, P.-Y. Meslin, A. M. Ollila, F. Poulet, S. Sharma, S. Siljeström, J. I. Simon, T. Acosta-Mayeda, C. Alvarez-Llamas, S. M. Angel, G. Arana, P. Beck, S. Bernard, T. Bertrand, B. Bousquet, K. Castro, B. Chide, E. Clavé, E. Cloutis, S. Connell, E. Dehouck, G. Dromart, W. Fischer, T. Fouchet, R. Francis, J. Frydenvang, O. Gasnault, E. Gibbons, L. Hausrath, X. Jacob, H. Kalucha, E. Kelly, N. Lanza, J. Laserna, J. Lasue, R. Lorenz, J. Martinez-Frias, S. Le Mouelic, R. Leveille, G. Lopez Reyes, N. Melikechi, J. A. Manrique, T. McConnochie, D. Mimoun, F. Montmessin, J. Moros, N. Murdoch, C. Pilorget, P. Pinet, W. Rapin, C. Royer, F. Rull, S. Schroeder, A. Stott, J. Tarnas, N. Turenne, M. Veneranda, D. Vogt, P. Willis, K. M. Stack, K. Williford, K. A. Farley, and the SuperCam team, *Science Advances*, 2022, 8, 1.

3. *Perseverance rover reveals an ancient delta-lake system and flood deposits at Jezero crater, Mars*, N. Mangold, S. Gupta, O. Gasnault, G. Dromart, J. Tarnas, S. Sholes, B. Horgan, C. Quantin-Nataf, A. Brown, S. Le Mouélic, R. Yingst, J. Bell, O. Beyssac, T. Bosak, F. Calef, B. Ehlmann, K. Farley, J. Grotzinger, K. Hickman-Lewis, S. Holm-Alwmark, L. Kah, J. Martinez-Frias, S. McLennan, S. Maurice, J. I. Nuñez, A. Ollila, P. Pilleri, J. Rice Jr., M. Rice, J. Simon, D. Shuster, K. Stack, V. Sun, A. Treiman, B. Weiss, R. Wiens, A. Williams, N. Williams, K. Williford, *Science*, 2021, 374, 711.

4. *In situ recordings of Mars soundscape*, S. Maurice, B. Chide, N. Murdoch, R. Lorenz, D. Mimoun, R. C. Wiens, A. Stott, X. Jacob, T. Bertrand, F. Montmessin, N. Lanza, C. Alvarez Llamas, S. M. Angel, M. Aung, J. Balaram, O. Beyssac, A. Cousin, G. Delory, O. Forni, T. Fouchet, O. Gasnault, H. Grip, M. Hecht, J. Hoffman, J. Laserna, J. Lasue, J. Maki, J. McClean, P.-Y. Meslin, S. Le Mou-élic, A. Munguira Ruiz, C. E. Newman, J. A. Rodríguez Manfredi, J. Moros, A. Ollila, P. Pilleri, S. Schröder, M. de la Torre Juárez, T. Tzanetos, K. Stack, K. Farley, K. Williford, and the SuperCam team, *Nature*, 2022, 605, 653.

5. *The sound of geological targets on Mars from the absolute intensity of laser-induced sparks shock waves*, C. Álvarez-Llamas, J. Laserna, J. Moros, P. Purohit, L. García-Gómez, S. M. Angel, P. Bernardi, B. Bousquet, A. Cadu, E. Dauson, O. Forni, T. Fouchet, O. Gasnault, X. Jacob, G. Lacombe, N. L. Lanza, C. Larmat, J. Lasue, R.D. Lorenz, P.-Y. Meslin, D. Mimoun, F. Montmessin, N. Murdoch, A. M. Ollila, P. Pilleri, N. Randazzo, A. L. Reyes-Newell, S. Schröder, A. Stott, J. T. Cate, A. Udry, D. Vogt, S. Clegg, A. Cousin, S. Maurice, R. C. Wiens and the SuperCam Acoustics and LIBS Working Groups, *Spectrochimica Acta Part B*, 2023, 205, 106687.

6. *SuperCam Calibration Targets: Design and Development*, J. A. Manrique, G. Lopez-Reyes, A. Cousin, F. Rull, S. Maurice, R. C. Wiens, M. B. Madsen, J. M. Madariaga, O. Gasnault, J. Aramendia, G. Arana, P. Beck, S. Bernard, P. Bernardi, M. H. Bernt, O. Beyssac, P. Caïs, C. Castro, K. Castro, S. M. Clegg, E. Cloutis, G. Dromart, C. Drouet, B. Dubois, C. Fabre, A. Fernandez, O. Forni, V. Garcia-Baonza, I. Gontijo, J. Johnson, J. Laserna, J. Lasue, S. Madsen, E. Mateo-Marti, J. Medina, P.-Y. Meslin, G. Montagnac, J. Moros, A. M. Ollila, C. Ortega, O. Prieto-Balasteros, J. M. Reess, S. Robinson, J. Rodriguez, J. Saiz, J. A. Sanz-Arranz, I. Sard, V. Sautter, P. Sobron, M. Toplis, M. Veneranda, *Space Science Reviews*, 2020, 216, 138.

7. *SuperCam calibration targets on board the Perseverance rover: Fabrication and quantitative characterization*, A. Cousin, V. Sautter, C. Fabre, G. Dromart, G. Montagnac, C. Drouet, P. Y. Meslin, O. Gasnault, O. Beyssac, S. Bernard, E. Cloutis, O. Forni, P. Beck, T.

Fouchet, J. R. Johnson, J. Lasue, A. M. Ollila, P. De Parseval, S. Gouy, B. Caron, J. M. Madariaga, G. Arana, M. B. Madsen, J. Laserna, J. Moros, J. A. Manrique, G. Lopez-Reyes, F. Rull, S. Maurice, R. C. Wiens, Spectrochimica Acta Part B, 2022, 188, 106341.

**8.** *Homogeneity assessment of the SuperCam calibration targets*, J. M. Madariaga, J. Aramendia, G. Arana, L. Gómez-Nubla, S. Fernandez-Ortiz de Vallejuelo, K. Castro, C. Garcia-Florentino, M. Maguregui, I. Torre-Fernández, J. A. Manrique, G. Lopez-Reyes, J. Moros, A. Cousin, S. Maurice, A.M. Ollila, R. C. Wiens, F. Rull, J. Laserna, V. Garcia-Baonza, M. Madsen, O. Forni, J. Lasue, S.M. Clegg, S. Robinson, P. Bernardi, P. Caïs, J. Martinez-Frias, P. Beck, S. Bernard, M.H. Bernt, E. Cloutis, O. Beyssac, C. Drouet, B. Dubois, G. Dromart, C. Fabre, O. Gasnault, I. Gontijo, J.R. Johnson, J. Medina, P.-Y. Meslin, G. Montagnac, V. Sautter, S.K. Sharma, M. Veneranda, P.A. Willis, Analytica Chimica Acta, 2022, 1209, 339837.

**9.** *Diverse organic-mineral associations in Jezero crater, Mars*, S. Sharma, R. Roppel, A. Murphy, L. Beegle, R. Bhartia, A. Steele, J. Razzell Hollis, S. Siljeström, F. McCubbin, S. Asher, W. Abbey, A. Allwood, E. Berger, B. Bleefeld, A. Burton, S. Bykov, E. Cardarelli, P. Conrad, A. Corpolongo, A. Czaja, L. DeFlores, K. Edgett, K. Farley, T. Fornaro, A. Fox, M. Fries, D. Harker, K. Hickman-Lewis, J. Huggett, S. Imbeah, R. Jakubek, L. Kah, C. Lee, Y. Liu, A. Magee, M. Minitti, K. Moore, A. Pascuzzo, C. Rodriguez Sanchez-Vahamonde, E. Scheller, S. Shkolyar, K. Stack, K. Steadman, M. Tuite, K. Uckert, A. Werynski, R. Wiens, A. Williams, K. Winchell, M. Kennedy, A. Yanchilina, Nature, 2023, 619, 724.